

БИБЛИОТЕКА УЧИТЕЛЯ И ШКОЛЬНИКА

В.В. Майер

СВЕТ В ОПТИЧЕСКИ
НЕОДНОРОДНОЙ
СРЕДЕ

УЧЕБНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2007

УДК 535
ББК 22.34
М 14

Майер В. В. **Свет в оптически неоднородной среде: учебные исследования.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 232 с. — ISBN 978-5-9221-0712-9. (Библ. уч. и шк.)

Книга содержит описания учебных исследований по распространению света в оптически неоднородной среде. Приведены сведения о методах создания оптически неоднородных сред. Подробно рассмотрены оптические свойства неравномерно нагретого оргстекла. Предложены конструкции простых приборов для моделирования миража, зеленого луча, гравитационной линзы, электронно-оптических систем. Все опыты могут быть поставлены в школьном физическом кабинете или в домашних условиях. Проводя исследования, читатель познакомится с интересными и практически важными оптическими явлениями, приобретет навыки самостоятельной работы.

Для преподавателей физики средней и высшей школы, студентов педагогических вузов, руководителей физических и технических кружков, а также для школьников, интересующихся физикой.

Учебное издание

МАЙЕР Валерий Вильгельмович

СВЕТ В ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ
УЧЕБНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
(БИБЛИОТЕКА УЧИТЕЛЯ И ШКОЛЬНИКА)

Редактор *Д.А. Миртова*

Оригинал-макет: *В.В. Затекин*

Оформление переплета: *А.Ю. Алехина*

Подписано в печать 29.12.06. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 14,5. Уч.-изд. л. 15,0. Тираж 1500 экз. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
http://www.fml.ru

Отпечатано с готовых диапозитивов
в ППП «Типография «Наука»
121099, г. Москва, Шубинский пер., 6

ISBN 978-5-9221-0712-9



9 785922 107129

ISBN 978-5-9221-0712-9

© ФИЗМАТЛИТ, 2007

© В. В. Майер, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Глава 1. Распространение света в оптически неоднородной жидкости	7
1.1. Осветители для получения узких световых пучков.	7
1.2. Плоскопараллельная прозрачная кювета	11
1.3. Пучок света, искривленный оптически неоднородной жидкостью	14
1.4. Радиус кривизны искривленного пучка	17
1.5. Волнообразный ход светового пучка	19
1.6. Наблюдения сквозь оптически неоднородную среду	22
1.7. Почему искажается изображение прямого отрезка?	24
Глава 2. Распространение света в оптически неоднородном твердом теле	30
2.1. Загадка нагретого оргстекла	30
2.2. Оптическая неоднородность и исчезающий предмет	34
2.3. Тень от неравномерно нагретого оргстекла.	37
2.4. Самодельная призма из оргстекла	41
2.5. Преломление призмой при разных температурах	45
2.6. Зависимость показателя преломления оргстекла от температуры	48
2.7. Градиент показателя преломления в неравномерно нагретом оргстекле	50
2.8. Распространение света в неравномерно нагретом оргстекле	54
2.9. Использование жидкостных нагревателей	58
Глава 3. Псевдолинза Роберта Вуда	62
3.1. Неоднородность на оконном стекле	62
3.2. Собирающая линза из плоскопараллельной пластинки	65

3.3. Исследование псевдолинзы	69
3.4. Псевдолинза из капли желатина	71
3.5. Законы Фика, Фурье и псевдолинза.	74
Глава 4. Градиентная линза	76
4.1. Градиентная линза из неравномерно нагретого оргстекла	76
4.2. Электрические нагреватели для градиентной линзы	79
4.3. Рассеивающая градиентная линза	83
4.4. Световой пучок внутри градиентной линзы	86
4.5. Простая демонстрация градиентной линзы.	91
Глава 5. Основы оптики слоисто-неоднородных сред	94
5.1. Распространение света в слоисто-неоднородной среде.	95
5.2. Среда с постоянным градиентом показателя преломления	99
5.3. Моделирование светового луча цепной линией.	102
5.4. Моделирование пучка лучей цепными линиями	105
5.5. Простой вывод уравнения луча	110
5.6. Физическая и графическая модели светового луча	112
Глава 6. Полное отражение света от слоисто-неоднородной среды	117
6.1. Образец оргстекла с постоянным градиентом показателя преломления	117
6.2. Полное отражение от оптически неоднородной среды.	121
6.3. Оборудование для опытов по полному отражению света.	124
6.4. Эксперимент по полному отражению света	129
6.5. Компьютерное моделирование криволинейного распространения света.	134
Глава 7. Моделирование явлений атмосферной оптики.	138
7.1. Модель миража Роберта Вуда	138
7.2. Моделирование миража в воздухе	142
7.3. Модель миража из неравномерно нагретого оргстекла	146
7.4. «Лужи» внутри оргстекла	148
7.5. Сравнение моделей миража в оргстекле и в воздухе	150
7.6. Длина нагревателя для искривления луча в воздухе	155
7.7. Модель фата-морганы.	159

7.8. Мираж на экране	162
7.9. Мираж в воде	164
7.10. Зеленый луч	167
7.11. Модель зеленого луча	171
7.12. Зеленый луч из кюветы с жидкостью	176
Глава 8. Оптические градиентные модели	179
8.1. Задача о брахистохроне	179
8.2. Движение по брахистохроне	184
8.3. Модель явления Ломоносова	186
8.4. Модель гравитационной линзы	189
8.5. Оптические модели электронно-оптических систем	196
8.6. Моделирование распространения звука	201
Глава 9. Учителю физики о градиентной оптике	205
9.1. Нужна ли градиентная оптика в курсе физики?	205
9.2. Современное состояние методики изучения основ физической оптики	207
9.3. Основное содержание и структура учебного материала.	213
9.4. Очерк методики изучения градиентной оптики.	219
9.5. Введение и формирование фундаментальных понятий физической оптики	221
Заключение.	232

Предисловие

Выдающийся экспериментатор П. Л. Капица говорил: «Школьник понимает физический опыт только тогда хорошо, когда он его делает сам. Но еще лучше он понимает его, если сам делает прибор для эксперимента». Эти слова полностью определяют цель и задачи книги, которую вы, читатель, держите в своих руках. Поэтому можно было бы обойтись и без предисловия, однако оно нужно автору по двум причинам.

Во-первых, он должен предупредить вас, что книга, хотя и рассчитана в первую очередь на школьника, интересующегося физикой, и посвящена описанию простых учебных исследований, но отнюдь не проста в том смысле, что потребует от вас работы, причем не только головой, но и руками. Лучше, наверное, сказать так: автор предлагает читателю совместно провести небольшие исследования ряда интересных и практически важных оптических явлений, относящихся к распространению света в оптически неоднородных средах. Свою часть работы автор выполнил несколько раньше, чем вы начнете делать свою. Но он старался сделать все, чтобы вы успешно смогли догнать и опередить его.

Вторая причина — это тоже долг, но приятный. Книга, как уже говорилось, в основном содержит описания условий и результатов учебных экспериментальных исследований. А прежде чем браться за описание физического опыта, его нужно придумать и поставить. На каждый удачный опыт немало опытов приходится неудачных — просто потому, что плохих идей, увы, всегда больше, чем хороших. Всякий удачный опыт в свою очередь требует многократной проверки — лишь тогда его можно рекомендовать для повторения. Помимо этого экспериментальную установку и само явление нужно сфотографировать, а оптические и электрические схемы начертить. Существенная часть этой многообразной и зачастую не самой веселой работы была проделана Е. С. Мамаевой, Л. С. Кропачевой, А. Ф. Волковым, О. Г. Батаноговой, А. Н. Тепиным, Л. Е. Чирковым. Идея основной серии опытов возникла в результате обсуждения наблюдения, выполненного в нетривиальных условиях В. С. Кортаевым. Эксперименты с брахистохроной разработаны совместно с Р. В. Майером, компьютерные программы — вместе с А. С. Рудиным. Непосредственная работа над окончательным текстом книги осуществлена совместно с Е. И. Вараксиной, которой принадлежат эксперименты по моделированию миражей, фата-морганы и зеленого луча в оптически неоднородных жидкостях.

Автор искренне благодарен коллегам, чей труд способствовал появлению этой книги. Он будет весьма признателен и тем читателям, которые укажут на обнаруженные ими недостатки.

Глава 1

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ

Оптически однородной называется среда, в каждой точке которой абсолютный показатель преломления имеет одно и то же значение. В оптически однородных средах свет распространяется прямолинейно. Примером такой среды является чистая жидкость. Наиболее доступна вода, абсолютный показатель преломления которой в нормальных условиях сохраняет постоянное значение. Однако его можно увеличить или уменьшить, растворяя в воде различные вещества, нагревая или охлаждая воду. Это позволяет в одной и той же жидкости создавать области с разными значениями показателя преломления. Между указанными областями образуются переходные оптически неоднородные слои, в которых показатель преломления плавно изменяется от точки к точке. Исследованиям распространения света в оптически неоднородных жидкостях и посвящена настоящая глава. Создавать такие жидкости мы будем, главным образом, диффузией. Однако в некоторых случаях с этой целью будет использоваться зависимость показателя преломления воды от температуры. Для опытов вам понадобятся осветитель, способный давать узкий световой пучок, и плоскопараллельная прозрачная кювета. В главе рассказано, как их сделать, и представлены учебные исследования криволинейного распространения света, волнообразного хода светового пучка, искажения формы предметов при наблюдениях сквозь оптически неоднородную жидкость.

1.1. Осветители для получения узких световых пучков

- Можно было бы специально и не рассматривать осветители, но есть два соображения за то, чтобы уделить им и физическим принципам их работы некоторое внимание. Во-первых, осветители, дающие узкие пучки света, используются во многих опытах по оптике. Во-вторых, наблюдения показывают, что действия работающих с выпускаемыми промышленностью школьными осветителями (рис. 1.1) или их аналогами, зачастую настолько ма-

лоосмысленны, будто этот простой прибор не признает никаких правил, и нужный результат может быть получен лишь случайно.



Рис. 1.1. Этот или подобный ему осветитель пригоден для большинства описанных в книге опытов

Простейший осветитель содержит источник света и непрозрачный экран с небольшим отверстием, выделяющим нужный по ширине и форме сечения пучок света. Чем меньше отверстие в экране и чем дальше экран расположен от источника света, тем уже даваемый осветителем световой пучок, но и тем меньше энергия этого пучка.

На рис. 1.2 схематически изображен подобный осветитель. Он состоит из алюминиевого или картонного основания *1* с двумя отогнутыми стойками, на одной из которых закреплена лампочка карманного фонаря *2*, а в другой — проделано отверстие,

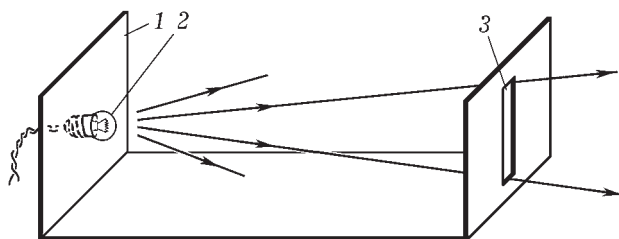


Рис. 1.2. Конструкция простейшего осветителя

например, щель $З$. Удобно в последней стойке сделать большое отверстие и затем перекрывать его непрозрачными экранами с необходимыми для тех или иных опытов отверстиями. Чтобы свет от лампочки, идущий мимо экрана с отверстием, не мешал наблюдениям, осветитель следует обернуть черной бумагой (например, от фотопакета) и закрепить ее на стойках резиновыми колечками.

● Основным недостатком простейшего осветителя является то, что он обеспечивает получение светового пучка лишь небольшой интенсивности. Чтобы избавиться от этого недостатка, можно использовать собирающую линзу. Посмотрите на рис. 1.3: весь

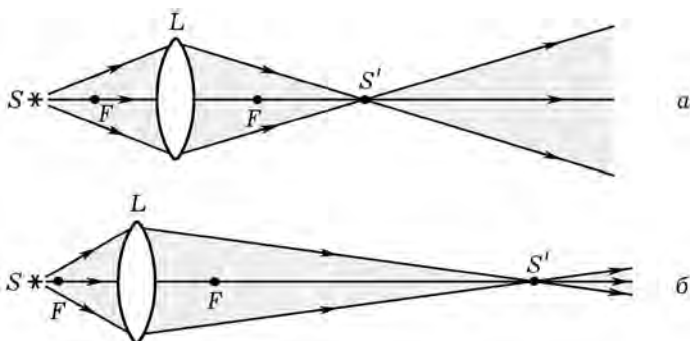


Рис. 1.3. Собирающая линза позволяет получить узкий пучок света

световой поток, падающий от источника света S на линзу L , преобразуется линзой так, что проходит через изображение S' источника. Вблизи изображения S' пучок света может быть достаточно узким и в то же время интенсивным.

Действительно, энергия света в пучке определяется площадью отверстия линзы, и *интенсивность* — энергия, проходящая за единицу времени через единицу площади, — растет с уменьшением ширины пучка. В простейшем осветителе, показанном на рис. 1.2, энергия пучка определяется площадью отверстия в непрозрачном экране, и интенсивность пучка с удалением от осветителя уменьшается, поскольку ширина пучка увеличивается. Сравнение рисунков 1.3а и 1.3б показывает, что чем ближе источник света S к фокусу F линзы, тем дальше от линзы получается изображение S' источника и, следовательно, тем длиннее та узкая часть пучка, которая может быть использована в опытах.

Школьный осветитель (рис. 1.1) собран по схеме, приведенной на рис. 1.3. Одна из возможных конструкций самодельного

осветителя, аналогичного школьному, показана на рис. 1.4. На рейке 1 резиновым колечком 2 закреплена часовая лупа 3 с двух- или трехкратным увеличением, используемая в качестве линзы

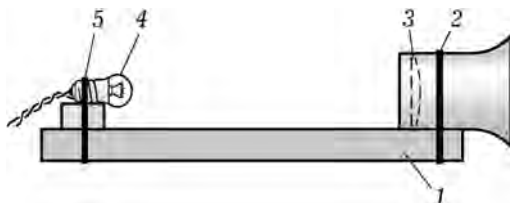


Рис. 1.4. Схема самодельного осветителя с собирающей линзой

(определите ее фокусное расстояние!). На оси линзы расположена лампочка карманного фонаря 4, прикрепленная к рейке резиновым колечком 5 так, чтобы лампочку можно было перемещать относительно линзы. Осветитель следует снабдить кожухом из черной бумаги, если идущий мимо линзы свет от лампочки мешает наблюдениям.

Поэкспериментируйте с изготовленным вами осветителем. Вы должны уверенно получать от осветителя — будь он самодельным или фабричным — то, что нужно в условиях конкретного опыта. Поэтому попробуйте перемещать лампочку относительно линзы, поворачивать ее (спираль лампы накаливания имеет сложную форму, и от ориентации спирали зависит форма сечения светового пучка), перекрывать линзу экранами с различными отверстиями и т. д.

Последний совет: если в каком-то опыте окажется, что интенсивность светового пучка недостаточна, ее можно повысить, несколько увеличив напряжение питания лампочки. Например, применяющуюся в школьном осветителе автомобильную лампу, рассчитанную на напряжение 6,3 В, без особого ущерба для нее в течение небольшого времени (до одного часа непрерывного горения) можно питать напряжением 8–9 В. Повышенное напряжение на лампы накаливания нужно подавать от регулируемого источника питания.

Для самостоятельной проработки

1. Слюсарев Г. Г. О возможном и невозможном в оптике. — М.: Физматгиз, 1960. — 190 с. (С. 40–42).

Вы, конечно, обратили внимание на то, что описанные выше осветители позволяют получать узкие сходящиеся или расходящиеся световые пучки. Наилучшим был бы, однако, осветитель, дающий параллельный пучок света. Но мы даже не рассматривали такой освеще-

титель. Разобраться в том, почему осветитель, который мог бы дать параллельный световой пучок, исключен из рассмотрения, поможет рекомендованная книга.

2. Светодиод в качестве источника света. В последние годы стали доступны яркие светодиоды, испускающие квазимонохроматический свет разных длин волн. Появились также светодиоды, дающие белый свет. Во многих отношениях эти приборы имеют преимущества перед лампами накаливания, но у них есть и недостатки. Исследуйте возможности светодиодов для получения узких ярких световых пучков.

3. Лазер в качестве источника света. В большинстве предлагаемых в книге учебных исследований в качестве источника света можно использовать лазер. Для этого нужно уметь получать из «параллельного» пучка лазерного излучения сходящиеся, расходящиеся и «параллельные» пучки, имеющие различную форму сечения. Если в физическом кабинете вашей школы имеется газовый (гелий-неоновый) лазер и учитель доверяет вам работу с ним, научитесь с помощью собирающих и рассеивающих линз преобразовывать нужным образом выходящий из лазера световой пучок. Гораздо более доступен полупроводниковый лазер, составляющий основу лазерной указки. Экспериментировать с ним можно даже дома, так как его питание обеспечивает батарейка на 4,5 В. Однако при работе с лазерами нужно неукоснительно соблюдать основное требование техники безопасности: ни в коем случае ни себе, ни кому бы то ни было еще не направлять лазерный пучок в глаз.

1.2. Плоскопараллельная прозрачная кювета

• Для целого ряда оптических опытов потребуется длинная узкая прозрачная кювета, которую вы сможете сделать, например, из оргстекла. Конечно, можно воспользоваться готовой кюветой или аквариумом подходящего размера. Но в жизни пригодится умение обрабатывать и клеить оргстекло, поэтому, если вы никогда не занимались этим делом, сейчас как раз тот случай, когда вы сможете освоить его.

Было бы неплохо, если бы вы сделали кювету толщиной 50 мм, высотой 100–150 мм и длиной 300–400 мм (чем длиннее кювета, тем лучше). Из листового оргстекла толщиной 4 мм резакон или ножовкой по металлу вырежьте четыре пластинки — будущие стенки кюветы. Стенки, имеющие большие размеры, будем называть передней и задней; стенки с меньшими размерами — боковыми. Торцы боковых стенок тщательно обработайте напильником так, чтобы они стали плоскими.

В небольшом стеклянном пузырьке с уксусной кислотой растворите такое количество опилок оргстекла, чтобы состав немного загустел — он должен «тянуться» вслед за вынимаемой из

него стеклянной палочкой. Получившимся клеем смажьте подлежащие склейке места передней, задней и торцы боковых стенок. Дайте клею некоторое время подсохнуть, затем нанесите его снова и соедините между собой четыре стенки. Кювету без дна поставьте на стол и деревянными брусками подоприте ее переднюю и заднюю стенки так, чтобы она не развалилась (можно обвязать стенки заранее приготовленной тесьмой или скрепить липкой лентой).

Спустя сутки клей полностью высохнет, и вы получите возможность обработать напильником те торцы стенок, к которым должно приклеиться дно. Нужно добиться, чтобы каждый торец стал плоским, и все они лежали в одной плоскости. Может быть, проще всего это сделать, поставив будущую кювету на большой плоский лист шкурки и, аккуратно двигая ее по шкурке, отшлифовать торцы стенок кюветы. Вслед за этим следует вырезать из оргстекла толщиной 4 мм дно и приклеить к нему стенки. Склеенная кювета вновь должна выстояться в течение суток.

Потом в кювету налейте воду и отметьте все места течи. В оставшемся клее растворите еще опилки оргстекла так, чтобы он приобрел густоту хорошей сметаны, и промажьте им обнаруженные места течи. Готовую кювету после очередной просушки еще раз проверьте, наполнив ее водой, и, если она не течет, обработайте ребра кюветы напильником и шкуркой, придав им тот вид, который будет вас достоин.

На рис. 1.5 приведена фотография кюветы, как образец того, к чему нужно стремиться или что следует превзойти.

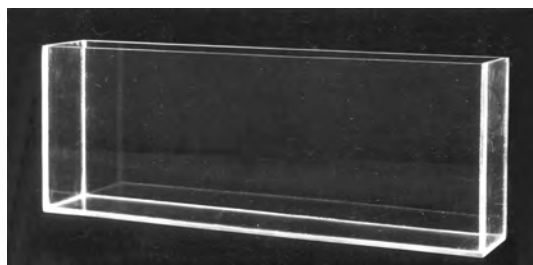


Рис. 1.5. Плоскопараллельная кювета из оргстекла

Обратите внимание, что по приведенному способу кювету придется делать три дня. Это хороший срок, и я не советую его сокращать, даже если вам покажется, что это можно сделать: скорость работы далеко не всегда является гарантией ее качества. Если вы первый раз делаете кювету, то подобрав мате-

риалы, тщательно продумайте порядок работы. Не ленитесь написать небольшой план. Попробуйте предусмотреть все мелочи. Особо внимательно выявите возможные препятствия в работе. Все это — не впустую потраченное время, а необходимые составляющие успеха.

Для самостоятельной проработки

1. Изготовление кюветы из стекла. Попробуйте сделать плоскопараллельную кювету не из оргстекла, а из обычного оконного стекла. Для этого нужно подобрать стекло толщиной 3–4 мм без свилей и других неоднородностей, то есть такое, сквозь которое резкие границы предметов выглядят неискаженными. Затем нужно научиться пользоваться твердосплавным стеклорезом (см. рекомендованную ниже книгу). Наконец, в магазине хозяйственных товаров следует приобрести подходящий клей или герметик и попробовать склеить им встык два куска стекла. После выполнения предварительных этапов работы из стекла вырезают боковые стенки и дно будущей кюветы. Еслирезы получились не очень аккуратными, торцы стеклянных пластинок обрабатывают на стекле абразивом, смоченным водой (рис. 1.6). Сначала склеивают стенки, затем к ним приклеивают дно. После полного

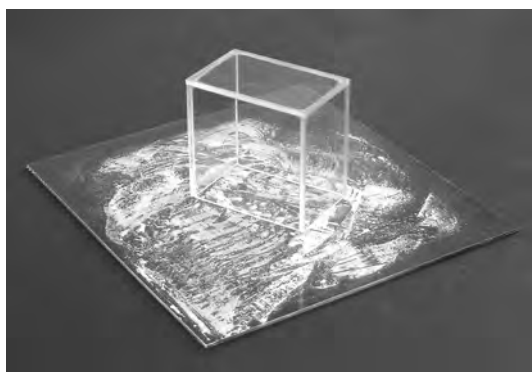


Рис. 1.6. Обработка краев кюветы на стекле абразивом, смоченным водой

высыхания клея проверяют кювету на герметичность и при необходимости промазывают клеем места течи. Убедитесь сами, что во многих отношениях кювета из стекла предпочтительнее кюветы из оргстекла.

2. Горячкин Е. Н. Лабораторная техника и ремесленные приемы. — М.: Просвещение, 1969. — 472 с. (С. 111–115 и 117–118).

Приведены рецепты различных замазок, в том числе таких, которые позволяют соединить стекло со стеклом или стекло с металлом. Пользуясь подобными замазками, можно изготовить кювету не из оргстекла, а из стекла. Описан способ склеивания оргстекла. Рассмотрены приемы обработки, в том числе резания стекла.

1.3. Пучок света, искривленный оптически неоднородной жидкостью

● Чтобы на опыте пронаблюдать, как свет распространяется в оптически неоднородной среде, нужно совсем немного: создать такую среду и сделать ход светового пучка в ней видимым. Эти две задачи можно решить вполне традиционным путем [1]: взять две смешивающиеся жидкости с разными показателями преломления, окрасить жидкости соответствующим образом и аккуратно расположить одну над другой. Жидкости будут взаимно диффундировать друг в друга, и постепенно между ними образуется переходный слой с плавным изменением показателя преломления в вертикальном направлении. Остается лишь пустить в этот слой узкий световой пучок и пронаблюдать, как он будет распространяться.

В литре прокипяченной или отстоявшейся в течение суток воды (чтобы она не давала газовых пузырьков на стенках кюветы) растворите 350 г поваренной соли (сделайте *насыщенный раствор*) и залейте этот раствор в стеклянную банку. Во вторую такую же банку налейте литр чистой воды. Поставьте банки рядом и в обеих размешайте по щепотке хвойного концентрата (продается в аптеках). Водный раствор хвойного концентрата обладает способностью *флюоресцировать* — светиться зеленым светом под действием белого света. Это хорошо видно, если смотреть на раствор сбоку по отношению к падающему на него пучку света: при оптимальном количестве хвойного концентрата в воде раствор имеет приятный зеленоватый цвет. Избыток хвойного концентрата в растворах недопустим, так как он приведет к исчезновению флюоресценции (явление носит название *концентрационного тушения*). Нужно добиться одинаковой окраски жидкостей в обеих банках, понемногу растворяя хвойный концентрат в той жидкости, которая в падающем на нее рассеянном свете имеет менее насыщенную окраску. После этого нужно обе жидкости по отдельности отфильтровать через сложенную в несколько слоев марлю.

В расположенную горизонтально плоскопараллельную кювету (§ 1.2) размером 50 × 120 × 350 мм вначале залейте подкрашенную хвойным концентратом воду. На конец большой воронки наденьте резиновый шланг и закрепите воронку над кюветой в лапке штатива (воронку можно держать рукой, если опыт вы готовите вдвоем). Пальцами пережмите шланг и залейте в воронку подкрашенный раствор поваренной соли. Затем погрузите шланг в воду и направьте его выходное отверстие на стенку

кюветы возле ее дна. Постепенно ослабляйте зажим шланга. Вначале из отверстия шланга начнут выходить воздушные пузырьки, а потом станет вытекать раствор соли, который будет растекаться по дну кюветы и вытеснять воду вверх.

Спешить здесь не нужно: следует все сделать так, чтобы жидкости не перемешались. Когда раствор соли полностью перейдет из воронки в нижнюю часть кюветы (если воронка невелика, ее придется заполнять раствором соли несколько раз), вновь пережмите шланг и осторожным, но быстрым движением удалите его из жидкостей.

Дальше все сравнительно просто. Установите осветитель (§ 1.1), сфокусируйте свет в виде узкого пучка и направьте его на боковую стенку кюветы так, чтобы он падал на границу раздела жидкостей снизу. Если жидкости окрашены одинаково и залиты в кювету аккуратно, то граница раздела между ними получится очень четкой, и видна она будет только вблизи. В этом случае в темноте вы увидите красивый зеленый пучок света, который испытывает *полное внутреннее отражение* на границе раздела жидкостей, если падает на эту границу под углом, бóльшим предельного.

Однако спустя примерно час за счет диффузии граница размывается, и световой пучок в переходном слое между жидкостями распространяется уже не прямолинейно (рис. 1.7). Никакие фотографии и описания не заменят вам того впечатления,



Рис. 1.7. Распространение света в оптически неоднородной среде: в кювете сверху находится вода, внизу — насыщенный раствор поваренной соли; падающий на кювету слева световой пучок был сделан видимым благодаря табачному дыму

которое вы можете получить, наблюдая это прекрасное явление собственными глазами. Исследуйте его! Пускайте узкий световой пучок в кювету под разными углами к границе раздела жидкостей; сделайте широкий пучок и посмотрите, как он

распространяется в оптически неоднородной среде; проследите, как изменяется ход пучка со временем и т. д. Одним словом, проявите максимум самостоятельности, увидев новое для себя явление, и не обращайтесь внимания на мою словесную скупость: к сожалению, я видел все это много раз, и восторги уже поулеглись. Объясните, почему световой пучок изгибается вниз.

● Попробуем дать качественное объяснение явлению. В нижней части кюветы находится раствор поваренной соли, имеющий большую *оптическую плотность*, чем расположенная над ним вода. Поэтому *показатель преломления* жидкости в образовавшемся за счет диффузии переходном слое между раствором соли и водой непрерывно изменяется вдоль вертикальной оси y (рис. 1.8), плавно уменьшаясь с ростом значений y . Поскольку абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света в вакууме к скорости света в веществе $n = c/v$, скорость распространения света в верхних слоях жидкости больше, чем в нижних.

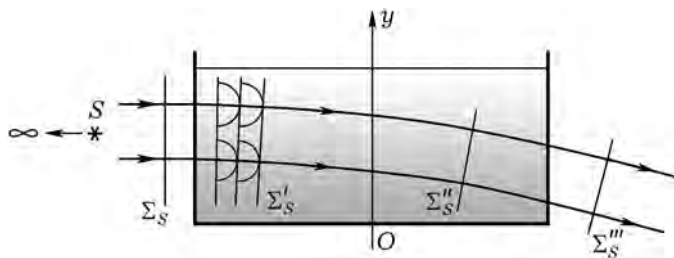


Рис. 1.8. К объяснению криволинейного распространения света в оптически неоднородной среде

Если на кювету перпендикулярно оси y падает параллельный пучок света от источника S , лежащего в бесконечности, то плоская *волновая поверхность* Σ_S внутри жидкости будет поворачиваться, последовательно занимая положения Σ'_S , Σ''_S и т. д. Это ясно, так как вверху кюветы свет распространяется быстрее, чем внизу. А световые лучи всегда перпендикулярны волновым поверхностям. Поэтому вместе с поворотом волновой поверхности произойдет и поворот лучей, так что образованный ими световой пучок изогнется в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления жидкости. Понятно, что чем резче изменения показателя преломления вдоль оси y , тем больше и изгиб светового пучка. Когда показатель преломления меняется скачком, наблюдаются обычное или полное внутреннее отражение света, и изгиб пучка выражен наиболее сильно.

Для самостоятельной проработки

1. Лекционные демонстрации по физике / Под ред. В. И. Ивероновой. — М.: Наука, 1972. — 639 с. (С. 528–529).

Из этой книги заимствован изложенный выше способ приготовления оптически неоднородной жидкости из насыщенного водного раствора поваренной соли и воды.

2. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Физматлит, 2003. — 848 с. (С. 682–698).

Рекомендуемая вам глава книги Г. С. Ландсберга посвящена фотолюминесценции и написана вполне доступным языком. По ней вы сможете подробнее познакомиться, например, с явлением концентрационного тушения флюоресценции.

3. Оптически неоднородная среда в стакане. Вы можете очень быстро убедиться, что при диффузии смешивающихся жидкостей получается оптически неоднородная среда. Для этого в цилиндрический стакан с тонкими прозрачными стенками до половины налейте чистую воду, а затем с помощью большой воронки, опущенной до дна, — насыщенный раствор поваренной соли. В стакан с жидкостью введите ровную спицу так, чтобы она расположилась наклонно. Вы увидите неискаженные изображения спицы в воздухе, воде и растворе соли. На границе воздух–вода показатель преломления меняется скачком, и изображение спицы оказывается изломанным, следовательно, при переходе из одной оптически однородной среды в другую происходит преломление света. Наконец, в переходном слое между водой и раствором соли вы увидите плавно изогнутое изображение прямой спицы. В этом слое показатель преломления меняется, очевидно, не скачком, а непрерывно. Подробно исследуйте это явление.

1.4. Радиус кривизны искривленного пучка

• Давайте немного посчитаем. Пусть параллельный световой пучок шириной dy распространяется в оптически неоднородной среде перпендикулярно оси y , вдоль которой изменяется показатель преломления среды (рис. 1.9). Допустим, что значение показателя преломления в точке B равно n , а в точке B' несколько меньше и равно $n - dn$. Пучок света загибается в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления (§ 1.3), и радиус кривизны его $R = OA = OB = OC$. Будем считать, что радиус кривизны пучка значительно больше его ширины, $R \gg dy$.

При распространения света в оптически неоднородной среде плоская волновая поверхность Σ_1 переходит в поверхность Σ_2 . Вместе с поворотом волновой поверхности на малый угол $d\varphi$ поворачиваются и световые лучи. Путь ABC , равный $Rd\varphi$, свет проходит со скоростью $v_1 = c/n$, а путь $A'B'C'$, равный

$(R + dy)d\varphi$, — с большей скоростью $v_2 = c/(n - dn)$, где c — скорость света в вакууме. Время τ прохождения светом обоих путей одинаково, следовательно,

$$\tau = \frac{R d\varphi}{v_1} = \frac{(R + dy)d\varphi}{v_2}.$$

Подставляя в эту формулу значения v_1 и v_2 , имеем

$$\frac{Rn d\varphi}{c} = \frac{(R + dy)(n - dn)d\varphi}{c}.$$

Произведение $dn dy$ мало по сравнению с другими величинами, входящими в последнее соотношение, поэтому, отбрасывая его и производя необходимые сокращения, получаем

$$R = n \frac{dy}{dn} = \frac{n}{dn/dy}. \quad (1.1)$$

Величина dn/dy — это скорость (или быстрота) изменения показателя преломления вдоль оси y . Она имеет специальное название: *градиент показателя преломления*.

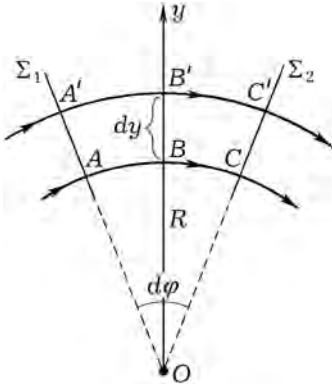
Рис. 1.9. К выводу формулы для радиуса кривизны светового пучка

Подтвердите справедливость полученной формулы качественным экспериментом.

● Формула (1.1) показывает, что чем больше градиент показателя преломления, тем меньше радиус кривизны, то есть тем сильнее искривляется световой пучок, проходящий сквозь оптически неоднородную среду. То же самое показывает и эксперимент: например, с течением времени градиент показателя преломления в слое между раствором поваренной соли и водой уменьшается (§ 1.3), и это приводит к увеличению радиуса кривизны искривленного светового пучка, то есть к уменьшению самого искривления.

Кое-кто считает, что все это следует растолковать вам подробнее. Нужно, например, не спеша объяснить, что такое лучи и волновые поверхности, как они связаны между собой, вспомнить принцип Ферма и т. п. Согласен, такое изложение полезно, но нельзя же писать обо всем! В конце концов, мне это просто не интересно. А с другой стороны, почему автор должен думать о вас хуже, чем вы того заслуживаете: напротив, я уверен, что раз уж вы поставили опыты с искривленным пучком света, то не ленитесь полистать книги или поговорить со знающими людьми, чтобы уяснить то, что вам не совсем понятно. Что же касается направления ваших поисков, то указать его — авторский долг, и это я пытаюсь сделать.

Кое-кто считает, что все это следует растолковать вам подробнее. Нужно, например, не спеша объяснить, что такое лучи и волновые поверхности, как они связаны между собой, вспомнить принцип Ферма и т. п. Согласен, такое изложение полезно, но нельзя же писать обо всем! В конце концов, мне это просто не интересно. А с другой стороны, почему автор должен думать о вас хуже, чем вы того заслуживаете: напротив, я уверен, что раз уж вы поставили опыты с искривленным пучком света, то не ленитесь полистать книги или поговорить со знающими людьми, чтобы уяснить то, что вам не совсем понятно. Что же касается направления ваших поисков, то указать его — авторский долг, и это я пытаюсь сделать.



Для самостоятельной проработки

1. Мякишев Г. Я. Принцип Ферма и законы геометрической оптики // Квант. — 1970. — № 11. — С. 16–23.

Рассмотрен принцип Ферма и его применение для объяснения основных законов оптики, миража, преломления света на сферической поверхности, образования изображения линзой.

2. Туриянский Л. Принцип Ферма // Квант. — 1976. — № 8. — С. 17–20.

Изложена история открытия принципа Ферма, началом которой послужил его спор с Декартом о возможности переноса свойств свободно движущегося тела на поведение светового луча, например, при преломлении. Ферма, применив «принцип наименьшего сопротивления», подтвердил выводы Декарта, а научные факты позволили окончательно уточнить и обобщить принцип Ферма.

3. Сендерихин А. Принцип Ферма // Квант. — 2003. — № 4. — С. 39–42.

Принцип Ферма проиллюстрирован примерами по отражению света от плоской, сферической, эллипсоидальной поверхности, преломлению на плоской и сферической поверхности.

4. Поль Р. В. Оптика и атомная физика. — М.: Наука, 1966. — 552 с. (С. 300–303).

Кратко изложены опыты по распространению света в оптически неоднородных жидкостях и дан вывод формулы для радиуса кривизны светового пучка. Книга Р. В. Поля вообще очень интересна, поскольку содержит большое количество описаний демонстрационных экспериментов, которые могут составить предмет учебных исследований. Особенно она полезна тем, кто начинает всерьез изучать оптику.

5. Калашиников С. Г. Электричество. — М.: Физматлит, 2004. — 624 с. (С. 44–46).

По этой книге вы можете познакомиться с тем, как в электростатике вводится понятие градиента потенциала. Впереди мы еще будем иметь возможность убедиться, что электростатика имеет прямое отношение к предмету наших интересов (см. § 8.5). Следующая цитата, возможно, будет здесь уместна.

«Градиентом любой скалярной величины φ в векторном анализе называют вектор, направление которого совпадает с направлением быстрейшего увеличения φ . Модуль же этого вектора равен изменению φ при перемещении на единицу длины в направлении быстрейшего изменения. Этот вектор обозначается символом $\text{grad } \varphi$.»

1.5. Волнообразный ход светового пучка

- В опытах по распространению света в оптически неоднородной жидкости (§ 1.3) пучок света изгибается в область с более высоким значением показателя преломления. Поскольку

вы сумели изогнуть световой пучок в одну сторону, то сможете загнуть его и в другую. Очевидно, вы сумеете также заставить световой пучок последовательно изгибаться в разные стороны, то есть распространяться волнообразно. Из предшествующего ясно, что для этого нужно выше и ниже плоского слоя жидкости с определенным показателем преломления расположить жидкости, имеющие меньший показатель преломления и смешивающиеся с первой. Диффузия на двух границах раздела между тремя жидкостями приведет к образованию среды с таким градиентом показателя преломления, который обеспечит волнообразный ход светового пучка в ней.

Попробуйте разработать и поставить опыт, подтверждающий приведенные рассуждения.

● Такой опыт впервые поставил Роберт Вуд — замечательный американский физик, автор множества красивых и оригинальных учебных экспериментов по оптике. Вам нелишне будет знать, как он сумел решить стоявшую перед ним задачу, поэтому имеет смысл привести описание опыта, данное самим Вудом.

«Стекланный сосуд размером $50 \times 10 \times 2$ см со стенками из зеркального стекла наполняется на 3 см крепким раствором квасцов. Сверху наливается слой воды, содержащей 10% спирта; хотя эта жидкость много легче раствора квасцов, обе они имеют примерно равные показатели преломления. Смесь глицерина и 85% спирта имеет показатель преломления много выше, а плотность — промежуточную между этими двумя жидкостями. Отсюда появляется возможность, пользуясь стекляннм сифоном с небольшим отверстием и горизонтально отогнутым концом, ввести между слоями первых двух жидкостей третью, промежуточную между ними по плотности жидкость... Все три раствора предварительно подкисляются серной кислотой и делаются флюоресцирующими путем прибавления к ним сернокислого хинина; благодаря этому пути лучей в них хорошо видимы. Осторожным помешиванием можно способствовать взаимной диффузии слоев; в результате мы будем иметь среду, в которой показатель преломления будет возрастать от поверхности до средней плоскости, и затем убывать от средней плоскости до дна; таким образом в ней будут условия, подобные атмосферным условиям, обуславливающим появление «фата-моргана», т. е. кажущегося возвышения предметов, находящихся на горизонте, и образования башенок и горных пиков.

Если очень узкий пучок параллельных лучей, взятых от вольтовой дуги и пропущенных через конденсор, направить наклонно на один из торцов сосуда, то можно будет видеть его распространение в жидкости в виде очень красивой синей волны, кривизна которой будет изменяться в зависимости от угла падения. Такой луч света, сфотографированный прямо в сосуде, представлен на рис. 1.10.»

Вряд ли вы легко сумеете достать вещества, перечисленные в рецепте Вуда. Но принцип создания оптически неоднородной среды с нужным распределением показателя преломления вы,



Рис. 1.10. Волнообразный ход светового пучка: рисунок сделан по фотографии Р. Вуда

безусловно, уяснили. Поэтому можете попробовать сделать то же самое, что и Вуд, но пользуясь только водой и насыщенным раствором поваренной соли.

Самое сложное в подготовке опыта — это расположить в кювете друг над другом воду, насыщенный раствор поваренной соли и снова воду. Дело в том, что плотность раствора соли больше плотности воды и он просто «провалится» в воду. А если поверх налитой на дно кюветы воды натянуть мелкую сетку и уже на нее аккуратно налить насыщенный раствор поваренной соли? Может быть стоит поэкспериментировать не только с раствором соли, но и с раствором сахара? Не правда ли, здесь есть, что исследовать!

Для самостоятельной проработки

1. Вуд Р. Физическая оптика. — М.-Л.: ОНТИ, 1936. — 896 с. (С. 104–105).

2. Вуд Р. Искусственные миражи // Квант. — 1971. — № 10. — С. 29–32.

Здесь изложены условия и результаты экспериментов по криволинейному распространению света в оптически неоднородных жидкостях. Описан способ приготовления оптически неоднородной среды, в которой световой пучок имеет вид синусоиды.

3. Поль Р. В. Оптика и атомная физика. — М.: Наука, 1966. — 552 с. (С. 301).

Здесь уточнен рецепт Р. Вуда, а именно указано, что насыщенный концентрированный раствор квасцов имеет плотность $1,04 \text{ г/см}^3$; глицерин, смешанный со спиртом в отношении 1:1, — $1,01 \text{ г/см}^3$, а плотность воды с примесью 10% спирта составляет $0,98 \text{ г/см}^3$. Напомним, что под квасцами понимают кристаллогидраты двойных сернокислых солей, например, алюминиевые квасцы имеют химическую формулу $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$.

1.6. Наблюдения сквозь оптически неоднородную среду

• Вернитесь к плоскопараллельной кювете, в которой создан слой оптически неоднородной жидкости (§ 1.3), и проведите наблюдения предметов сквозь этот слой. Явления, которые при этом будут иметь место, весьма разнообразны. Я, однако, поведу речь лишь об одном из них, надеясь, что многое другое вы увидите сами, проявив наблюдательность и изобретательность на деле.

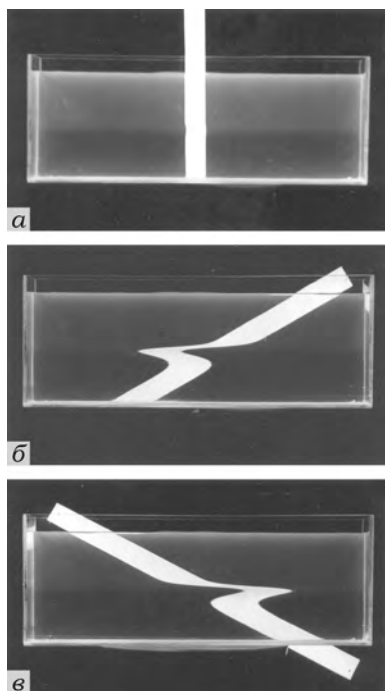


Рис. 1.11. Так искривляется прямая бумажная полоска, если наблюдать ее через оптически неоднородную среду

За кюветой в плоскости, расположенной параллельно ее передней и задней стенкам, поместите полоску белой бумаги (или какой-нибудь белый стержень) так, чтобы она была перпендикулярна границе раздела жидкостей, налитых в кювету. Сквозь жидкости вы увидите совершенно прямую полоску (рис. 1.11 *а*).

Теперь поворачивайте полоску в том или ином направлении так, чтобы она оставалась в плоскости, параллельной стенкам кюветы. Вы обнаружите, что при наблюдении через кювету, заполненную оптически неоднородной жидкостью, полоска выглядит изогнутой (рис. 1.11 *б, в*)! На ней как бы вырастает выпуклость, обращенная в сторону, противоположную направлению поворота полоски. Выясним причины, приводящие к видимому изгибу полоски.

• На рис. 1.12 схематически показана кювета с оптически неоднородной жидкостью, показатель преломления которой уменьшается в положительном направлении оси y . Вы уже знаете, что при распространении света через такую жидкость световой пучок изгибается, причем изгибается в сторону увеличивающихся значений показателя преломления, то есть вниз. Обозначим проекцию белой полоски на плоскость рисунка бук-

вами AB . Узкий пучок света, выходящий из точки S бумажной полоски (ширина этого пучка определяется диаметром зрачка глаза), дает на сетчатке глаза изображение S' . Но глаз видит точку S не в том месте, где она расположена на самом деле, а в точке S'' , в которой пересекаются мнимые продолжения

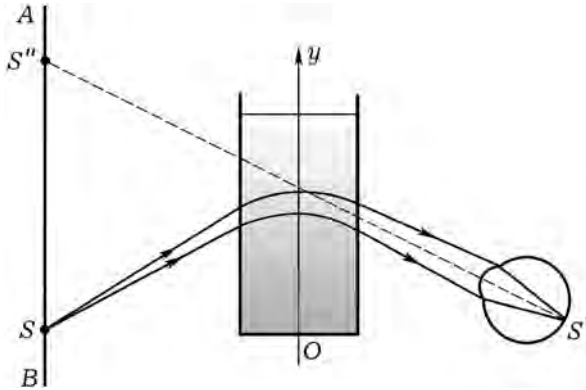


Рис. 1.12. К объяснению искажений, возникающих при наблюдении через оптически неоднородную среду

лучей, непосредственно входящих в зрачок. Следовательно, если смотреть через оптически неоднородную среду, показатель преломления которой уменьшается в вертикальном направлении, то все точки наблюдаемого объекта будут восприниматься приподнятыми. Ясно поэтому, что и наклонная полоска при таких наблюдениях должна выглядеть изогнутой. Но изогнуться она должна в вертикальном направлении, перпендикулярном границе раздела жидкостей в кювете, на самом деле же она изогнута в горизонтальном направлении (рис. 1.11)! В чем причина этого неожиданного эффекта?

Для самостоятельной проработки

1. **Хвольсон О. Д. Курс физики.** Том 2. — Берлин: Госиздат, 1925. — 775 с. (С. 491–495).

Рассматривается элементарная теория миража. Пользуясь изложенными в книге идеями, вы сможете объяснить искривление полоски, наблюдаемой через оптически неоднородную среду.

2. **Уокер Дж. Физический фейерверк.** — М.: Мир, 1988. — 298 с. (С. 117–120; 225–227).

Здесь в форме вопросов и кратких ответов на них рассмотрены основные явления атмосферной оптики. В частности, описано интересное явление, которое советуем вам подробно исследовать. На плоское стеклянное дно кюветы с водой брошены несколько кусков сахара. Сахар

в течение некоторого времени растворяется в воде без дополнительного размешивания. Если теперь вдоль дна кюветы пустить лазерный луч, то он изогнется так, что достигнет дна, отразится от него и вновь изогнется, выйдя из кюветы практически параллельно входящему в нее лучу.

1.7. Почему искажается изображение прямого отрезка?

● Чтобы получить ответ на поставленный вопрос, нужно не спеша сделать опыты, аналогичные ранее описанным (§ 1.6). Вновь в длинной узкой кювете создайте оптически неоднородную среду, залив в кювету воду и насыщенный раствор поваренной соли (§ 1.3).

За кюветой на расстоянии 20–30 см от нее наклонно расположите длинную белую спицу, зажав ее нижний конец в подходящем держателе, например, в лапке штатива. Выберите перед кюветой место наблюдения и смотрите через кювету с оптически неоднородной жидкостью на спицу. Очень важно при остановке опыта сохранить направление наблюдения неизменным. Это можно сделать, если выбрать для своего глаза некоторый ориентир и проводить наблюдения, сообразуясь с ним. В жизни вы смотрите двумя глазами и поэтому часто не отдаете себе отчета в том, что это далеко не то же самое, как зрение одним глазом. Нужно иметь в виду, что если при наблюдениях второй глаз будет вам несколько мешать (а это нередко случается с начинающими наблюдателями, еще не освоившими искусство «выключения» одного глаза), то лучше всего его не зажмуривать, а закрыть, например, куском картона или ладонью.

Работа упростится, если в проведении опыта помощь окажет один из ваших товарищей. Спицу нужно опустить вниз, чтобы она совсем не была видна через кювету, а затем постепенно поднимать спицу, сохраняя ее параллельной самой себе. Наблюдая за перемещающейся спицей, отметьте характерные изменения, происходящие с ее изображением (наблюдаемым — напомним это — из фиксированного положения и по фиксированному направлению), и сделайте ряд рисунков, показывающих развитие изгиба на изображении спицы.

Мы изготовили последовательные фотографии явления, которые приводим здесь, чтобы облегчить вам работу. Когда спица поднята совсем немного, сквозь расположенный в кювете внизу насыщенный раствор поваренной соли видно неискаженное изображение ее конца, а вблизи границы раздела жидкостей

наблюдаются два изображения конца спицы: нижнее — перевернутое и верхнее — прямое (рис. 1.13 а). Перевернутое изображение похоже получается за счет зеркального отражения света от границы раздела жидкостей. Если считать, что эта граница резкая (а это действительно так, если вы проводите наблюдения сразу после заливания жидкостей в кювету, когда диффузия еще не успела размазать границу), то появление перевернутого изображения можно объяснить полным внутренним отражением света от границы раздела жидкостей. В самом деле, свет, идущий от конца спицы, попадает на границу раздела снизу, то есть из оптически более плотной среды, и, если он падает под углами, превышающими предельный, полное внутреннее отражение должно иметь место.

Но за счет чего получается верхнее прямое изображение конца спицы? Мы ответим на этот вопрос чуть позднее, а пока продолжим наблюдения, поднимая спицу все выше. Оба изображения конца спицы растут по величине (рис. 1.13 б), что совершенно понятно: через оптически неоднородную среду проходит свет от более длинной части спицы. Наконец, эти изображения сливаются вместе, и на полном изображении спицы получается тот характерный изгиб, который наблюдался и раньше в опытах с бумажной полоской (рис. 1.13 в). Существенно, что изгиб образуется только в той области, где жидкость оптически неоднородна; вне ее спица выглядит совершенно прямой.

Если вы оставите установку без всяких изменений, например, на сутки, и затем повторите наблюдения, то окажется, что по прошествии времени изгиб изображения спицы уменьшился (рис. 1.14). Более того, спица теперь изогнута не в горизонтальном, а в вертикальном направлении! Ну, а такой изгиб вы уже умеете объяснять (§ 1.6).

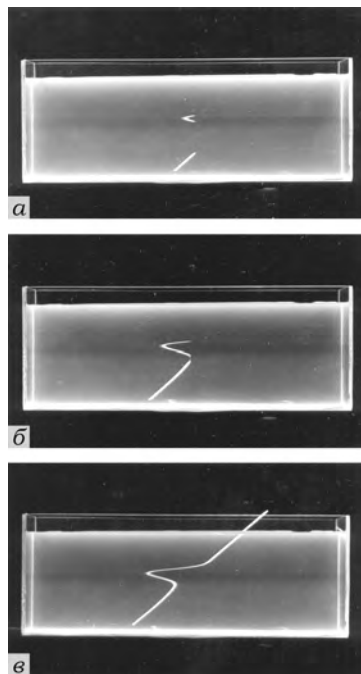


Рис. 1.13. За кюветой с оптически неоднородной жидкостью расположена спица, которую поступательно перемещают вверх

С течением времени граница раздела между жидкостями благодаря диффузии размазывается все больше, что приводит

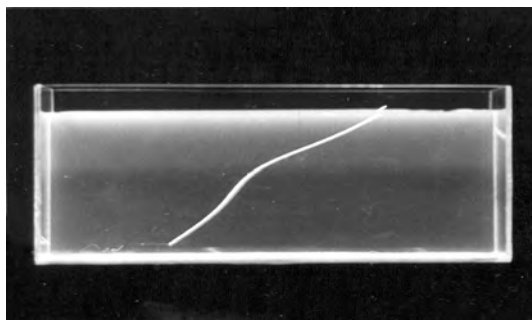


Рис. 1.14. То же, что и на рис. 1.13 *в*, но фотография сделана спустя сутки после образования в кювете оптически неоднородной жидкости

к уменьшению градиента показателя преломления в переходном слое. Этим, очевидно, объясняется уменьшение искривления прямой (спицы), которое обнаруживается через сутки после начала опыта. Значит — этот вывод вы не можете не сделать — по наблюдениям прямой через оптически неоднородную среду можно судить о величине (и направлении) градиента показателя преломления в среде.

- Оставим на время это интересное замечание и разберемся с тем сильным изгибом изображения спицы, который наблюдается, когда градиент показателя преломления значителен (рис. 1.13). Прежде всего отметим, что зрачок глаза имеет небольшой диаметр (порядка 4 мм), поэтому входящий в него световой пучок узок. Следовательно, для удобства этот узкий световой пучок можно заменить одним лучом, идущим в центр зрачка глаза. Теперь можно брать отдельные точки на спице и пытаться провести световые лучи от них так, чтобы пройдя через оптически неоднородную среду, они попали в центр зрачка глаза. Однако если вы попытаетесь сделать это, то быстро убедитесь, как непроста такая работа. Поэтому нужно отыскать прием, облегчающий ее.

Вспомните о *законе обратимости хода световых лучей*. Он утверждает, что если навстречу лучу, испытавшему ряд отражений и преломлений, пустить другой луч, то он пойдет по тому же пути, который прошел первый, но в обратном направлении. Не станет ли решение задачи более простым, если мы будем искать не ход лучей, идущих из точек предмета через оптически неод-

нородную среду в глаз, а наоборот: ход лучей, как бы выходящих из глаза и попадающих в точки предмета?

Итак, пусть из центра зрачка глаза выходит пучок расходящихся лучей. В какие точки линии AB попадут эти лучи, пройдя через кювету с оптически неоднородной жидкостью?

Луч, вышедший из глаза горизонтально, если он падает как раз на границу раздела жидкостей в кювете, отклонится вниз на самый большой угол, так как градиент показателя преломления вдоль оси y вблизи границы раздела жидкостей наибольший. Допустим, что этот луч пересекает линию AB в точке S . Тогда луч 1 , испущенный точкой S в обратном направлении, выйдет из кюветы горизонтально, попадет в глаз, и точка S будет восприниматься в положении S' (рис. 1.15).

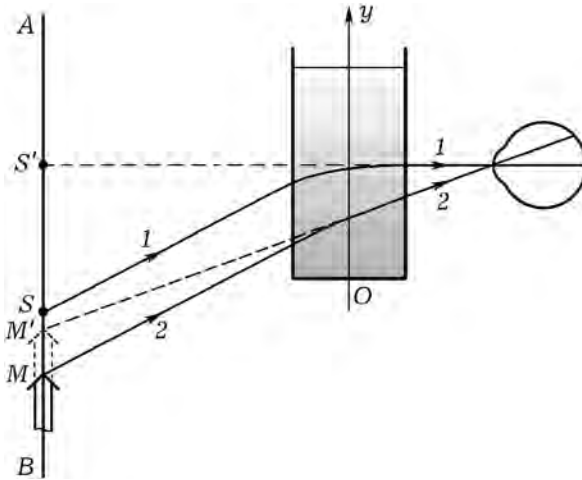


Рис. 1.15. К объяснению искажений предметов при наблюдении их через оптически неоднородную среду: почему кажется, что предмет находится выше истинного положения

Луч 2 , вышедший из глаза и идущий ниже луча 1 отклонится от своего первоначального направления на меньший угол, чем луч 1 , потому что он проходит существенно ниже границы раздела жидкостей, через ту область, где градиент показателя преломления жидкости меньше. Допустим, он попадает в точку M линии AB . Тогда согласно закону обратимости хода световых лучей точка M , испускающая луч в направлении 2 , будет видна в положении M' .

Представим теперь, что по линии AB вверх вдвигается спица до тех пор, пока верхний конец ее не окажется в положении M .

Глаз увидит спицу поднятой еще выше так, что ее конец будет казаться находящимся в точке M' .

Чем выше поднимается спица, тем выше будет находиться и ее изображение. Когда верхний конец спицы достигнет точки S , сразу наряду с поднятым изображением спицы возникнет второе изображение ее конца в точке S' .

Если спицу поднять еще выше (рис. 1.16), то тогда в ее конец M лучи из центра зрачка глаза могут прийти двумя путями: распространяясь выше и ниже границы раздела жидкостей. Верно и обратное: лучи, испущенные точкой M в направлениях 2 и 3 (а точка M испускает множество лучей во все стороны), попадут в глаз и, следовательно, они дадут два мнимых изображения M' и M'' одной и той же точки M .

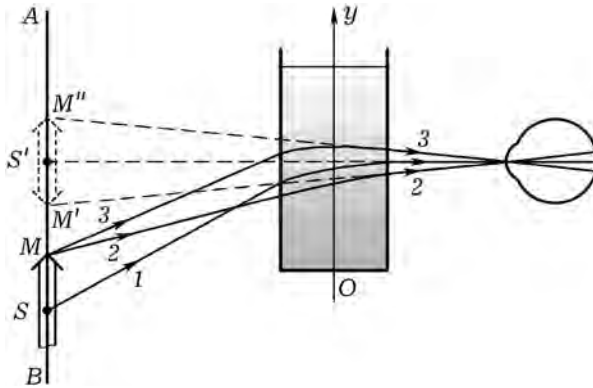


Рис. 1.16. К объяснению искажений предметов при наблюдении их через оптически неоднородную среду: почему видно прямое и перевернутое изображения

Поскольку точка S изображается в S' , то отрезку спицы SM соответствует перевернутое изображение $S'M'$, образованное лучами, идущими ниже границы раздела жидкостей, и прямое изображение $S'M''$, образованное лучами, распространяющимися выше границы раздела.

Итак, мы полностью объяснили казавшееся поначалу загадочным искривление прямой при наблюдении ее через оптически неоднородную среду. Мы поняли также, почему не наблюдается искривление, если прямая перпендикулярна или параллельна границе раздела сред с различной оптической плотностью: в первом случае изображение прямой деформировано в направлении самой прямой, а поскольку все точки прямой одинаковы, эта деформация не обнаруживается; во втором случае изображение прямой просто смещается, оставаясь параллельным самой

прямой. Попутно мы узнали, что величина и характер искривления прямой полностью определяются градиентом показателя преломления среды. Нельзя ли все это как-то использовать на практике?

Для самостоятельной проработки

1. Миннарт М. Свет и цвет в природе. — М.: Наука, 1969. — 360 с. (С. 60–92).

В этой книге описаны многие интересные оптические явления. Почитайте главу об искривленных световых лучах в атмосфере. Попробуйте сопоставить явление миража с тем искривлением прямой, которое мы только что объяснили.

2. Распространение света в неравномерно нагретой жидкости.

В прозрачный пластиковый сосуд высотой не менее 20 см введите вертикальную перегородку, делящую его пополам. Перегородку покрасьте в матовый черный цвет; щели между ней и стенками сосуда промажьте герметиком. В одну половину сосуда налейте холодную воду и смотрите через воду на светлое дно сосуда вдоль перегородки. Теперь залейте во вторую половину сосуда только что вскипевшую воду. Вы увидите, что черная перегородка блестит, как зеркало! Исследуйте это явление. Разработайте более простую и доступную экспериментальную установку для наблюдения описанного явления.

3. Границы применимости геометрической оптики. В этой книге почти на каждой странице используется понятие светового луча. При каких условиях допустимо применение этого понятия? Иными словами, каковы границы применимости геометрической оптики? Представим, что свет от источника проходит через отверстие, прорезанное в непрозрачном экране. Будем уменьшать размер этого отверстия, при этом будет уменьшаться и ширина светового пучка. Область, в которой это имеет место, очевидно относится к геометрической оптике.

Пучок света от полупроводникового лазера направьте на белый экран, отстоящий от лазера на расстояние около метра. Перекройте пучок раздвижной щелью на диске, которая входит в комплект к школьному проекционному аппарату, установив максимальную ширину щели. При этом пятно лазерного излучения на экране ограничится шириной щели. Теперь медленно уменьшайте ширину щели, при этом пятно на экране также будет уменьшаться. Значит, вы находитесь в области применимости геометрической оптики. Однако при дальнейшем уменьшении щели вы обнаружите, что пятно на экране не только не уменьшается, но, напротив, увеличивается в направлении, перпендикулярном краям щели. Теперь уже экран вышел за пределы геометрической оптики, здесь нельзя безоговорочно пользоваться понятием луча, а необходимо применять законы волновой оптики. Область геометрической оптики приблизилась к щели, и в этом вы без труда убедитесь, придвинув к ней экран. Тщательно наблюдайте явление, продумайте условия и результаты проделанного эксперимента и сделайте обоснованные выводы из выполненного исследования.

Глава 2

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОМ ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Оптически неоднородное твердое тело, как и оптически неоднородную жидкость, можно получить методом диффузии. Однако это довольно сложный процесс, и мы воспользуемся им позже. Проще из оптически однородного твердого тела создать оптически неоднородное путем его неравномерного нагрева. Остается лишь выбрать дешевое и доступное прозрачное вещество, позволяющее сделать это. Из окружающих нас прозрачных твердых веществ наиболее доступно для приобретения и обработки оргстекло. Кроме того, его показатель преломления довольно сильно зависит от температуры. Поэтому выбор оргстекла в качестве объекта для получения оптически неоднородной среды представляется вполне естественным. В этой главе мы исследуем зависимость показателя преломления оргстекла от температуры и рассмотрим распространение света в неравномерно нагретом оргстекле. Выполнив предложенные исследования, вы узнаете, как искажаются изображения предметов при наблюдениях через оптически неоднородное оргстекло, почему неравномерно нагретое прозрачное оргстекло отбрасывает черную тень и многое другое, представляющее несомненный интерес для всех, занимающихся градиентной оптикой. Кроме того, вы научитесь обрабатывать оргстекло, изготавливать из оргстекла призмы и познакомитесь с разными видами нагревателей для опытов по криволинейному распространению света.

2.1. Загадка нагретого оргстекла

- В обычном куске оргстекла скрываются тайны, о которых вы вряд ли догадываетесь. Тут не нужно много говорить об этом: ищите оргстекло, и мы сразу приступим к делу.

Подойдет любой брусок оргстекла, две противоположные грани которого прозрачны и параллельны между собой. Лучше, если толщина бруска (расстояние между прозрачными гранями) составит 30–40 мм, но пригодно и гораздо менее тонкое оргстекло.

На листе белой бумаги *1* начертите отрезок прямой линии *AB* (рис.2.1). Расположите брусок *2* на расстоянии 5–20 см от листа так, чтобы его прозрачные грани были параллельны листу и один из торцов *3* бруска пересекал начерченную линию под произвольным углом. Посмотрите сквозь прозрачные грани бруска на прямую линию.

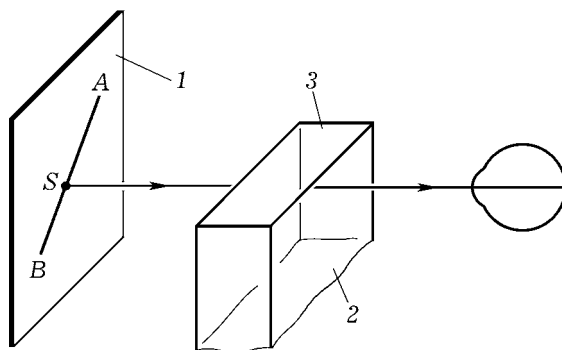


Рис. 2.1. Схема наблюдения отрезка прямой линии *AB* через брусок неравномерно нагретого оргстекла

Вы увидите прямую, как прямую. Правда, может случиться, что вблизи торца бруска она окажется изломанной: это будет в том случае, если прозрачные грани бруска не совсем параллельны листу, и объясняется преломлением световых лучей, идущих от точек линии через плоскопараллельный брусок оргстекла в глаз. Устранить излом прямой, о котором идет речь, можно, слегка поворачивая брусок и добиваясь при этом параллельности между ним и листом бумаги. Когда это будет достигнуто, линия станет выглядеть совершенно прямой (рис. 2.2 *a*).

Теперь включите электроплитку (или иной подходящий нагревательный прибор) и, когда спираль ее раскалится, подержите над ней брусок так, чтобы прогрелся один из его торцов, например торец *3* (рис. 2.1). Слишком сильно нагревать оргстекло не следует: плохо, если оно уже начнет размягчаться. Достаточно такой температуры торца, при которой он ощущается горячим. Прогрев оргстекло в течение нескольких минут, удалите его от электроплитки и вновь посмотрите на прямую линию так, чтобы луч зрения проходил сквозь брусок вблизи его нагретого торца *3*. Прямую линию вы увидите вверху изогнутой (рис. 2.2 *б*)! По мере охлаждения бруска эта изогнутая линия будет постепенно распрямляться (рис. 2.2 *в*).

Одного наблюдения мало, чтобы в деталях уловить суть явления. Поэтому повторяйте опыт, несколько изменяя его условия, до тех пор, пока не почувствуете, что заметили все, что в нем происходит. Вы должны убедиться, что при наблюдениях сквозь неравномерно нагретое оргстекло прямая линия воспринимается изогнутой во всех случаях, если только она не перпендикулярна и не параллельна нагретому торцу бруска.

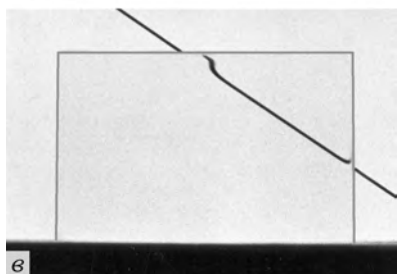
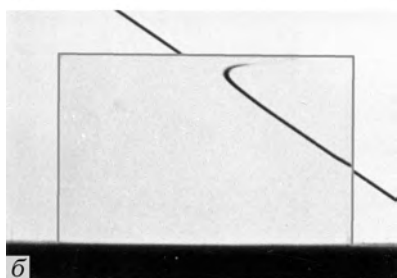
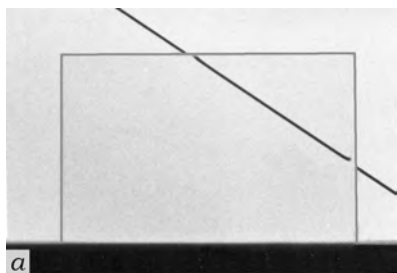


Рис. 2.2. Так выглядит отрезок прямой линии при наблюдении его через брусок неравномерно нагретого оргстекла: *а* — брусок находится при комнатной температуре; *б* — верхний торец бруска нагрет; *в* — нагретое оргстекло охлаждается

Чем же объясняется этот результат? Почему нагревание оргстекла приводит к такому изменению наблюдаемой сквозь него прямой?

- Можно высказать два предположения. Первое заключается в том, что за счет расширения оргстекла при нагревании плоские прозрачные грани бруска слегка деформируются и преломляют свет так, что прямая, наблюдаемая через них, выглядит изогнутой. Второе предположение не столь очевидно, но более интересно. Вам, безусловно, случалось в жаркий летний день смотреть вдоль асфальтового покрытия дороги. Иногда при таких наблюдениях на совершенно сухой дороге видны «лужи» — блестящие участки асфальта, в которых отражаются небо, проезжающие автомобили или прохожие. Вы, конечно, знаете, в чем тут дело:

воздух вблизи асфальта прогреет сильнее, чем на некоторой высоте от него, поэтому в прилегающем к асфальту слое воздуха определенной толщины показатель преломления непрерывно увеличивается в вертикальном направлении. В такой неравномерно нагретой и, следовательно, оптически неоднородной воздушной

среде свет распространяется криволинейно. Именно этим объясняются «лужи» на сухом асфальте — это ни что иное, как маленький мираж.

Правомерен вопрос: не происходит ли нечто похожее в неравномерно нагретом бруске оргстекла?

Сравните результат опыта с тем, что вы наблюдали, помещая бумажную полоску за оптически неоднородной жидкостью (см. § 1.6). Для этого фотографию, представленную на рис. 1.11 в, мысленно перекройте сверху до границы раздела жидкостей. Не правда ли, искривленная полоска очень похожа на искривленную прямую, которая наблюдается сквозь неравномерно нагретое оргстекло!

Сопоставляя результаты указанных опытов, вы можете сделать предварительный вывод, что при неравномерном нагревании оргстекло действительно становится оптически неоднородным, и показатель преломления оргстекла с ростом температуры, скорее всего, уменьшается. Подобные рассуждения по аналогии очень полезны в физике, если, конечно, не забывать, что они ничего не доказывают.

Выбрать из двух высказанных предположений правильное вы сможете только тогда, когда подробнее исследуете рассмотренное здесь явление.

Для самостоятельной проработки

1. Фен как источник тепла. Попробуйте в качестве нагревателя в опытах с оргстеклом использовать бытовой фен для сушки волос. Выясните, каково оптимальное расстояние от поверхности оргстекла до сопла фена, при котором оргстекло нагрето до температуры порядка 90 °С.

2. Распространение света в неравномерно нагретой воде. В плоскопараллельную кювету из стекла или оргстекла длиной около 100 мм налейте воду. Вблизи поверхности воды параллельно ей пустите узкий пучок света из полупроводникового лазера так, чтобы он попал на белый экран, отстоящий от кюветы на расстояние не менее метра. На экране пометьте место падения лазерного пучка. Над водой на расстоянии 10–20 мм расположите настольную лампу накаливания мощностью 100–150 Вт, развернув ее абажур так, чтобы свет от лампы не попадал на экран (рис. 2.3). Включив лампу, вы увидите, как прямо на глазах световое пятно начинает ползти вниз по экрану. Опыт может не получиться только в том случае, если расстояние между поверхностью воды и лазерным пучком слишком велико. Подробно исследуйте описанное явление, не забывая при этом о технике безопасности.

3. Перельман Я. И. Занимательная физика. Книга 1. — М.: Триада-Литера, 1994. — 224 с. (С. 161–165).

Здесь вы получите первоначальные сведения о миражах и их наблюдениях в экзотических и обычных условиях.



Рис. 2.3. Возможный вариант экспериментальной установки для исследования распространения света в неравномерно нагретой жидкости: 1 — полупроводниковый лазер, 2 — кювета с водой, 3 — лампа накаливания

2.2. Оптическая неоднородность и исчезающий предмет

● Есть любопытный опыт, который вы без особого труда сможете поставить в школьном физическом кабинете. Схема опыта (вид сверху) изображена на рис. 2.4.

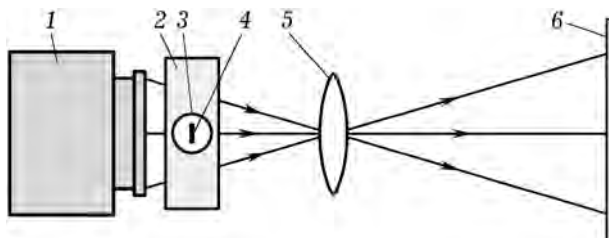


Рис. 2.4. Оптическая схема демонстрационного варианта опыта с исчезающим предметом

Вплотную к конденсору проекционного аппарата 1 поместите плоскопараллельную прозрачную кювету 2 из стекла или оргстекла. Внутри кюветы разместите стеклянную пробирку 3, а

в нее опустите какой-нибудь небольшой непрозрачный предмет 4 (например, изогнутого из проволоки «человечка»). С помощью объектива 5 получите резкое изображение предмета на белом экране 6.

Налейте в кювету воду. Изображение предмета на экране сразу исчезнет, хотя вода вполне прозрачна: будет видна только темная пробирка с узкой светлой полоской по ее оси. Постепенно наливайте воду в пробирку: вы будете наблюдать, как на экране появляется отчетливое изображение предмета! Опыт можно повторять многократно, если опустить в пробирку тонкую стеклянную трубку, и резиновой грушей через трубку опорожнять и заполнять пробирку водой.

Объяснение результата опыта очевидно: когда в кювете находится вода, а в пробирке воздух, среда в кювете является оптически неоднородной; световые лучи преломляются на неоднородности среды (рис. 2.5) и не могут дать изображения предмета на экране. При заполнении пробирки водой среда становится почти оптически однородной (преломлением на тонкостенной пробирке в условиях этого опыта можно пренебречь), свет в ней распространяется прямолинейно, и изображение предмета, находящегося в такой среде, может быть получено. Разумеется, расположенная в воде пробирка с воздухом представляет собой очень грубую неоднородность. Тем не менее описанный опыт позволяет уяснить суть дела. Не познакомить вас с ним я не мог еще и по той причине, что опыт очень эффектен и, поставив его, вы можете озадачить своих школьных товарищей.

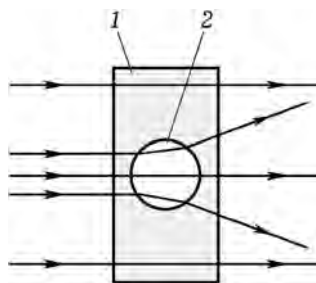


Рис. 2.5. Ход лучей через кювету 1 с водой, внутри которой находится пустая пробирка 2

• Более простой вариант рассмотренного опыта может быть осуществлен, если отказаться от получения изображения предмета на экране и ограничиться получением тени от предмета. Схематически эксперимент показан на рис. 2.6 (1 — лампочка карманного фонаря в качестве точечного источника света, 2 — плоскопараллельная кювета с прозрачными стенками, 3 — пробирка, подвешенная к стенке кюветы изогнутым из жести держателем 4, 5 — непрозрачный предмет, расположенный в пробирке, 6 — экран для наблюдений). Вы, безусловно, сможете не только самостоятельно разобраться в этом опыте, но и подобрать

оптимальные условия его постановки. В этом вам помогут фотографии теневых изображений, представленные на рис. 2.7.

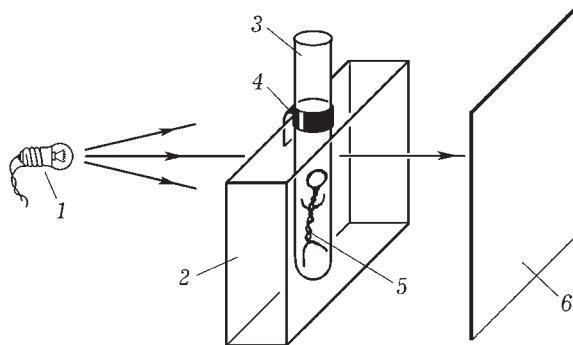


Рис. 2.6. Оптическая схема теневой проекции предмета, находящегося в среде с грубой оптической неоднородностью

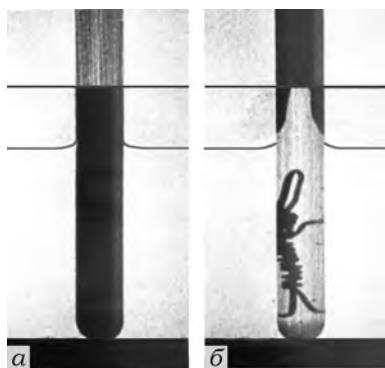


Рис. 2.7. Исчезающий предмет: *а* — в кювете находится вода, в пробирке — воздух; *б* — вода налита не только в кювету, но и в пробирку (часть пробирки между поверхностью воды и краем кюветы выглядит прозрачной потому, что за счет капиллярности вода поднялась по промежуткам между пробиркой и касающимися ее параллельными стенками кюветы)

мерным: на экране появится теневое изображение оптической неоднородности. Оно может быть либо светлым на темном фоне, либо темным на светлом фоне — в зависимости от характера неоднородности и конкретных условий эксперимента.

В сущности, предложенные здесь довольно грубые эксперименты нужны лишь для того, чтобы вы могли на практике убедиться в возможностях простейшего теневого метода наблюдения оптических неоднородностей в средах. О физической сути этого метода вы уже догадались: нужно в расходящемся (параллельном или сходящемся — в зависимости от конкретной задачи) световом пучке расположить прозрачный объект, а за ним разместить белый экран. Если объект оптически однороден (и имеет одинаковую толщину), то экран будет освещен равномерно. При наличии в объекте оптической неоднородности свет будет преломляться на ней, и освещение экрана станет неравно-

Этот простой метод интересен в первую очередь тем, что при умелом использовании дает совсем неплохие результаты. О чувствительности его можно судить по такому примеру: простейший теневой метод позволяет сделать видимыми на экране потоки нагретого воздуха, оптическая плотность которого крайне незначительно отличается от оптической плотности окружающего воздуха, имеющего комнатную температуру.

Для самостоятельной проработки

1. Лекционные демонстрации по физике / Под ред. *В. И. Ивероной*. — М.: Наука, 1972. — 639 с. (С. 527–528).

В книге кратко описаны демонстрационные опыты, аналогичные разобранным выше.

2. Оптическая неоднородность неправильной формы. Недостатком рассмотренных в этом параграфе опытов является то, что используемая в них неоднородность имеет правильную форму. Более впечатляют опыты с оптической неоднородностью, форма которой неправильна. Пластинку из оргстекла толщиной 1–2 мм разогрейте над электроплиткой до размягчения и затем деревянными брусочками, как пуансоном и матрицей, выдавите в ней вмятины так, чтобы пластинка оказалась причудливо деформированной. После остывания пластинки разделите ее плоскопараллельную кювету пополам. В одну половину кюветы поместите какой-нибудь непрозрачный предмет и получите его изображение на экране. Затем наливайте воду сначала в первую, а потом и во вторую половины кюветы, наблюдая за результатом эксперимента на экране.

3. Хвольсон О. Д. Курс физики. Том 2. — Берлин: Госиздат, 1925. — 775 с. (С. 293–295).

Дано краткое описание простейшего теневого метода, изображены оптические схемы нескольких экспериментальных установок, приведены примеры визуализации невидимых непосредственно глазом оптических неоднородностей (потоки нагретого воздуха, газовые струи, звуковые волны, диффузия в жидкости возле растущего кристалла, обтекание воздухом летящего снаряда и т. д.).

4. Васильев А. А. Теневые методы. — М.: Наука, 1968. — 400 с. (С. 12–30).

По этой книге вы можете познакомиться с многообразными применениями высокочувствительных теневых методов в научных исследованиях.

2.3. Тень от неравномерно нагретого оргстекла

- Неравномерно нагретое оргстекло вполне прозрачно, но оптически неоднородно: показатель преломления его непрерывно изменяется от точки к точке. Сумеете ли вы заметить эту опти-

ческую неоднородность, если попытаете получить от оргстекла тень?

На первый взгляд, казалось бы, нет. В самом деле, тень — это область за непрозрачным предметом, в которую свет от источника не проникает. Но оптическая неоднородность в прозрачном предмете тоже прозрачна и, следовательно, не задерживает световые лучи. Значит, она не может дать и тени.

Рассуждение вроде бы выглядит логичным, но признать его верным — значит слишком поторопиться. Лучше не спеша поставить опыты и посмотреть, что получается на самом деле.

● В качестве нагревателя можно использовать проволочный резистор типа ПЭВ-25 сопротивлением 1500–3000 Ом и мощностью 25 Вт. К выводам резистора припаяйте шнур с вилкой. Места спая тщательно изолируйте хлорвиниловыми трубками. Резистор указанных параметров можно включать непосредственно в электроосветительную сеть напряжением 220 В. Но работать с ним нужно осторожно, строго выполняя требования техники безопасности. Если раньше вы никогда не работали с сетевым напряжением, лучше взять резистор с меньшим сопротивлением (например, 510–300 Ом) и подключить его к источнику регулируемого напряжения (в школьном кабинете физики имеются автотрансформатор типа РНШ и блок питания типа В-24, которые вполне пригодны для ваших опытов). Постепенно повышая напряжение, вы будете увеличивать температуру резистора.

Нагревать резистор до температуры, превышающей 100 °С, не нужно, поскольку это приведет к размягчению оргстекла,

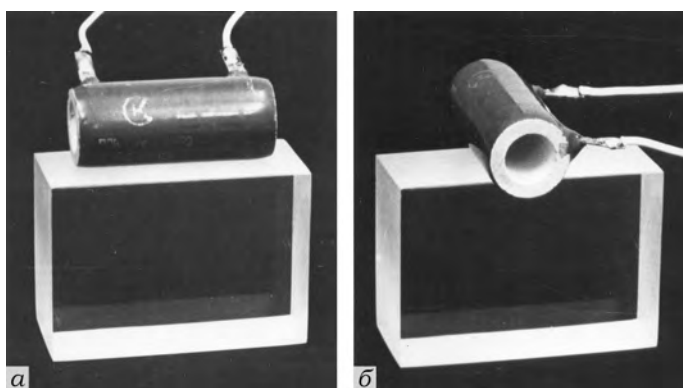


Рис. 2.8. Брусек из оргстекла с расположенным на нем нагревателем, в качестве которого использован мощный резистор: *а* — прогревается широкая область оргстекла, *б* — узкая

которого будет касаться резистор. Оценить температуру резистора вы можете несколько варварским, но зато простым и надежным «методом пальца и слюны»: прикоснитесь на мгновение к остеклованному корпусу резистора влажным пальцем, и вы сразу почувствуете, превысили вы допустимый предел температуры или нет. К слову сказать, рекомендованный метод оценки температуры нарушает правила техники безопасности в той же мере, в какой их нарушают все, пользующиеся электроутюгом — прибором вряд ли менее опасным, чем наш нагреватель.

Подберите брусок оргстекла толщиной 10–30 мм. Две противоположные грани его должны быть прозрачными, плоскими и параллельными между собой. На верхний торец бруска положите резистор (рис. 2.8).

На расстоянии примерно 1 м от бруска с резистором разместите лампочку карманного фонаря, а за бруском на расстоянии около 20 см от него поставьте белый экран — лист плотной белой бумаги.

На экране вы будете наблюдать тень от бруска и резистора (рис. 2.9*а*). Подайте на резистор напряжение, оптимальную величину которого вы определили предварительно. Спустя несколько секунд вы заметите, как тень на экране начинает изменяться: вблизи резистора на изображении бруска возникает темная область, окаймленная светлой полоской (не получившейся, к сожалению, на фотографии, при-

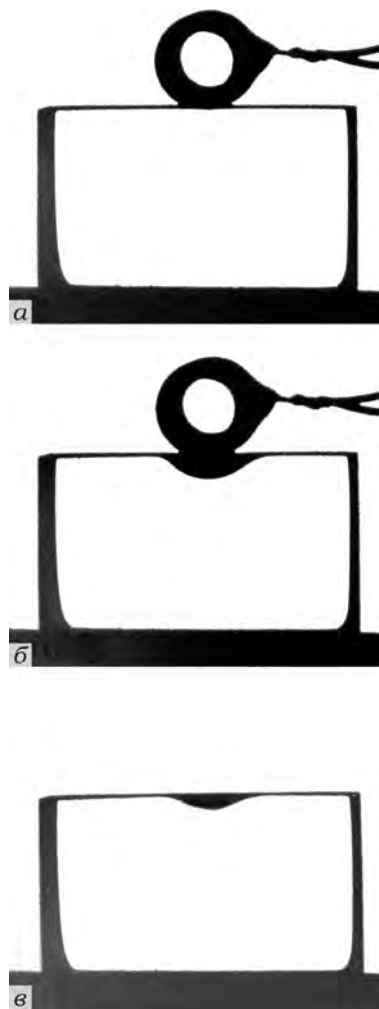


Рис. 2.9. Теневая картина от неравномерно нагретого оргстекла: *а* — оргстекло при комнатной температуре; *б* — резистор нагрет (светлая полоска, окаймляющая область тени от оптической неоднородности, на фотографии не получилась); *в* — резистор убран с поверхности бруска, и оргстекло охлаждается

веденной на рис. 2.9б), которая постепенно растет. Если, выключив напряжение, нагретый резистор за проводники снять с бруска, то тень от оптической неоднородности по мере охлаждения оргстекла будет уменьшаться, пока не исчезнет совсем (рис. 2.9в).

Не спешите при постановке опыта. Повторите его несколько раз, чтобы не упустить ничего существенного. Явление настолько интересно и неожиданно, что каждый, увидевший его впервые, испытывает чувство изумления. Вы можете воспользоваться этим, скрыв от ваших товарищей резистор и показав им опыт в качестве физического фокуса. Вряд ли секрет его будет сразу разгадан.

Объяснение результата опыта не представляет особых трудностей (§ 2.2), и вы вполне способны дать его самостоятельно. Важно не упустить следующее. Когда свет распространяется в оптически неоднородной среде, он всегда изгибается в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления (§ 1.4). Прделанный опыт показывает, что свет отклоняется в сторону от нагретого к холодному оргстеклу: на экране вокруг тени от области нагретого оргстекла расположена светлая полоска отклоненных этой областью лучей. Поэтому опыт свидетельствует, в частности, и о том, что при нагревании показатель преломления оргстекла уменьшается.

Для самостоятельной проработки

1. Причина возникновения тени от неравномерно нагретого оргстекла. Некоторые из вас могут подумать, что в описанном выше опыте существенно не столько уменьшение показателя преломления оргстекла при нагревании, сколько расширение оргстекла. Докажите, что это не так. Возможно, в этом вам помогут наблюдения теней от собирающей и рассеивающей линз.

2. Бастанов В. Г. 300 практических советов. — М.: Московский рабочий, 1989. — 366 с. (С. 44–46).

Пользуясь рекомендованной книгой, вы сумеете произвести элементарный расчет и в соответствии с ним изготовить трансформатор мощностью 80–100 Вт, понижающий сетевое напряжение 220 В до 36 В. Напряжение 36 В гораздо менее опасно, чем 220 В, и с ним вы можете работать более уверенно. Все без исключения нагреватели, используемые в опытах по криволинейному распространению света, можно переделать под напряжение 36 В (проверено!). В дальнейшем, однако, нередко будем говорить об использовании в опытах сетевого напряжения. Дело в том, что бывает очень неловко, когда выпускник средней школы не умеет обращаться с напряжением 220 В, на которое рассчитаны бытовые электроприборы.

3. Еще один источник тепла для домашних опытов. Если вы работаете дома, то, наверное, имеет смысл отказаться от электрического нагревателя и сделать что-нибудь другое. Попробуйте, например, поставить на торец бруска из оргстекла тонкостенную алюминиевую баночку с плоским дном и налить в нее кипяток. Не правда ли, опыт становится не только безопасным, но и изящным! Мораль прозрачна: знакомясь с новым экспериментом, старайтесь придумывать более простые, доступные и безопасные его варианты.

2.4. Самодельная призма из оргстекла

● Для некоторых оптических опытов требуется треугольная призма из стекла или оргстекла. Можно найти готовую призму, но нетрудно изготовить ее и самостоятельно. Это тем более имеет смысл, если вам еще не приходилось заниматься шлифовкой и полировкой: вы научитесь простейшим приемам работы и попутно проникнетесь тем почтительным уважением к труду других, которое дается только после осознания собственных усилий.

Чтобы изготовить призму, подберите кусок оргстекла толщиной 25–40 мм и на противоположных поверхностях его друг против друга остро отточенной чертилкой нацарапайте треугольники необходимого размера. Зажмите оргстекло в тисках и ножовкой по металлу выпилите призму, следя за тем, чтобы ножовочное полотно проходило по намеченным линиям треугольников. Работа значительно облегчится, если время от времени в пропилах вы будете вводить небольшие порции машинного масла.

Три рабочие грани призмы последовательно опилите сначала грубым, а потом мелким напильниками, стараясь сделать эти грани плоскими и выдержать между ними необходимые углы. Избегайте завалов по краям граней. Прямые углы призмы контролируйте угольником.

На поверхность стола положите ровный лист грубой шкурки размером примерно 30 × 30 см (чем больше площадь листа, тем легче вести обработку) и, не очень сильно прижимая призму к шкурке, равномерными круговыми движениями отшлифуйте ее грани. Обработку на грубой шкурке можно считать законченной, если с граней исчезнут царапины от напильника. После этого замените грубую шкурку более мелкой и шлифуйте поверхности призмы до тех пор, пока не исчезнут царапины от грубой шкурки. Так последовательно дойдите до самой мелкой шкурки (желательно, «нулевки»), которая имеется в вашем распоряжении.

Практика показывает, что лучшие результаты получаются, если шлифовку производить на стекле толщиной 4–6 мм. На по-

верхность стекла равномерно насыпьте тонкий слой абразивного порошка (если вы не сможете достать абразивный порошок, его можно получить, например, отмочив шкурку в сосуде с водой). Нанесите на слой абразива несколько капель воды и, двигая по увлажненному абразиву призму, отшлифуйте ее грани. Закончив грубую шлифовку, осуществите тонкую, для чего очистите поверхность стекла от отработанного абразива и нанесите на нее более мелкий абразив. Нужно помнить, что отработанный абразивный порошок нельзя смывать в канализационную систему. О качестве произведенной шлифовки можно судить только после полировки. Впрочем, опыт приобретается довольно быстро, и вскоре вы сможете по внешнему виду поверхности уверенно определять, достаточна ее шлифовка или нет.

Изготовьте полировальник. Для этого на лист фанеры или доски толщиной 15–20 мм и площадью 30 × 30 см туго натяните два–три слоя прочной ткани, прибывая ее по торцу листа гвоздями. Смочите ткань керосином и по ее поверхности разотрите *полировальную пасту* ГОИ (продается в магазинах медицинского оборудования и представляет собой похожие на затвердевший пластилин бруски зеленого цвета). Следует остерегаться избытка пасты: вполне достаточно бруском пасты ГОИ «нарисовать» на смоченной керосином ткани сетку со стороной квадрата 15–30 мм.

На полировальник наложите призму одной из отшлифованных граней и отполируйте ее, делая призмой без особого нажима на нее более или менее равномерные круговые движения (рис. 2.10). По мере срабатывания на полировальник нужно



Рис. 2.10. Полировка призмы из оргстекла

наносить новые порции пасты. Ткань полировальника должна быть натянута настолько сильно, чтобы при полировке на ней не образовывались складки.

Обычная ошибка начинающих заключается в том, что они слишком торопятся. Им как-то не верится, что в итоге действительно получится «настоящая» призма с совершенно прозрачными гранями. Нужно верить в это, спокойно делая свое дело, и тогда все выйдет наилучшим образом.

Отполированную призму тщательно вымойте в теплой мыльной воде (остатки полировальной пасты лучше предварительно удалить чистой тряпочкой, смоченной в керосине), ополосните под краном холодной водой и насухо вытрите. Осмотрите призму. Если вы заметите на ее гранях небольшие царапинки от мелкой шкурки, то вновь повторите полировку. Если остались крупные царапины от грубой шкурки, то придется сначала повторить шлифовку мелкой шкуркой, а затем — полировку.

На рис. 2.11 представлена фотография самодельных призм из оргстекла, по которой вы можете судить о том, что примерно должно у вас получиться.

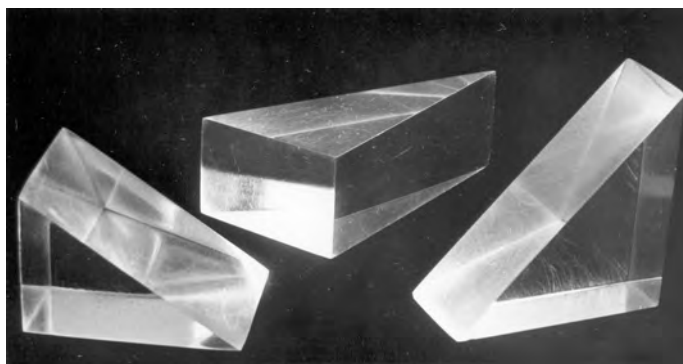


Рис. 2.11. Самодельные призмы из оргстекла

Как бы аккуратны вы ни были при изготовлении призмы, все равно ее грани получатся слегка выпуклыми. Этот недостаток самодельной призмы не так существен в наших опытах и может даже обернуться достоинством в некоторых из них.

- Вы научились обрабатывать оргстекло — материал, хотя и прозрачный, но слишком мягкий. Во многих оптических экспериментах вместо оргстекла предпочтительнее стекло. Отполировать стекло можно, однако процесс этот трудоемок и длителен. Но вот умение вырезать из стекла толщиной от 1 до 7 мм

пластинки и обрабатывать их края отнюдь не помешает в жизни. Научитесь этому. Для этого нужно использовать стеклорез, лучше не алмазный, а твердосплавной и легкий молоточек для постукивания по стеклу со стороны, противоположной надрезу. Отшлифовать края получившейся пластинки можно на стекле абразивным порошком, смоченным водой. Процесс требует больше времени, чем шлифовка оргстекла, но вполне доступен и не столь уж трудоемок. Он полезен хотя бы потому, что во время шлифовки хорошо думается о предстоящих экспериментах.

Более качественную призму из оргстекла можно сделать, воспользовавшись фрезерным станком. Обработку оргстекла на станке следует производить медленно, чтобы не перегреть оргстекло. Неплохой результат дает смазывание обрабатываемой поверхности машинным маслом. Чтобы при шлифовке и полировке не допустить завалов по краям преломляющих поверхностей,



Рис. 2.12. Способ предотвращения завалов по краям преломляющих поверхностей призмы

к боковым граням призмы струбциной нужно прижать пластинки оргстекла толщиной около 4 мм (рис. 2.12). В этом случае завалы получатся на краях прижатых пластинок, а преломляющие поверхности окажутся плоскими с точностью, вполне достаточной для рассмотренных в книге учебных исследований.

Для самостоятельной проработки

1. Навашин М. С. Телескоп астронома-любителя. — М.: Наука, 1979. — 440 с. (С. 90–144).

В этой книге подробно изложены методы шлифовки и полировки стекла. Стекло отполировать гораздо сложнее, чем оргстекло. Поэтому,

владея методами полировки стекла (либо представляя их себе чисто умозрительно), вы успешнее сможете отполировать оргстекло. В книге, помимо прочего, приведены сведения об абразивных порошках и приемах работы с ними. Знакомство с рекомендованной книгой полезно во всех отношениях — это увлекательный рассказ о том, как с помощью самых простых средств настойчивый человек может построить один из самых совершенных оптических приборов. Книга учит целеустремленности и мужеству, хотя на первый взгляд речь в ней идет о совсем других вещах.

2.5. Преломление призмой при разных температурах

• Зависимость показателя преломления оргстекла от температуры можно установить, поставив описанный ниже опыт.

Представьте себе сделанную из оргстекла треугольную призму (рис. 2.13). Световой пучок *1*, падающий на одну из ее боковых граней, отклоняется по выходе из призмы от ее вершины к основанию.

Если показатель преломления материала призмы в силу каких-то причин увеличится, то изменятся углы преломления света на обеих гранях призмы, и выходящий из нее пучок *2* отклонится к основанию на больший угол. При уменьшении показателя преломления призмы уменьшится и угол отклонения пучка от первоначального направления так, что свет будет распространяться в некотором направлении *3*. Таким образом, угол отклонения светового пучка от первоначального направления однозначно связан с показателем преломления материала призмы.

Нетрудно получить формулу, аналитически выражающую эту связь. Следовательно, измеряя в эксперименте углы отклонения света при разных значениях температуры призмы из оргстекла, можно установить зависимость показателя преломления оргстекла от температуры.

В точных опытах призму необходимо прогревать равномерно так, чтобы во всех ее точках показатель преломления был одним и тем же. Равномерный нагрев призмы вам почти недоступен — это очень непросто, равномерно прогреть какое-то тело. Тем не

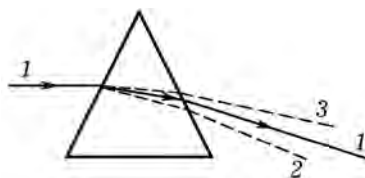


Рис. 2.13. Ход узкого светового пучка через призму: призма отклоняет падающий на нее пучок *1* к своему основанию; при увеличении показателя преломления выходящий из призмы пучок идет по некоторому направлению *2*, при уменьшении — по направлению *3*

менее, опыт можно поставить, если не стремиться к получению количественных результатов. Качественно эффект будет достаточно хорошо выражен, если призму прогреть равномерно только в одной плоскости. Опыт, о котором сейчас пойдет речь, удобнее ставить в школьном кабинете физики.

- На оптической скамье проекционного аппарата *1* (рис. 2.14; вид сверху), возле конденсора которого установлен тепловой

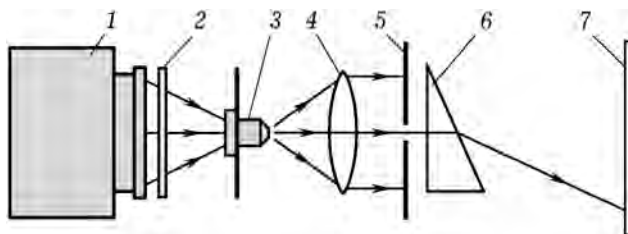


Рис. 2.14. Оптическая схема опыта по исследованию зависимости показателя преломления оргстекла от температуры

фильтр *2*, расположите непрозрачный экран, в круглое отверстие которого вставлен $40\times$ объектив *3* от старого микроскопа, и добейтесь, чтобы выходящий из конденсора проекционного аппарата световой пучок сходился на отверстии объектива. Объектив микроскопа дает сильно уменьшенное изображение проекционной лампы, которое в опытах будет являться точечным источником света. Применение объектива микроскопа обусловлено тем, что он простым способом (не нужно ничего делать!) позволяет получить яркий точечный источник. В принципе вы можете использовать просто небольшое отверстие, но тогда усложнится настройка установки и опыты придется проводить в полной темноте. Объектив микроскопа можно заменить стеклянным шариком диаметром 2–4 мм, полученным оплавлением в пламени спиртовки конца стеклянной нити, вытянутой предварительно из легкоплавкой трубки.

На той же оптической скамье расположите (закрепив в рейтере) объектив *4* с фокусным расстоянием примерно 10 см так, чтобы он давал близкий к параллельному световой пучок. За объективом разместите раздвижную щель на диске *5*, поверните ее вертикально и установите ширину щели 1–2 мм. За щелью поместите призму *6* с преломляющим углом 30° , изготовленную из оргстекла, как описано выше (§ 2.4; призма не должна иметь завалов по краям преломляющих граней). Отклоненный призмой световой пучок поймите на белый экран *7*. Если экран распо-

ложен недалеко от призмы (на расстоянии не более полуметра), то на нем вы увидите узкую светлую полоску, по краям слегка окрашенную.

Собрав экспериментальную установку, приступайте к опыту. Призму ее нижней поверхностью поместите на какой-нибудь плоский нагреватель. Можно использовать утюг или электроплитку, если на их поверхности положить асбестовые прокладки и включать эти приборы в сеть через понижающий автотрансформатор или на небольшое время.

Разверните призму так, чтобы на экране получился четкий след вышедшего из нее светового пучка (рис. 2.15 а; представьте себе, что перед этим рисунком находится призма, ориентированная таким образом, что основание ее расположено справа, а нагреваемая поверхность снизу). Включив нагреватель, уже через несколько минут вы заметите, что часть пучка, прошедшая через нижнюю, ближайшую к нагревателю область призмы отклоняется влево, то есть в сторону от основания призмы к ее вершине (рис. 2.15 б).



Рис. 2.15. Так при неравномерном нагреве призмы деформируется светлая полоска, образованная на экране узким пучком, прошедшим через призму

Это, очевидно, свидетельствует о том, что при нагревании показатель преломления оргстекла уменьшается.

Если вы и дальше будете нагревать призму снизу, то обнаружите, что световой пучок отклоняется не только к вершине призмы в горизонтальном направлении, но и вверх по отношению ко всей установке (рис. 2.15 в). Этот эффект вы уже умеете объяснять: в вертикальном направлении призма прогрета неравномерно, поэтому, как показывают предшествующие опыты (§ 2.3), свет внутри нее распространяется криволинейно и отклоняется в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления.

Анализируя результат опыта, мы опустили возможное влияние вызванной нагреванием деформации призмы на ход светового пучка. Может быть, вы сами сумеете показать, что тепловое расширение оргстекла в условиях рассмотренного опыта не существенно?

Для самостоятельной проработки

1. Почему может не получиться опыт? Идея опыта, оптическая схема которого представлена на рис. 2.14, очень проста, поэтому, казалось бы, он должен получаться при любых условиях. Однако это не совсем так. Представьте, что призма из оргстекла неаккуратно отполирована, и по краям ее преломляющих граней имеются завалы. Тогда лучи, которые должны были бы идти вдоль нагреваемой плоскости, из-за преломления на завалах при входе и выходе из призмы будут отклоняться от этой плоскости. Однако именно эти лучи должны показать, что при нагревании показатель преломления материала призмы уменьшается. Отсюда следует, что важнейшим условием успеха опыта является качественно отполированная призма из оргстекла. Не менее важно правильно подобрать расстояние от призмы до экрана. Наконец, последнее: в опыте в качестве нагревателя может оказаться удобнее использовать фен для сушки волос.

2.6. Зависимость показателя преломления оргстекла от температуры

• Строгие количественные исследования показывают, что температурный коэффициент показателя преломления оргстекла (точное название которого *полиметилметакрилат*) для желтой линии натриевого спектра (обозначается *D*-линия) равен [1]:

$$\alpha = \frac{dn}{dT} = -1,6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

Значит, показатель преломления оргстекла зависит от температуры линейно, уменьшаясь с ее увеличением:

$$n = n_0 + \alpha(T - T_0), \quad (2.1)$$

где $\alpha = -1,6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, n_0 — показатель преломления при температуре $T = T_0$.

Ниже приведены экспериментальные результаты измерений показателя преломления оргстекла при различных значениях температуры [2]. Вы можете сопоставить табличные данные с аналитической зависимостью (2.1) и убедиться, что они соответствуют друг другу.

Температура, °С	21	45	60
Показатель преломления оргстекла	1,492	1,488	1,486

Поражает, что ничтожные с обыденной точки зрения изменения показателя преломления оргстекла, происходящие при увеличении его температуры, приводят к хорошо наблюдаемым

эффектам. Это одна из самых замечательных особенностей оптики: простые по идее и часто по осуществлению эксперименты позволяют глубоко проникнуть в сущность различных физических явлений. Разработайте и поставьте эксперимент, с количественной стороны подтверждающий зависимость показателя преломления оргстекла от температуры.

● Идея эксперимента понятна из оптической схемы, приведенной на рис. 2.16. Узкий пучок света нормально падает на одну из граней призмы 1 из оргстекла с показателем преломления n . В этом случае угол падения света на вторую грань равен преломляющему углу призмы β . Обозначим угол преломления

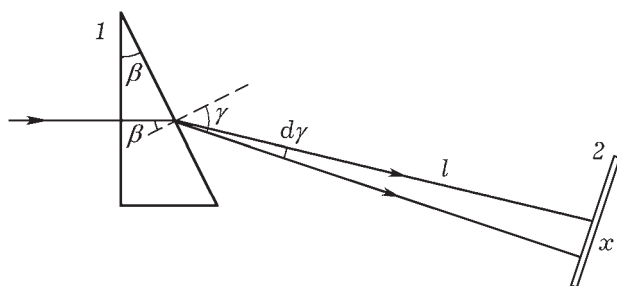


Рис. 2.16. К опыту по изучению зависимости показателя преломления материала призмы от температуры

по выходе луча из призмы γ . На некотором расстоянии l от призмы установлен белый экран 2, на котором падающий пучок дает светлое пятно. При нагревании призмы угол преломления γ уменьшается на величину $d\gamma$, и пятно по экрану смещается на расстояние x . Измерив отрезок x и расстояние l , можно определить угол $d\gamma$, а по нему вычислить изменение показателя преломления призмы dn .

Проведем необходимые расчеты. Согласно закону преломления $\sin \beta / \sin \gamma = 1/n$ или $n \sin \beta = \sin \gamma$. Так как изменения показателя преломления n и угла γ малы, чтобы найти связь между ними, продифференцируем последнее выражение. Получаем $dn \sin \beta = \cos \gamma \cdot d\gamma$. Отсюда

$$dn = \frac{\cos \gamma}{\sin \beta} d\gamma = \frac{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \beta}}{\sin \beta} d\gamma.$$

Так как угол $d\gamma$ мал, то $d\gamma = x/l$ и окончательно изменение

показателя преломления материала призмы

$$dn = \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \beta} - n^2} \frac{x}{l}. \quad (2.2)$$

В эксперименте мы использовали полупроводниковый лазер. Призма имела преломляющий угол $\beta = 30^\circ$, расстояние до экрана составляло $l = 0,7$ м. Верхняя плоская поверхность призмы нагревалась феном, температура ее измерялась цифровым мультиметром с термопарным датчиком. При температуре поверхности призмы $T = 80^\circ\text{C}$ смещение луча по экрану составило $x = 5$ мм. Подстановка этих значений в формулу (2.2) дает для изменения показателя преломления материала призмы величину $dn = 0,009$, что совсем неплохо согласуется с табличными значениями.

Для самостоятельной проработки

1. *Мальцев М. Д., Каракулина Г. А. Прикладная оптика и оптические измерения.* — М.: Машиностроение, 1968. — 472 с. (С. 71).

2. *Кругер М. Я., Панов В. А., Кулагин В. В. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов.* — Л.: Машиностроение, 1967. — 760 с. (С. 715).

В указанных книгах вы найдете сведения об оптических свойствах стекла и оргстекла, в частности, данные о зависимости показателя преломления этих материалов от температуры.

2.7. Градиент показателя преломления в неравномерно нагретом оргстекле

• Допустим, в оргстекле в результате неравномерного нагревания его создано сложное распределение температуры и, следовательно, градиента показателя преломления. Можно ли достаточно простым способом сделать видимым характер этого распределения?

Конечно, можно: опыты, которые вы уже поставили (§ 2.1, 1.6, 1.7), показывают, что для этого нужно, например, смотреть через неравномерно нагретое оргстекло на прямой отрезок, на решетку из параллельных и равноотстоящих друг от друга линий (полос) или, что еще лучше, на сетку, состоящую из одинаковых квадратных ячеек.

На рис. 2.17 а приведена фотография плоскопараллельного бруска оргстекла, за которым расположена решетка, изготовленная из натянутых на каркас черных нитей (очевидно, можно использовать решетку, начерченную на листе белой бумаги). Если к одному из торцов бруска прижать нагреватель, то изображение

решетки причудливо деформируется (рис. 2.17 б). Фотография, разумеется, не лучшим образом передает картину, которую видит глаз; вообще глаз видит больше и лучше фотоаппарата, поскольку он разумен. Если нагреватель убрать, оргстекло охлаждается, и за развитием этого процесса можно детально проследить (рис. 2.17 в, г).

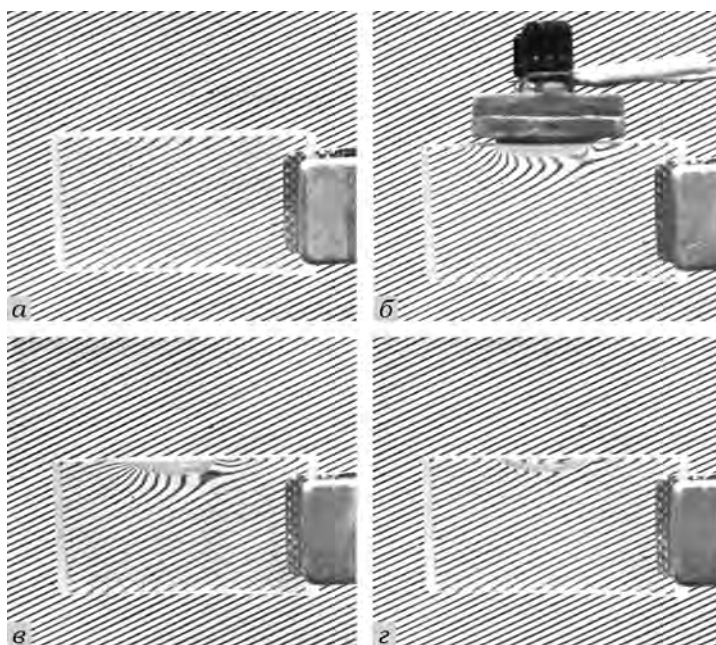


Рис. 2.17. Оптическую неоднородность можно сделать видимой, если рассматривать ее на фоне решетки

Вы без особых затруднений сумеете повторить этот опыт, даже если у вас под рукой отсутствует специальный нагреватель: можно использовать электроутюг или электроплитку, некоторое время подержав над ними торец бруска из оргстекла; на торец бруска можно поставить имеющую плоское дно алюминиевую баночку с горячей водой и т. п.

● Самое интересное, что в этом простом опыте вы сможете не только качественно, но и количественно оценить градиент показателя преломления в различных точках или участках нагретого оргстекла.

Обратимся к рис. 2.18. Луч света, выходящий из точки S какой-то линии решетки, проходя через неравномерно нагрете-

тое оргстекло, изгибается и попадает в глаз. Точка S поэтому воспринимается глазом в положении S' , отстоящем от S на некоторое расстояние a . Световой луч, прошедший в оптически

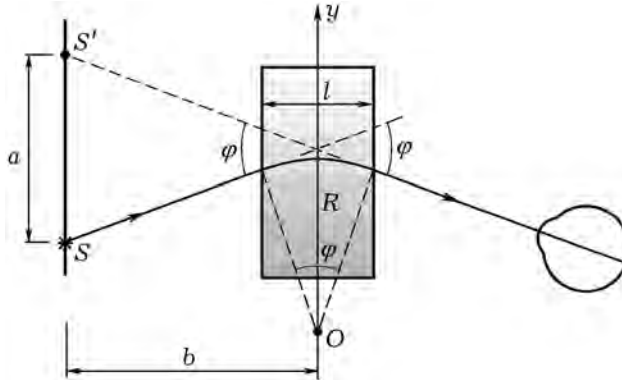


Рис. 2.18. К вычислению градиента показателя преломления

неоднородной среде путь l (толщина оргстекла), изгибается на небольшой угол φ , который приблизительно равен $\varphi = l/R$, где R — радиус кривизны искривленного луча. С другой стороны, этот же угол с той же степенью приближения $\varphi = a/b$, где b — расстояние от решетки до бруска оргстекла. Приравнявая два выражения для одного и того же угла, получаем

$$\frac{a}{b} = \frac{l}{R} \quad \text{или} \quad R = \frac{lb}{a}. \quad (2.3)$$

Вы знаете, что радиус кривизны выражается через градиент показателя преломления формулой (см. § 1.4):

$$R = \frac{n}{dn/dy}$$

Подставив это значение радиуса кривизны в формулу (2.3), получим, что градиент показателя преломления в направлении оси y

$$\frac{dn}{dy} = n \frac{a}{bl}. \quad (2.4)$$

Показатель преломления оргстекла известен и примерно равен $n = 1,5$. Величины b и l , входящие в формулу (2.4), нетрудно измерить. Остается только научиться определять значение a .

Это можно сделать, воспользовавшись, например, таким приемом. Допустим, что линии решетки при наблюдении их через оптически неоднородную среду изогнулись так, как показано на рис. 2.19. Требуется определить величину изгиба в направлении

оси y . Поскольку непосредственно сделать это сложно, то величину изгиба можно выразить в целых и долях величины d' — расстояния между соседними линиями решетки в направлении оси y . Например, линия AB изогнулась на величину $a = 1,5 d'$. В общем случае изгиб произойдет на $a = kd'$, где k — некоторый коэффициент, который для каждой области неравномерно нагретого оргстекла необходимо специально определять из наблюдений. Но $d' = d / \sin \alpha$, где d — расстояние между соседними линиями решетки и α — угол между решеткой и осью y . Следовательно, формулу (2.4) можно переписать в виде

$$\frac{dn}{dy} = n \frac{kd'}{bl} \quad (2.5)$$

или

$$\frac{dn}{dy} = \frac{knd}{bl \sin \alpha}. \quad (2.6)$$

В полученные формулы входят только такие величины, которые можно определить на опыте.

Рассмотрим простой пример. В одном из наших экспериментов измерения дали следующие результаты: $l = 30$ мм, $b = 100$ мм и $d' = 2$ мм. Градиент показателя преломления определялся в области, где искривление произошло на «одну полосу», то есть там, где $k = 1$. Подстановка перечисленных результатов в формулу (2.5) для градиента показателя преломления дает значение $dn/dy = 10^{-3}$ мм $^{-1}$.

Это означает, что на длине отрезка $dy = 1$ мм в направлении оси y мы обнаружили изменение показателя преломления величиной $dn = 0,001$. Не правда ли, впечатляющий результат для столь простого опыта!

Для самостоятельной проработки

1. Остроумов Г. А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. — М.-Л.: Гостехиздат, 1952. — 284 с. (С. 147–170).

Описаны методы наблюдения оптических неоднородностей, в том числе и метод решетки. Почитай эту книгу, вы поймете, что поставленные вами опыты — это не игра, а вариант методов, применяемых в научных исследованиях, который отличается от них лишь простотой и доступностью. Книга позволит вам придумать и поставить новые интересные эксперименты.

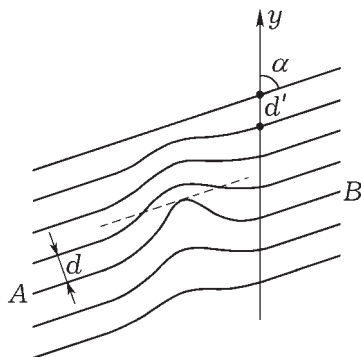


Рис. 2.19. Схематическое изображение деформации решетки при наблюдении ее через среду с оптической неоднородностью

2.8. Распространение света в неравномерно нагретом оргстекле

● Вы уже немало экспериментировали с неравномерно нагретым оргстеклом, но еще не видели, как распространяется свет внутри оргстекла. То, что при этом должно наблюдаться, представить нетрудно, если вспомнить опыты по распространению света в оптически неоднородной жидкости (см. § 1.3 и § 1.5). На рис. 2.20 схематически изображены типичные оптические явления, которые будут иметь место в неравномерно нагретой полоске оргстекла.

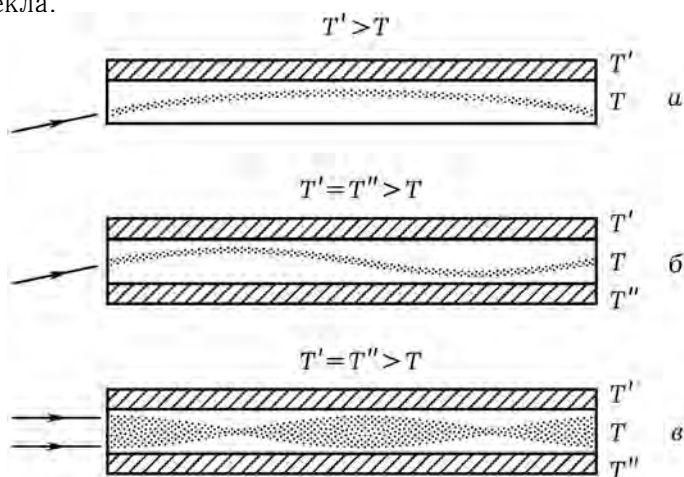


Рис. 2.20. Так может распространяться свет в полоске оптически неоднородного оргстекла

Если нагревается верхняя грань выполненной из оргстекла полоски (рис. 2.20 *а*), то распространяющийся в оргстекле пучок света должен изгибаться вниз в сторону больших значений показателя преломления. Придавая нагревателю различные температуры, можно обеспечить разные градиенты показателя преломления в оргстекле и, следовательно, экспериментально изучить зависимость радиуса кривизны искривленного пучка от градиента показателя преломления.

Если верхняя и нижняя грани полоски из оргстекла будут нагреты до одинаковой температуры, причем большей, чем температура средней части полоски, то узкий пучок света станет распространяться в оргстекле волнообразно (рис. 2.20 *б*), а широкий параллельный пучок — несколько раз сфокусируется (рис. 2.20 *в*). И эти эффекты вам уже знакомы и понятны. В самом деле, два

параллельных нагревателя создают в оргстекле такой градиент температуры, при котором средний слой оргстекла с некоторым значением показателя преломления граничит с параллельными слоями, имеющими меньший показатель преломления. Свет, вошедший под определенными углами в средний слой, не сможет выйти из него: световые лучи в этом слое будут не прямыми, а волнообразными.

Таким образом, задача заключается в том, чтобы изготовить приемлемые для опытов нагреватели и найти способ сделать ход светового пучка в оргстекле видимым. Этим мы сейчас и займемся.

Простейший электрический нагреватель схематически изображен на рис. 2.21. Он состоит из асбоцементной рейки 1, на концах которой закреплены две клеммы 2. С клеммами соединен нихромовый провод 3, уложенный в пазы, прорезанные в рейке. Чтобы исключить

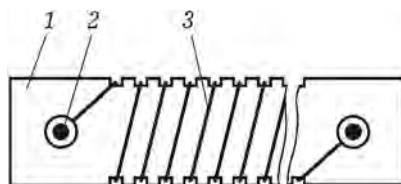


Рис. 2.21. Один из самых простых электрических нагревателей

непосредственное соприкосновение нагревающегося электрическим током провода с оргстеклом, к нагревателю следует приклеить силикатным клеем асбестовые полоски. В наших опытах мы использовали рейку из асбоцемента сечением 7×15 мм и длиной 150–300 мм (рейка была вырезана из асбоцементной трубы; такие трубы в настоящее время широко применяются в строительстве); пазы в рейке прорезались ножовкой по металлу так, что расстояние между соседними пазами составляло примерно 5 мм; для обмотки нагревателя применялся нихромовый провод диаметром 0,15–0,2 мм; в качестве термостойких изолирующих асбестовых полосок использовались асбестовые фитили, которые можно приобрести в магазинах хозяйственных товаров.

Более удобен в работе нагреватель, показанный на рис. 2.22. Основой его является дюралева трубка 1 (вырезанная из старой

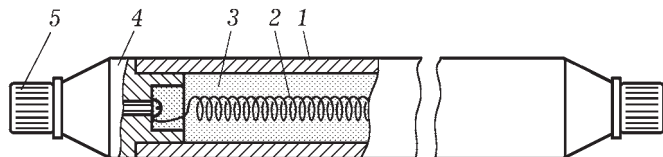


Рис. 2.22. Нагреватели, изготовленные по этому эскизу, удобны и безопасны в обращении

лыжной палки) диаметром $d = 15$ мм и длиной 300–500 мм, вдоль поверхности которой напильником сделана плоская площадка шириной 8–10 мм. В трубке находится нихромовая спираль 2 (диаметр спирали 5 мм, диаметр нихромового провода 0,4–0,6 мм; можно использовать спираль от электроплитки, взяв кусок ее подходящей длины). Трубка заполнена чистым речным песком 3, предотвращающим соприкосновение спирали с ее стенкой. Отверстия трубки закрыты изготовленными из текстолита заглушками 4. На заглушках расположены клеммы 5, винты которых соединены с концами спирали.

Для опытов необходимо изготовить два нагревателя той или иной конструкции; желательно, чтобы нагреватели были одинаковыми. Питая нагреватели удобнее всего от источников переменного регулируемого напряжения (например, школьных автотрансформаторов типа РНШ). Нужную величину напряжения следует подобрать экспериментально, имея в виду, что максимальная температура нагревателей не должна превышать 100°C . Второй из описанных нагревателей довольно инерционен, поэтому при постановке опытов выгодно вначале подавать на него несколько повышенное напряжение и после предварительного прогрева сбрасывать это напряжение до заранее определенной номинальной величины.

Теперь, когда вы умеете делать различные нагреватели, можно приступить к разработке экспериментальных установок и постановке опытов по криволинейному распространению света в полоске оргстекла.

● Одна из возможных конструкций прибора для наблюдения и демонстрации распространения света в оптически неоднородной среде изображена на рис. 2.23.

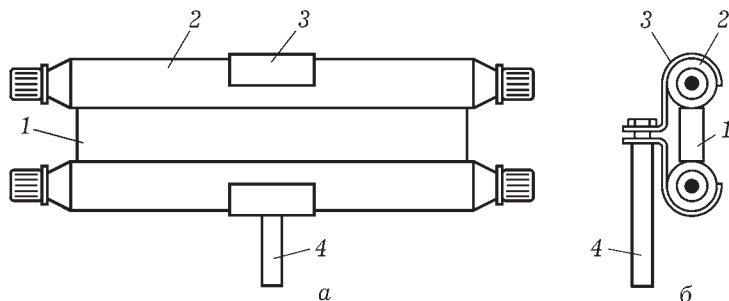


Рис. 2.23. Схема прибора для наблюдения криволинейного распространения света: *а* — вид спереди; *б* — вид сбоку

В приборе использована полоска оргстекла *1* толщиной 10 мм и длиной 300–500 мм. Ширину полоски выбирают в зависимости от желательных градиентов показателя преломления в пределах от 10 до 30 мм. Полоска оргстекла имеет плоские отполированные торцы (завалы по их краям заметно мешают проведению опытов, поэтому шлифовку и полировку торцов нужно осуществить как можно качественнее). Верхняя, нижняя и задняя грани полоски сделаны матовыми путем обработки шкуркой. Чтобы улучшить видимость светового пучка, задняя грань, помимо этого, покрыта слоем белой нитроэмали. Это покрытие должно быть достаточно равномерным. Проще всего достичь требуемого, если воспользоваться имеющейся в продаже нитроэмалью в аэрозольной упаковке: полоску оргстекла помещают на лист бумаги лицевой гранью вниз и покрывают краской, направив струю белой нитроэмали из аэрозольного баллончика на расположенную

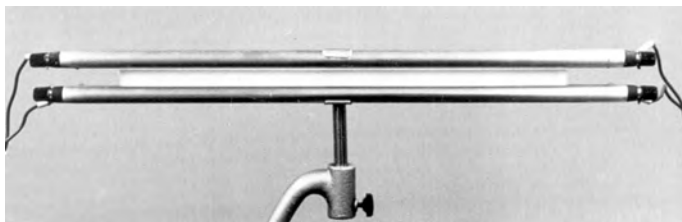


Рис. 2.24. Внешний вид прибора, собранного по схеме, представленной на предыдущем рисунке

сверху заднюю грань полоски. Разумеется, можно покрасить грань, используя обычные краски и кисточку. Электрические нагреватели *2* прижаты к верхней и нижней граням полоски оргстекла дюралевыми обжимками *3*, которые стянуты гайкой, накрученной на резьбовой конец стального держателя *4*. Внешний вид подготовленного к опытам прибора показан на рис. 2.24.

Для самостоятельной проработки

1. Бастанов В. Г. 300 практических советов.— М.: Московский рабочий, 1989.— 366 с. (С. 36–38).

Даны простейшие расчеты нагревательных элементов, применяющихся в бытовых электрических приборах. Пользуясь этим материалом, вы сможете определить длину и диаметр нихромового провода, обеспечивающего при данном напряжении требуемую мощность нагревателя, или время, в течение которого нагреватель обеспечит получение заданной температуры.

2. Справочник химика. Том 1 / Под ред. *Б. П. Никольского*. — Л.—М.: Госхимиздат, 1962. — С. 1052.

«Теплочувствительные краски состоят из одной весовой части йодистой меди Cu_2I_2 и одной весовой части двухлористой ртути HgCl_2 . Эти компоненты растирают в порошок и смешивают с жидким слабоокрашенным неокислотным маслом или спиртовым лаком. Краска наносится кистью на бумагу.

Бумага, пропитанная теплочувствительными красками, меняет цвет при нагревании: ниже $54,4^\circ\text{C}$ цвет ее ярко-красный; начиная с этой температуры она темнеет, делаясь заметно темнее при $57,2^\circ\text{C}$; при $62,8^\circ\text{C}$ цвет становится каштановым; при $68,3^\circ\text{C}$ — светло-шоколадным; при $71,1^\circ\text{C}$ — темно-шоколадным и при 100°C — черным. Разложение начинается при $148,9^\circ\text{C}$.»

Возможно, вам пригодится этот рецепт. Представьте себе, что на поверхность нагревателя нанесена теплочувствительная краска или к поверхности приклеен кусок пропитанной этой краской бумаги. Тогда при работе с нагревателем вы сможете контролировать его температуру, следя за изменением цвета краски.

Как вы думаете, можно ли доверять десятым долям, которыми изобилуют числа, указанные в приведенном выше рецепте?

2.9. Использование жидкостных нагревателей

- Не каждый из вас решится изготовить электрические нагреватели, а пронаблюдать криволинейное распространение света в неравномерно нагретом оргстекле вряд ли кто-нибудь откажется. Неужели не существует простейшего варианта прибора для этой цели, в котором вместо электрических использованы более доступные нагреватели? Подобный прибор рассмотрен ниже, но прежде, чем знакомиться с его описанием, попробуйте самостоятельно разработать приемлемую для домашних условий конструкцию.

- Внешний вид установки для опытов по криволинейному распространению света изображен на рис. 2.25. Прибор состоит из вертикально расположенной полоски оргстекла *1* и двух нагревателей *2*, прижатых к боковым граням полоски обжимками *3*. Для получения светового пучка может быть использован самодельный (§ 1.1) или фабричный осветитель *4*.

Главной особенностью рассматриваемого прибора является то, что в нем использованы не электрические, а жидкостные (водяные) нагреватели. Сделать их можно из дюралевых трубок диаметром 15 мм и длиной 350–450 мм. Снизу трубки нужно закрыть резиновыми пробками. Работать с прибором будет удобнее, если в пробки вы вставите отрезки стеклянных трубок с крана-

ми. Вместо того, чтобы делать обжимки и держатель (рис. 2.23 и 2.25), вы можете прижать нагреватели к боковым граням полоски оргстекла, например, изолянтной: несколько витков изолянты вверху и внизу прибора будут иметь ширину не более 15 мм и не помешают наблюдениям светового пучка. Изолянтной же можно прикрепить прибор и осветитель к вертикально установленной деревянной рейке; штатив в этом случае вам не понадобится.

При проведении опытов в одну или сразу в обе трубки нагревателей заливают только что вскипевшую воду. Наливать ее удобно через небольшую воронку, расположенную наклонно по отношению к трубке так, чтобы не перекрывать светового пучка. После очередного наблюдения остывшую воду сливают в поставленные под прибор стакан или кювету, открыв краны или вынув из нагревателей пробки.

Самое сложное при постановке опытов, схематически показанных на рис. 2.20, — это получить на матовой грани узкий яркий след пучка света, распространяющегося в длинной полоске оргстекла. (Получение широкого пучка света в оргстекле для наблюдения его фокусирования — более простое дело, поэтому, может быть, лучше начать экспериментировать с широким пучком и, приобретя определенный опыт, затем обратиться к узкому пучку.) Чем короче и толще полоска, тем проще это сделать. В длинной полоске это трудно в основном потому, что по мере распространения в оргстекле интенсивность света заметно уменьшается (что обусловлено не столько поглощением света в оргстекле, сколько рассеяни-

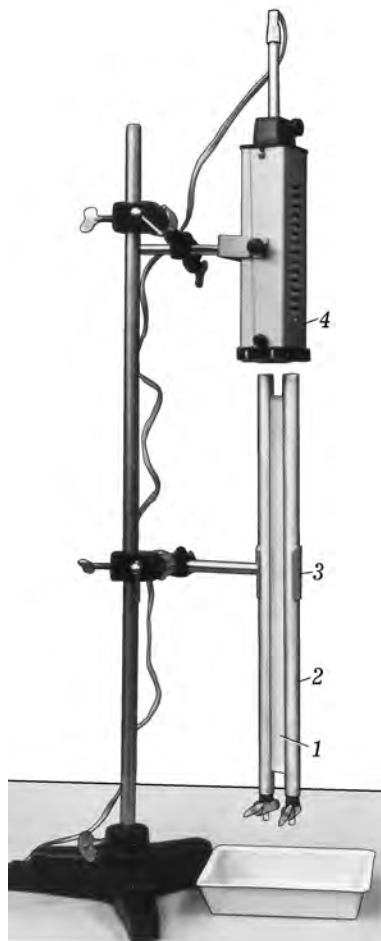


Рис. 2.25. Одна из самых простых установок для опытов по криволинейному распространению света

ем света на белой грани полоски). Тем не менее самодельный или школьный осветители (§ 1.1) позволяют получить то, что требуется. Нужно только расположить лампу в осветителе так, чтобы нить ее была перпендикулярна белой грани полоски и снабдить осветитель щелевой диафрагмой (ширина щели которой составляет 2–3 мм), ориентированной параллельно нити лампы.

Полученный таким образом узкий световой пучок направляют на отполированный торец полоски оргстекла так, чтобы он распространялся внутри полоски под небольшим углом к ее граням, к которым прижаты нагреватели. Поворачивая осветитель или полоску с нагревателями, добиваются того, чтобы на белой грани полоски появился четкий след светового пучка. Необходимо проследить за тем, чтобы этот след был образован пучком, идущим сквозь оргстекло, а не той частью выходящего из осветителя пучка, которая распространяется по воздуху и при неудачной настройке установки может падать на белую грань спереди или сзади полоски. Яркость следа светового пучка можно увеличить, питая лампу накаливания осветителя повышенным

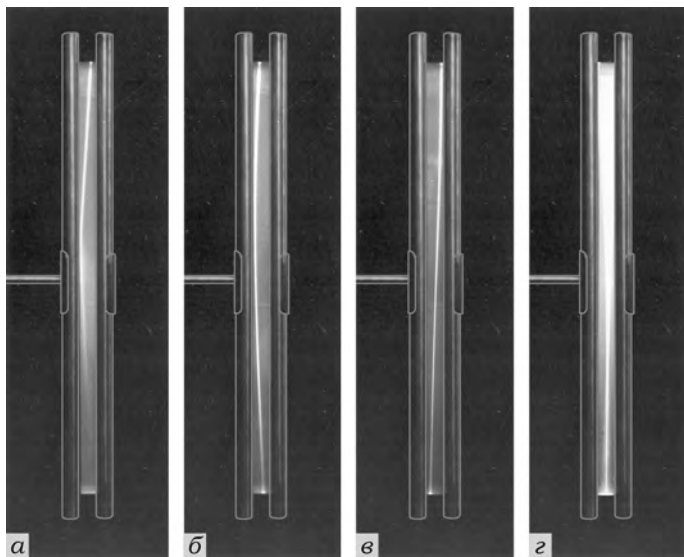


Рис. 2.26. Световой пучок в полоске неравномерно нагретого оргстекла: *а* — оргстекло при комнатной температуре — полное внутреннее отражение света; *б* — в левый нагреватель налита горячая вода — свет распространяется криволинейно; *в* — горячая вода в обоих нагревателях — свет распространяется волнообразно; *г* — горячая вода в обоих нагревателях — широкий световой пучок фокусируется

напряжением. Еще лучше отказаться от простейших осветителей и использовать вместо них проекционный аппарат, диапроектор и т. п. Наконец, если в вашем распоряжении имеется полупроводниковый лазер, можно попробовать применить его: опыты приобретут особую выразительность и красоту.

На рис. 2.26 представлены фотографии ряда явлений, которые вы можете наблюдать в опытах с описанным выше простейшим прибором. В этих опытах особенно интересно, слегка поворачивая осветитель, следить за тем, как изменяется ход светового пучка в неравномерно нагретом оргстекле.

Для самостоятельной проработки

1. Градиент показателя преломления оргстекла. Используя простейший прибор для опытов по криволинейному распространению света (рис. 2.25), вы можете поставить следующий количественный эксперимент. Залив кипятком в один из нагревателей, быстро измерьте максимальную величину прогиба светового пучка и длину, на которой произошел этот прогиб. По данным измерений рассчитайте радиус кривизны светового пучка. Считая, что температура средней части полоски оргстекла равна комнатной, а температура грани, касающейся нагревателя, достигает $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, найдите градиент показателя преломления в оргстекле и вычислите радиус кривизны светового пучка. Сопоставьте результаты эксперимента с теоретической оценкой.

2. Градиентный световод. Световод представляет собой тонкое волокно, вытянутое из оптического стекла. Свет распространяется по произвольно изогнутому световоду благодаря полному внутреннему отражению от его поверхности. Однако на поверхности стеклянного световода всегда имеются более или менее значительные дефекты, на которых происходит рассеяние света. В результате возрастают потери энергии при прохождении света по световоду. Чтобы их уменьшить, изготавливают градиентный световод, показатель преломления внутренней области которого больше, чем периферии. В таком световоде лучи распространяются волнообразно, не достигая его поверхности и, следовательно, не рассеиваясь на ее дефектах. Разработайте и исследуйте физическую модель градиентного световода из оргстекла. Наибольший интерес представляет такая модель, которая в обычных условиях сильно рассеивает проходящий в ней свет, а например, при нагревании превращается в градиентный световод с небольшими потерями.

Глава 3

ПСЕВДОЛИНЗА РОБЕРТА ВУДА

Первым, кто наблюдал линзоподобное действие оптически неоднородной среды, был, насколько нам известно, великий экспериментатор Майкл Фарадей. Он открыл явление вращения плоскости поляризации при прохождении света через вещество, помещенное в магнитное поле. Исследованию этого явления сильно мешала фокусировка света оптически неоднородной жидкостью. Позже другой выдающийся экспериментатор Роберт Вуд из прозрачного цилиндрика с плоскопараллельными торцами сумел изготовить собирающую и рассеивающую линзы. Для этого оптически однородное вещество цилиндриков ему пришлось сделать оптически неоднородным так, что показатель преломления стал плавно меняться в радиальном направлении. Такие цилиндрики из оптически неоднородного вещества Вуд назвал псевдолинзами (как бы линзами). Мы изучим теорию фокусировки света псевдолинзами, разберемся, как были сделаны первые псевдолинзы и сами научимся их делать, используя явление диффузии. Затем исследуем действие псевдолинз и измерим их фокусные расстояния. Знакомство с псевдолинзами начнем с рассмотрения неоднородности на оконном стекле и завершим сравнением законов диффузии и теплопроводности.

3.1. Неоднородность на оконном стекле

- Задумывались ли вы когда-нибудь над тем, почему прозрачные предметы, которые почти не поглощают света, видимы?

Может быть, некоторым из вас этот вопрос покажется праздным. Но не будем спешить. Давайте понаблюдаем то, что у каждого из нас всегда перед глазами, а уж потом будем делать выводы.

Внимательно рассмотрите стекло вашего окна. Почти наверняка вы обнаружите на нем какую-нибудь неоднородность: чаще всего — в форме полосы, иногда — в виде небольшой круглой области. Найдя подобную неоднородность, посмотрите сквозь нее на ясное небо или на однородный облачный слой. Неоднород-

ность станет совершенно невидимой, и как бы вы ни пытались увидеть ее в таких условиях, это вам не удастся!

Перед вами две фотографии. На первой из них (рис. 3.1 *а*) ничего не видно потому, что при фотографировании за оконным стеклом, имеющим круглую неоднородность, был расположен равномерно освещенный лист белой бумаги. Вторая фотография (рис. 3.1 *б*) получена точно в таких же условиях, как и первая, только часть листа белой бумаги была перекрыта листом черной. Неоднородность, сфотографированная на таком фоне, видна вполне отчетливо.

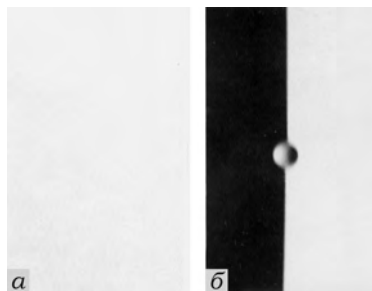


Рис. 3.1. Оптическая неоднородность оконного стекла при рассмотрении ее на равномерно освещенном фоне невидима (*а*) и видима (*б*), если ее наблюдать на фоне с резкой границей между светлой и темной областями

Простое наблюдение неоднородности на оконном стекле показывает, что видимость и невидимость прозрачных тел сильно зависят от условий их освещения. Тело мы видим тогда, когда его изображение получается на сетчатке глаза. Если тело прозрачно, то изображение дают световые лучи, отраженные и преломленные телом. Представим себе, что перед глазом находится прозрачное тело, и освещение его таково, что интенсивность света во всех точках сетчатки совершенно одинакова. Тогда глаз не сможет выделить лучи света, отраженные и преломленные телом, и оно окажется невидимым. Именно это имеет место, когда неоднородность оконного стекла рассматривают на фоне, дающем равномерный рассеянный свет.

Другое дело, если прозрачное тело освещено рассеянным светом неравномерно, например, неоднородность оконного стекла рассматривают на фоне, имеющем светлые и темные участки. В этом случае преломленные телом лучи изменяют общее изображение фона на сетчатке глаза, и это изменение делает неоднородность видимой.

Что еще можно предложить для выявления оптической неоднородности?

- Полезно рассмотреть неоднородность оконного стекла на фоне решетки, состоящей из черных и белых полос. Аналогичные опыты с неравномерно нагретым оргстеклом вы уже ставили (§ 2.7) и знаете, что решетка позволяет более определенно судить

о структуре неоднородности (рис. 3.2). Еще раз напомним, что глаз видит гораздо лучше фотоаппарата, поэтому имеет смысл, приняв приведенные фотографии к сведению, провести самостоятельные наблюдения.

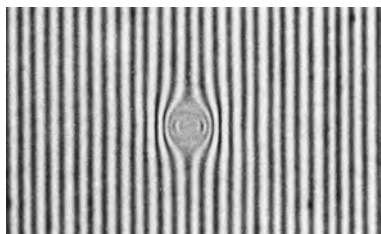


Рис. 3.2. Оптическая неоднородность оконного стекла на фоне решетки

Если вернуться к вопросу о возможной праздности всех этих наблюдений, то он будет сразу решен, как только мы оценим величину неоднородности, которую можно обнаружить при соответствующем освещении. Сделать это можно и теоретически, и экспериментально. Мы выбираем

второй путь, на наш взгляд, более убедительный.

На расстоянии около метра от глаза вертикально закрепите кусок оконного стекла. За стеклом расположите лист бумаги, одна половина которого белая, а другая — черная. Глядя сквозь стекло на границу раздела между светлой и темной областями листа, прикоснитесь к стеклу концом разогретого паяльника и держите его в контакте со стеклом 1–2 минуты. Убрав паяльник, вы заметите неоднородность, очень похожую на ту, которая изображена на рис. 3.1 б, но в отличие от нее быстро исчезающую.

Образование неоднородности стекла в условиях описанного опыта может быть объяснено изменением показателя преломления и расширением стекла при нагревании. Допустим, что существенно только расширение стекла, и оценим изменение его толщины (раньше в опытах с неравномерно нагретым оргстеклом мы убедились, что при нагревании изменяется его показатель преломления; однако, как ведет себя стекло, мы не знаем и вправе предполагать все, что угодно). При нагревании паяльником температура стекла изменяется не более, чем на $\Delta T = 100 \text{ K}$ (проверьте это, убрав паяльник, и сразу прикоснувшись к нагретому стеклу пальцем!), толщина оконного стекла $l = 3 \text{ мм}$, коэффициент линейного расширения $\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, следовательно, изменение толщины стекла $\Delta l = \alpha l \Delta T = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$!

Даже эта грубая оценка показывает, как невелики могут быть те изменения толщины (или соответствующие изменения показателя преломления) прозрачного тела, которые при рационально подобранном освещении можно сделать видимыми. Этим пользуются и при проверке качества обработки оптических поверхностей, и при микроскопических наблюдениях, и во многих

других случаях. А как важно помнить об этом начинающему экспериментатору, отнюдь не застрахованному от выбора неудачного освещения, делающего прозрачный объект совершенно невидимым!

Для самостоятельной проработки

1. **Перельман Я.И. Занимательная физика.** Книга 2. — М.: Триада–Литера, 1994. — 272 с. (С. 199–206).

Рассматриваются видимость и невидимость предметов, анализируются отрывки литературных произведений о людях-невидимках.

3.2. Собирающая линза из плоскопараллельной пластинки

● Может ли плоскопараллельная прозрачная пластинка давать изображения предметов подобно собирающей линзе?

Давайте рассуждать. Собирающую линзу можно расположить относительно точечного источника света так, что она преобразует расходящийся от источника пучок в сходящийся. Как это происходит? От точечного источника распространяется сферическая световая волна. Через центр линзы волна проходит больший путь, чем через края, поэтому центральный участок сферической волны отстает от периферийных, и расходящаяся волна превращается в сходящуюся. А световые лучи — вы хорошо знаете это — всегда нормальны волновым поверхностям. Значит, вместе с преобразованием линзой световой волны будет преобразован и световой пучок: лучи повернутся так, что после выхода из линзы пройдут через одну точку. Эта точка и является изображением источника света.

Лучи света, нормально падающие на плоскопараллельную пластинку, проходят внутри нее одинаковые пути. Поэтому на первый взгляд кажется, что сделать из такой пластинки собирающую линзу нельзя.

А нельзя ли? Неужели мы не сумеем затормозить центральную область световой волны иным способом, кроме как сделать линзу более толстой в ее центре? Наверное сумеем, если вспомним, что скорость света в веществе зависит от его показателя преломления, и она тем меньше, чем больше показатель преломления вещества. Следовательно, можно надеяться, что из плоскопараллельной пластинки может получиться собирающая линза, если показатель преломления такой пластинки сделать переменным: наибольшим в ее центре и постепенно уменьшающимся к краям.

Эти качественные рассуждения станут гораздо более убедительными, если мы попытаемся перевести их на язык формул, хотя бы и самых элементарных. Вы не обращали внимания на такой феномен? Обратите! Человек менее всего склонен верить простым рассуждениям, которые ему кажутся примитивными. Попробуйте написать несколько формул, даже имеющих к вашим доводам лишь отдаленное отношение, и вы заметите, как эти доводы приобретут особую силу убедительности.

● Пусть на плоскопараллельную круглую пластинку толщиной l нормально падает плоская световая волна Σ_S , испущенная находящимся на оси пластинки x в бесконечности точечным источником света S (рис. 3.3). Допустим, что из пластинки выходит преобразованная ею сферическая волна $\Sigma_{S'}$, центр которой S'

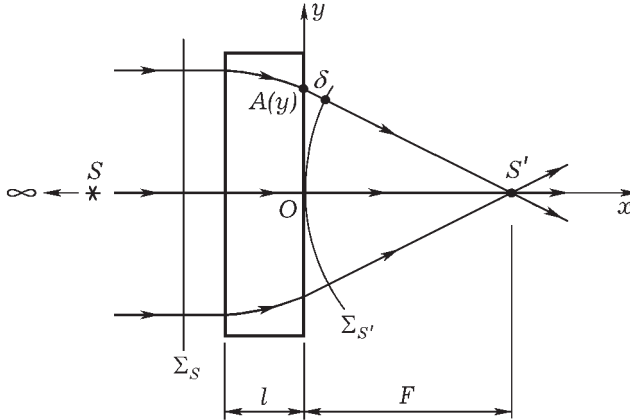


Рис. 3.3. Плоскопараллельная прозрачная пластинка может фокусировать параллельный световой пучок, если она оптически неоднородна

является изображением источника S . Так как точечный источник света S лежит в бесконечности, его изображение S' можно назвать *фокусом* пластинки. Тогда расстояние между пластинкой и точкой S' логично считать *фокусным расстоянием* F пластинки.

Поскольку время распространения света от всех точек волновой поверхности Σ_S до соответствующих точек поверхности $\Sigma_{S'}$ должно быть одинаковым (определение волновой поверхности! принцип Ферма!), приближенно для $l \ll F$ имеем

$$\frac{l}{v_0} = \frac{l}{v} + \frac{\delta}{c}, \quad (3.1)$$

где v_0 — скорость света в центре пластинки, v — скорость света на расстоянии y от центра, c — скорость света в вакууме или

воздухе, δ — разность хода между волнами, проходящими через центр пластинки и точку A с координатой y . Из треугольника AOS' следует:

$$F^2 + y^2 = (F + \delta)^2,$$

где F — радиус преобразованной пластинкой сферической волновой поверхности $\Sigma_{S'}$ и одновременно фокусное расстояние пластинки. Отсюда, пренебрегая малой по сравнению с другими величинами, входящими в эту формулу, величиной δ^2 , имеем

$$\delta = \frac{y^2}{2F}.$$

Подставляя найденное значение разности хода δ в формулу (3.1), получаем

$$\frac{l}{v} = \frac{l}{v_0} - \frac{y^2}{2Fc}. \quad (3.2)$$

Скорость света в веществе выражается через скорость света в вакууме и показатель преломления вещества формулой $v = c/n$. Если показатели преломления пластинки в ее центре O и точке A с координатой y соответственно равны n_0 и $n(y)$, то скорости распространения световой волны через указанные точки составляют

$$v_0 = \frac{c}{n_0} \quad \text{и} \quad v = \frac{c}{n(y)}.$$

Подставляя эти значения скоростей в выражение (3.2) и производя элементарные преобразования, окончательно получаем

$$n(y) = n_0 - \frac{y^2}{2Fl}. \quad (3.3)$$

Таким образом, если показатель преломления круглой плоскопараллельной прозрачной пластинки изменяется в радиальном направлении ее по закону (3.3), то такая пластинка может быть использована в качестве собирающей линзы: чем дальше к периферии пойдут через пластинку световые волны, тем сильнее они обгонят волну, проходящую через центр, и в результате волны, испущенные источником S в некоторый момент времени, пройдут через изображение S' источника одновременно.

Будем считать теперь, что точечный источник света S находится на конечном расстоянии a от оптически неоднородной пластинки, дающей его изображение S' на расстоянии b от себя. Положим, что толщина пластинки l мала по сравнению с расстояниями a и b (рис. 3.4).

Тогда аналогично формуле (3.1) имеем

$$\frac{l}{v_0} = \frac{l}{v} + \frac{\delta_1}{c} + \frac{\delta_2}{c}.$$

Поскольку разности хода $\delta_1 = y^2/2a$, и $\delta_2 = y^2/2b$, то

$$\frac{l}{v_0} = \frac{l}{v} + \frac{y^2}{2c} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right), \quad \text{или} \quad \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2lc}{y^2} \left(\frac{1}{v_0} - \frac{1}{v} \right).$$

Выражая скорости v_0 и v через соответствующие показатели преломления и скорость света в вакууме, получаем

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2l}{y^2} [n_0 - n(y)]. \quad (3.4)$$

В этом выражении вы, безусловно, узнали хорошо знакомую вам формулу тонкой линзы. Фокусное расстояние линзы, найденное

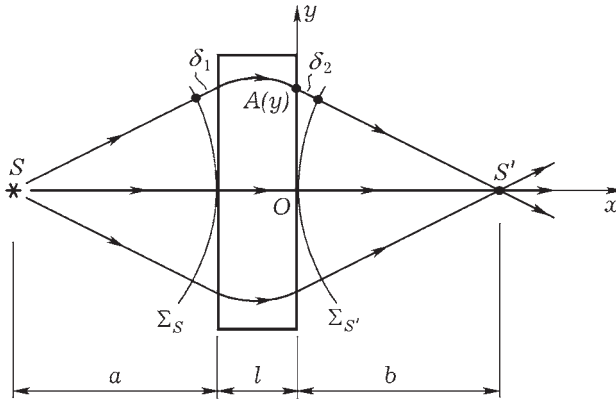


Рис. 3.4. Оптически неоднородная плоскопараллельная пластинка может давать изображения предметов подобно собирающей линзе

из формулы (3.4), совпадает с тем значением, которое можно получить, выразив его из формулы (3.3):

$$F = \frac{y^2}{2l[n_0 - n(y)]}. \quad (3.5)$$

Не нужно обольщаться: полученный нами закон распределения показателя преломления (3.3), разумеется, неточен. Настоящая теория оптически неоднородной пластинки, выполняющей роль собирающей линзы, на самом деле серьезнее, чем те прикидки, которые мы здесь сделали. Но в этих прикидках есть черты, присущие и серьезной теории. Кроме того, оценочный расчет показывает, что идея изготовления из плоскопараллельной пластинки собирающей линзы не так уж бессодержательна. Во всяком случае, мы сейчас не видим причин, почему бы не попробовать осуществить эту идею. Наверное, нет особого смысла стремиться получить в плоскопараллельной пластинке

в точности такое распределение показателя преломления, какого требует формула (3.3). Но что-то похожее на это нужно попытаться сделать.

Для самостоятельной проработки

1. **Сивухин Д. В.** **Общий курс физики.** В 5 т. Т. IV. **Оптика.** — М.: Физматлит, 2005. — 792 с. (С. 137–139).

Здесь рассмотрена своеобразная оптически неоднородная среда, способная давать изображения предметов, — так называемый «рыбий глаз» Максвелла. Теория, приведенная в книге, сложна, однако, она допускает упрощения. Попробуйте разработать элементарную теорию «рыбьего глаза».

3.3. Исследование псевдолинзы

● Линзы с переменным показателем преломления, возможность изготовления которых мы теоретически показали (§ 3.2), в настоящее время нашли применение в технике сантиметровых радиоволн [1, 2]. Для оптического диапазона электромагнитных волн изготовить подобную линзу, которая могла бы выдержать конкуренцию с обычными, довольно сложно. Однако выдающийся американский физик-экспериментатор Роберт Вуд за много лет до того, как появились первые радиолокационные станции и, следовательно, началось широкое применение сантиметровых радиоволн, предложил простую модель оптической линзы с переменным показателем преломления, которую он назвал *псевдолинзой*. Это название обладает тем несомненным достоинством, что оно кратко, поэтому в дальнейшем мы будем его использовать.

● Лучший способ познакомить вас с псевдолинзой Вуда — это дословно привести рецепт, разработанный Вудом [3]. Так мы и поступим.

...«Псевдолинзы представляют большой интерес, и их совсем не трудно приготовить. Берут горсть фотографического желатина и дают ему набухнуть в воде до полного размягчения. Избыток воды сливают, а остаток подогревают до полного ожигения и затем фильтруют через воронку с кусочком ваты. Если жидкость не течет, то прибавляют немного кипящей воды. Небольшое количество отливают в пробирку и дают отстояться до отвердения. Оставшуюся часть выпаривают на малом пламени, все время помешивая до тех пор, пока она не примет густоты сиропа. Для этого приходится кипятить ее до тех пор, пока не останется одна треть (или меньше) ее первоначального объема. Теперь прибавляют равный объем глицерина и выливают смесь во вторую пробирку. После затвердевания резким ударом отбивают доньшки у пробирок, пробирки быстро нагревают в пламени бунзеновской горелки и выталкивают желатин.

Слегка нагретым перочинным ножом разрезают цилиндры на диски разной толщины. Наилучшая толщина около двух третей диаметра. Монтируют диски между небольшими тонкими квадратными пластинками (годится хорошее оконное стекло), слегка подогревая пластинки для обеспечения посадки студня на оптический контакт (рис. 3.5). Может оказаться необходимым некоторое время поддерживать верхнюю пластинку, пока ее поверхность не сядет на контакт. Цилиндры, приготовленные из желатина и воды, погружаются в глицерин, а цилиндры из желатина и глицерина — в холодную воду. Глицерин нужно время от времени помешивать, так как слои, прилегающие к желатину, вбирают в себя вытесненную воду.

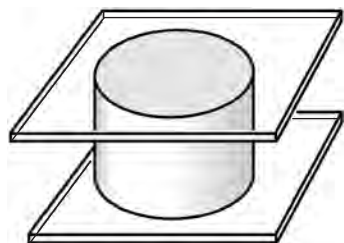


Рис. 3.5. Таковую псевдолинзу из желатинового цилиндра придумал и изготовил Р. Вуд

Через четверть часа процесс достаточно подвинется в своем развитии, глицерин постепенно диффундирует в желатин, вытесняя из него воду, и вода также постепенно вытеснит глицерин. Желатин, содержащий глицерин, имеет больший показатель преломления, чем желатин, содержащий воду; вследствие этого цилиндры, набухшие в глицерине, действуют как вогнутые, а цилиндры, набухшие в воде, — как выпуклые линзы.

Фокусное расстояние получается от 8 до 10 см; пользуясь такими цилиндрами, можно получать очень резкие изображения нитей лампы накаливания и газового пламени.»

Если вы запутались в рецепте Вуда, то вот вам совет: возьмите большой лист бумаги, распишите на нем по пунктам способы изготовления отдельно собирающей и рассеивающей псевдолинз, а затем снабдите каждый пункт схематическим рисунком, поясняющим, что нужно делать. При этом вам не только все станет ясно (рецепт Вуда точен), но и попутно вы познакомитесь с одним из способов чтения научных материалов. Научные статьи и книги всегда отличаются краткостью, а их авторы обычно мало обеспокоены возможными неудобствами своей продукции для читателя. Это вполне объяснимо: предполагается, что читатель не менее трудолюбив, чем автор, поэтому он сможет разобраться в написанном.

Для самостоятельной проработки

1. Лавров А. С., Резников Г. Б. Антенно-фидерные устройства. — М.: Советское радио, 1974. — 368 с. (С. 228–230).

Здесь кратко описаны несколько линз с переменным показателем преломления, применяющихся для фокусировки радиоволн, и приведе-

ны формулы, выражающие законы распределения показателя преломления в таких линзах.

2. Зелкин Е. Г., Петрова Р. А. Линзовые антенны. — М.: Советское радио, 1974. — 280 с. (С. 104–167).

Дана теория линз из оптически неоднородного диэлектрика, применяющихся для преобразования пучков радиоволн.

3. Вуд Р. Физическая оптика. — М.–Л.: ОНТИ, 1936. — 896 с. (С. 103–104).

Здесь описаны изготовление и опыты с собирающей и рассеивающей псевдолинзами.

3.4. Псевдолинза из капли желатина

● Псевдолинза Роберта Вуда — очень интересный прибор, но иметь дело с большим количеством желатина при изготовлении его не совсем приятно. Поэтому здесь описан несколько иной способ изготовления псевдолинзы, требующий небольшого количества желатина и приводящий, на наш взгляд, к лучшим результатам.

В пробирку насыпьте фотографический или пищевой желатин так, чтобы образовался слой толщиной около 2 см. Налейте в пробирку до половины ее высоты воду и оставьте желатин на два–три часа набухать в воде. Слейте из пробирки избыток воды и, нагревая пробирку на пламени сухого горючего или спиртовки, полностью расплавьте набухший желатин. Нагревание нужно производить достаточно осторожно, чтобы приготовляемый состав не подгорел. После этого влейте в расплавленный желатин равное по объему количество глицерина.

Пока состав охлаждается, приготовьте две чистые пластинки размером примерно 20 × 20 мм и 40 × 40 мм из тонкого стекла (можно использовать стекло тщательно отмытой от эмульсии фотопластинки, хорошее оконное стекло или в крайнем случае оргстекло). Заготовьте также две полоски размером 4 × 25 мм, вырезанные из картона толщиной около 0,5 мм.

В охладившийся состав, приобретший густоту хорошей сметаны, опустите стеклянную трубку и перенесите ею на расположенную горизонтально большую стеклянную пластинку некоторое количество состава. При этом на поверхности пластинки образуется капля. Необходимо добиться, чтобы капля получилась совершенно круглой и диаметр ее был в пределах 6–10 мм. Если с первого раза вам не удастся получить того, что нужно, быстро вымойте в проточной воде стеклянную пластинку, насухо вытрите ее и вновь попытайтесь получить на поверхности пластинки

круглую каплю указанных размеров. Как только вы сумеете сделать это, положите рядом с каплей на пластинку картонные полоски и быстро покройте каплю второй стеклянной пластинкой. Если вы действовали достаточно аккуратно, между стеклянными пластинками у вас образуется небольшой цилиндр, боковая стенка которого перпендикулярна основаниям. Оставьте его на 10–20 мин до тех пор, пока состав почти полностью не загустеет.

Посмотрите через плоскопараллельные основания приготовленного вами цилиндрика на прямую границу между темной и светлой областями или просто на какой-либо удаленный предмет. Никакого преломления вы не обнаружите (рис. 3.6).

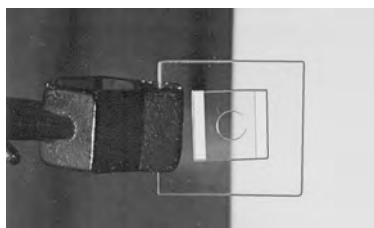


Рис. 3.6. Оптически однородная капля из желатина и глицерина

пластинками. Воздушный пузырек, который почти неизбежно остается вблизи цилиндрика, нужно аккуратно удалить узкой полоской бумаги. Спустя 3–4 минуты достаньте пластинки из воды, осторожно протрите их тряпочкой и удалите фильтровальной бумагой воду из промежутка между ними. На стеклянных пластинках не должно оставаться капель воды, так как они, фокусируя свет, будут сильно мешать наблюдениям. Вновь посмотрев сквозь цилиндрик на границу между светлой и темной областями, вы обнаружите, что цилиндрик своим внешним ободком начал преломлять свет (рис. 3.7 а)!

Удалив прокладки, опустите стеклянные пластинки с цилиндриком между ними на дно блюда, в которое налита холодная прокипяченная или дистиллированная вода. При этом вода должна зайти в промежуток между

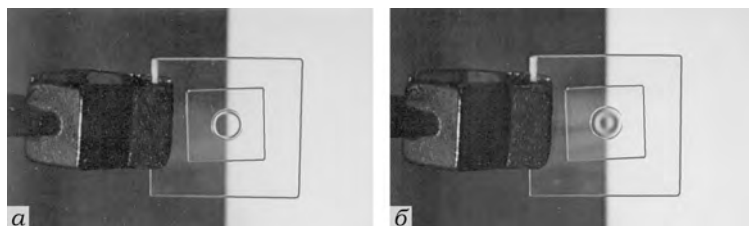


Рис. 3.7. Диффузия воды в застывшую желатиново-глицериновую каплю приводит к тому, что капля становится оптически неоднородной

Фотографии рис. 3.7 ясно показывают, что вы должны наблюдать. При рассматривании фотографий (рис. 3.7 б) ощущение

таково, будто цилиндрок принял форму кратера. На самом деле его основания остались плоскопараллельными, просто описанный способ наблюдения позволяет свести изменение оптической плотности состава к изменению интенсивности проходящего через цилиндрок света. С подобным явлением вы уже встречались, изучая оптическую неоднородность на оконном стекле (§ 3.1).

Опустив цилиндрок в воду еще на 5–15 минут, добейтесь того, чтобы вода проникла вплоть до оси цилиндрика. Это нетрудно проконтролировать, производя время от времени наблюдения изложенным выше методом.

● Псевдолинза готова. Достав ее из воды и высушив стеклянные пластинки тряпочкой и фильтровальной бумагой, вы сможете получить с ее помощью удивительно четкое изображение спирали настольной лампы (рис. 3.8). Последняя фотография получена в следующих условиях: расстояние от лампы до псевдолинзы (которая имела диаметр 9 мм) $a = 75$ см, расстояние от псевдолинзы до изображения $b = 26$ см. Отсюда согласно формуле тонкой линзы $1/a + 1/b = 1/F$ фокусное расстояние псевдолинзы $F = 19,5$ см. Изготовленные описанным способом псевдолинзы диаметром около 6 мм имеют фокусное расстояние порядка 5–10 см.

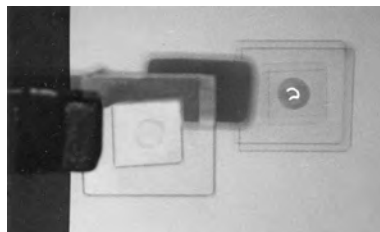


Рис. 3.8. Изображение спирали лампы, созданное желатиновой псевдолинзой

Принцип действия псевдолинзы должен быть вам совершенно ясен. Показатель преломления глицерина $n_g = 1,47$, а показатель преломления воды $n_w = 1,33$. Вода, диффундируя в однородный цилиндрок, состоящий из желатина и глицерина, вытесняет из него глицерин. Цилиндрок при этом становится оптически неоднородным, причем показатель преломления его постепенно уменьшается от центра к краям. Выше показано, что такой цилиндрок действует, как собирающая линза (§ 3.2).

Спустя примерно сутки после изготовления псевдолинзы, ее состав вновь становится оптически однородным, и псевдолинза теряет свои удивительные свойства.

Однако вы можете сохранить псевдолинзу в течение длительного времени. Так, одна из наших псевдолинз пролежала в ящике стола два года. Однажды она все же попала на глаза. Выбра-

сывать сразу эту старую добрую псевдолинзу было почему-то жалко, и прежде чем сделать это, мы положили ее на несколько минут в воду. Высохшая, как египетская мумия, псевдолинза «оживла» и вновь стала давать изображения! Стойкость всегда достойна уважения, поэтому псевдолинза была почтительно помещена на свое место в стол до следующего случая.

Для самостоятельной проработки

1. Показатель преломления материала псевдолинзы. Измерьте диаметр и толщину изготовленной псевдолинзы. Получите с помощью псевдолинзы изображение нити лампы карманного фонаря и определите фокусное расстояние псевдолинзы. Считая, что для изготовленной диффузией псевдолинзы справедлива теория, изложенная в § 3.2, по вашим экспериментальным результатам вычислите разность показателей преломления материала на оси и периферии псевдолинзы. Сопоставьте полученное значение с показателями преломления веществ, из которых изготовлена псевдолинза.

3.5. Законы Фика, Фурье и псевдолинза

● В псевдолинзе Роберта Вуда необходимый для ее работы радиальный градиент показателя преломления материала цилиндра создается за счет диффузии. Можно ли получить нечто подобное псевдолинзе, если воспользоваться неравномерным нагреванием прозрачного цилиндра?

Один из основных законов диффузии, который, кстати, установлен Фиком, показывает, что диффузионный поток вещества через некоторую поверхность пропорционален градиенту концентрации этого вещества в направлении, перпендикулярном поверхности

$$J = -D \frac{dN}{dy}, \quad (3.6)$$

где J — диффузионный поток в направлении оси y , D — коэффициент диффузии, N — концентрация вещества и dN/dy — градиент концентрации по направлению оси y .

А один из основных законов теплопроводности — закон Фурье — утверждает, что поток тепла пропорционален градиенту температуры

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dy}, \quad (3.7)$$

где Q — поток тепла через поверхность, λ — коэффициент теплопроводности, dT/dy — градиент температуры в направлении оси y , вдоль которой осуществляется поток тепла.

• Сравнение формул (3.6) и (3.7) показывает, что они совершенно одинаковы. Даже знак перед соответствующими коэффициентами один и тот же (что, к слову сказать, означает, что перенос вещества при диффузии происходит от областей с большей концентрацией к областям с меньшей концентрацией, а перенос тепла — от более нагретых частей тела к менее нагретым). Следовательно, процессы диффузии и теплопроводности описываются одним и тем же законом, хотя физическая сущность этих процессов различна.

Таким образом, рассуждая по аналогии, можно сделать вывод, что если обусловленный диффузией поток вещества с меньшим показателем преломления через боковую поверхность прозрачного цилиндра может превратить этот цилиндр в собирающую псевдолинзу, то, скорее всего, и поток тепла через боковую поверхность цилиндра позволит получить то же самое (разумеется при условии, что нагревание приводит к уменьшению показателя преломления материала, из которого изготовлен цилиндр).

Может быть, не стоило здесь особо останавливаться на этом, но рассмотренное — яркий пример того, как знание одной области физики способствует развитию интуиции в другой области.

Для самостоятельной проработки

1. Городецкий Е. Е. О явлениях переноса // Квант. — 1986. — № 9. — С. 27–29.

На качественном уровне рассмотрены явления теплопроводности, диффузии и жидкого трения (вязкости), и объяснено, почему коэффициенты теплопроводности, диффузии и вязкости пропорциональны между собой.

2. Кикоин А. К., Кикоин И. К. Молекулярная физика. — М.: Наука, 1976. — 480 с. (С. 145–147 и 160–162).

Эта книга отличается ясностью изложения, и вы, безусловно, сумеете по ней разобраться в той общности законов, которая присуща явлениям диффузии и теплопроводности.

3. Физический практикум. Электричество и оптика / Под ред. В. И. Ивероновой. — М.: Наука, 1968. — 816 с. (С. 733–739).

Здесь рассмотрена лабораторная работа (университетская!) по определению коэффициента диффузии оптическим методом. Приведенная теория, возможно, покажется вам сложной. Попробуйте уловить основную идею работы. Может быть, вам удастся придумать простой оптический опыт, позволяющий оценить коэффициент диффузии.

Глава 4

ГРАДИЕНТНАЯ ЛИНЗА

Градиентная линза, или *градан*, — оптическое устройство, фокусирующее свет не за счет его преломления на границах раздела различных оптически однородных сред, а за счет криволинейного распространения света в оптически неоднородной среде. Такая среда характеризуется градиентом показателя преломления, именно этим и обусловлено название градиентной линзы. Рассмотренные в предыдущей главе псевдолинзы из желатина — это прообраз современных градиентных линз. Чтобы глубже познакомиться с этими замечательными приборами, вместо желатина лучше использовать оргстекло, показатель преломления которого довольно сильно зависит от температуры. В этой главе предложены исследования градиентной линзы, представляющей собой цилиндр из оргстекла, градиент показателя преломления в которой создается за счет нагревания (собирающая линза) или охлаждения (рассеивающая линза) его боковой поверхности. Описаны различные способы получения требуемых для фокусировки и дефокусировки света разностей температур. Приведена серия экспериментов, позволяющая детально исследовать поведение светового пучка внутри градиентной линзы.

4.1. Градиентная линза из неравномерно нагретого оргстекла

- Опыты с псевдолинзой настолько эффектны, что даже многократное воспроизведение их не может сгладить ощущения необычности наблюдаемого. Словами трудно передать прелесть того, что можно увидеть собственными глазами. Попробуйте! Вы не пожалеете о затраченных усилиях.

Прежде всего нужно изготовить из оргстекла цилиндр диаметром около 20 мм и длиной 40–60 мм. Торцы цилиндра должны быть плоскопараллельными и прозрачными. Проще всего такой цилиндр сделать вручную, выпилив из листа оргстекла толщиной 40–60 мм (листы оргстекла указанной толщины изготавливаются на современном производстве и имеют отполированные поверх-

ности) параллелепипед сечением 20×20 мм, и затем обработав его напильником до цилиндра. В принципе подходящий цилиндр можно сделать из любого куска оргстекла вручную или на токарном станке. Но в этом случае вам придется отшлифовать на мелкозернистой шкурке и затем отполировать нанесенной на ткань пастой ГОИ его торцы (§ 2.4). Следует стремиться к тому, чтобы при шлифовке и полировке торцы получились плоскими, так как завалы по их краям превратят цилиндр в собирающую линзу. Это не всегда сразу получается у начинающих, поэтому для первых опытов, наверное, лучше попытаться найти толстое оргстекло, уже имеющее отполированные фабричным способом поверхности, и из него сделать цилиндр, как описано выше. Выбор нужного куска оргстекла не слишком затруднителен, поскольку небольшие царапины на торцах цилиндра не повредят опыту (старайтесь не нанести на торцы новые царапины при обработке напильником боковой поверхности цилиндра).

Подберите резиновую грушу диаметром 50–60 мм. Острым ножом срежьте у груши наконечник так, чтобы получилось круглое отверстие диаметром 25–30 мм. В это отверстие вы будете наливать горячую воду. Чтобы закрепить в груше цилиндр из оргстекла, в ней нужно сделать еще два диаметрально противоположных отверстия так, чтобы ось их была перпендикулярна оси первого отверстия. С этой целью найдите пробковое сверло, внешний диаметр которого на 3–4 мм меньше диаметра цилиндра из оргстекла. Если подходящего сверла подобрать не удастся, его без труда можно изготовить из отрезка латунной или дюралеевой трубки: достаточно край трубки заострить на абразивном круге электроточила или вручную напильником. Теперь прижмите грушу острым краем сверла к поверхности дощечки и, поворачивая сверло или ударяя по нему, сделайте в груше требуемые отверстия.

В прорезанные сверлом отверстия вставьте цилиндр из оргстекла. Проверьте герметичность получившегося соединения резины с оргстеклом, залив в грушу воду. Изготовленную псевдолинзу разместите на подходящей подставке или закрепите в лапке штатива так, чтобы отверстие в груше оказалось сверху (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Простейшая псевдолинза из оргстекла

Расположите на расстоянии 1–2 м от псевдолинзы настольную лампу, а за псевдолинзой поместите белый экран, изготов-

ленный из листа плотной бумаги. Вскипятите воду и залейте кипяток в отверстие груши. Вы будете наблюдать, как на экране постепенно появляется изображение лампы!

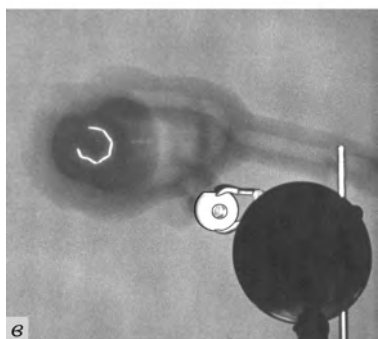
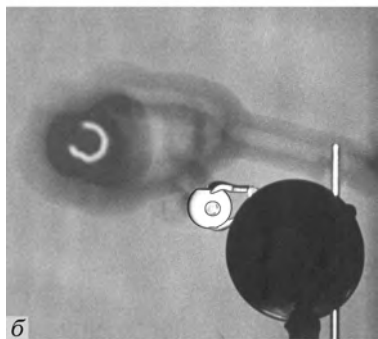
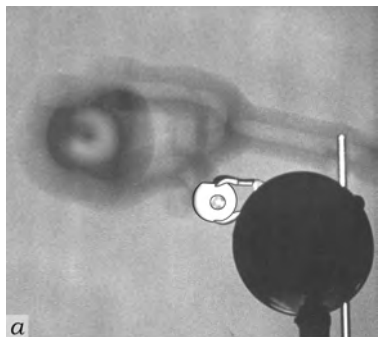


Рис. 4.2. Получение изображения спирали лампы с помощью псевдолинзы: *а* — цилиндр из оргстекла при комнатной температуре; *б* — в резиновую грушу налита горячая вода; *в* — наилучшее изображение, созданное псевдолинзой

На рис. 4.2 приведены фотографии описанного опыта. Они получены в таких условиях: расстояние от лампы до псевдолинзы составляло 1 м, а от псевдолинзы до экрана — 3 м. Из этих данных вы можете определить фокусное расстояние получившейся в опыте псевдолинзы. Ясно, что псевдолинза, как и обычная собирающая линза, может давать не только увеличенное, но и уменьшенное изображение предмета. Для получения такого изображения достаточно удалить предмет от псевдолинзы на расстояние, превышающее двойное фокусное расстояние псевдолинзы.

- Объяснение результата опыта для вас уже не должно составить особого труда. Показатель преломления оргстекла при увеличении его температуры уменьшается, и эта зависимость, как вы знаете, выражена достаточно ощутимо (§ 2.6). При наливании в грушу горячей воды, температура которой составляет 90–100 °С, цилиндр из оргстекла начинает нагреваться, причем поток тепла распространяется от боковой поверхности цилиндра к его оси. В результате неравномерного нагрева цилиндр становится оптически неоднородным: в радиальном направлении цилиндра возникает градиент показателя преломления. Рас-

пределение показателя преломления оргстекла в радиальном направлении достаточно прогретого цилиндра таково, что он непрерывно уменьшается от оси цилиндра к его боковой поверхности. Такой цилиндр, как это уже показано раньше (§ 3.2), представляет собой эквивалент собирающей линзы.

По истечении определенного времени после начала опыта цилиндр прогревается более или менее равномерно и уже не фокусирует свет. Очень полезно, перемещая белый экран, пронаблюдать за изменением фокусного расстояния псевдолинзы при нагревании и охлаждении оргстекла.

Нередко посторонние наблюдатели, увидев опыт, высказывают предположение, что нагревание оргстекла приводит к его неравномерному расширению, и за счет этого цилиндр с плоскопараллельными торцами превращается в подобие собирающей линзы. Нетрудно, однако, сообразить, что если бы вызванное нагреванием расширение оргстекла было бы существенно в рассматриваемом опыте, то цилиндр превратился бы не в собирающую, а в рассеивающую линзу. Впрочем, ниже предложен эксперимент, самым убедительным образом показывающий, что фокусировка света псевдолинзой обусловлена именно изменением показателя преломления оргстекла при нагревании (§ 4.4).

Для самостоятельной проработки

1. Ангерер Э. Техника физического эксперимента. — М.: Физматгиз, 1962. — 452 с. (С. 47 и 61).

Здесь приведены некоторые физические характеристики оргстекла и, в частности, значение коэффициента линейного расширения при нагревании. Не попытайте ли вы, воспользовавшись этим значением, оценить вклад теплового расширения оргстекла в фокусирующее действие неравномерно нагретого цилиндра?

4.2. Электрические нагреватели для градиентной линзы

- Всем хорош опыт с псевдолинзой из оргстекла (§ 4.1): он прост, получается всегда, любой может повторить его даже у себя дома. Но вот вы захотели показать этот опыт в школе своим товарищам, и вам сразу становятся очевидными недостатки прибора, обеспечивающего постановку опыта: нужно кипятить воду, заливать горячую воду в резиновую грушу, протирать запотевшие торцы цилиндра из оргстекла и т. д. Нельзя ли придумать нечто более удобное? Такое, чтобы прибор был всегда готов к ра-

боте и оставалось лишь включить его? Вы рассуждаете верно: поскольку горячая вода в качестве нагревателя неудобна, нужно использовать электрический нагреватель.

Электрический нагреватель для псевдолинзы должен представлять собой трубку (цилиндр с осевым отверстием), внутрь которой может вставляться цилиндр из оргстекла. В качестве такого нагревателя можно использовать мощный резистор, который вы уже применяли в некоторых опытах (§ 2.3).

Подойдет резистор типа ПЭВ-25 мощностью 25 Вт и сопротивлением 510 Ом. Резистор имеет отверстие диаметром примерно 11 мм, внутрь которого нужно вставить цилиндр из оргстекла. Диаметр цилиндрика 10–11 мм и длина его 45–50 мм. Чтобы проходящий мимо резистора свет не мешал наблюдениям, прибор следует снабдить непрозрачным экраном из дюрала, имеющим отверстие, расположенное напротив отверстия резистора.

На резистор, служащий нагревателем в этом опыте, следует подавать напряжение около 100 В. Лучше всего подключить резистор к регулируемому по напряжению источнику тока (в школьном кабинете физики имеется подходящий для этих целей автотрансформатор типа РНШ).

При включении нагревателя на экране постепенно появляется изображение предмета, в качестве которого удобно использовать лампу накаливания. Проводя наблюдения, вы сразу обратите внимание на основной недостаток описанного прибора: диаметр псевдолинзы мал, поскольку ограничен диаметром отверстия в резисторе, а небольшое отверстие само без всякой линзы дает пусть несовершенное, но все же на что-то похожее изображение предмета.

Более красивые результаты вы получите, если в качестве нагревателя используете резистор типа ПЭВ-100 сопротивлением 620–1500 Ом. Этот резистор имеет отверстие диаметром 20 мм и поэтому не требует дополнительного экрана (резистор можно зажать непосредственно в лапке штатива, как показано на рис. 4.3). Внутрь резистора можно вставить один или несколько цилиндров оргстекла диаметром 20 мм и длиной 40–60 мм. Очевидно, что чем толще псевдолинза (больше длина цилиндра или совокупности цилиндров из оргстекла), тем сильнее она будет фокусировать свет при том же градиенте показателя преломления внутри нее. Резистор сопротивлением 620 Ом можно кратковременно включать непосредственно в электроосветительную сеть напряжением 220 В; ясно, что резисторы, имеющие более высокие значения сопротивлений, можно включать в сеть на более длительное время. Напомним, что температура внутренней

поверхности нагревателя не должна превышать $100\text{ }^{\circ}\text{C}$; перегрев цилиндра из оргстекла делает его непригодным для последующих опытов.

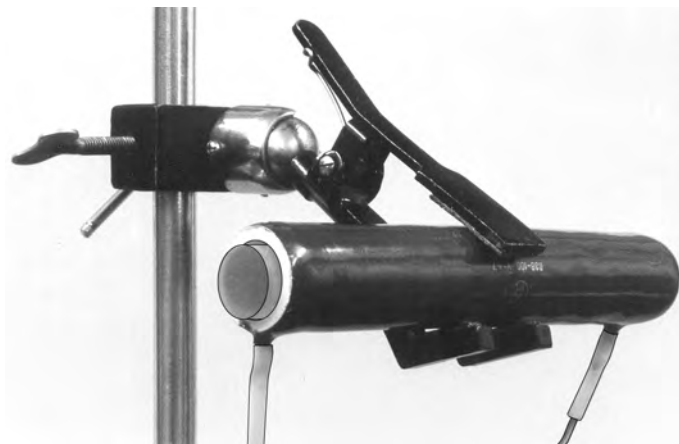


Рис. 4.3. Если вы найдете мощный резистор с отверстием большого диаметра, то сможете сделать очень простую и удобную псевдолинзу

Последовательность появления изображения спирали лампы на экране при включении нагревателя градиентной линзы показана на рис. 4.4.

- Наконец, цилиндрический нагреватель для псевдолинзы можно изготовить и самостоятельно. Мы делали так. Из асбестовой ленты, используя силикатный клей, склеивали цилиндр нужного диаметра, толщина стенки которого составляла около 2 мм. Нихромовым проводом диаметром 0,2 мм наматывали на цилиндр обмотку так, чтобы расстояния между соседними ее витками были одинаковы и составляли 3–5 мм (рис. 4.5; 1 — термостойкий цилиндр с отверстием, 2 — обмотка нагревателя, 3 — выводы обмотки). Концы нихромового провода скручивали с отрезками медного проводника диаметром 1–1,5 мм и этими отрезками делали выводы обмотки, закрепляя их на цилиндре из асбеста. Затем цилиндр с обмоткой со всех сторон покрывали слоем алебастра толщиной 2–3 мм. Осевое отверстие цилиндра формовали деревянным стержнем или металлической трубкой подходящего диаметра. Готовый нагреватель высушивали в течение одного–двух дней.

Самодельный нагреватель перед включением обязательно должен быть проверен на предмет отсутствия короткого замыкания обмотки. Сделать это нужно авометром. Этим же прибором

можно измерить сопротивление обмотки и по полученному результату примерно оценить напряжение, необходимое для

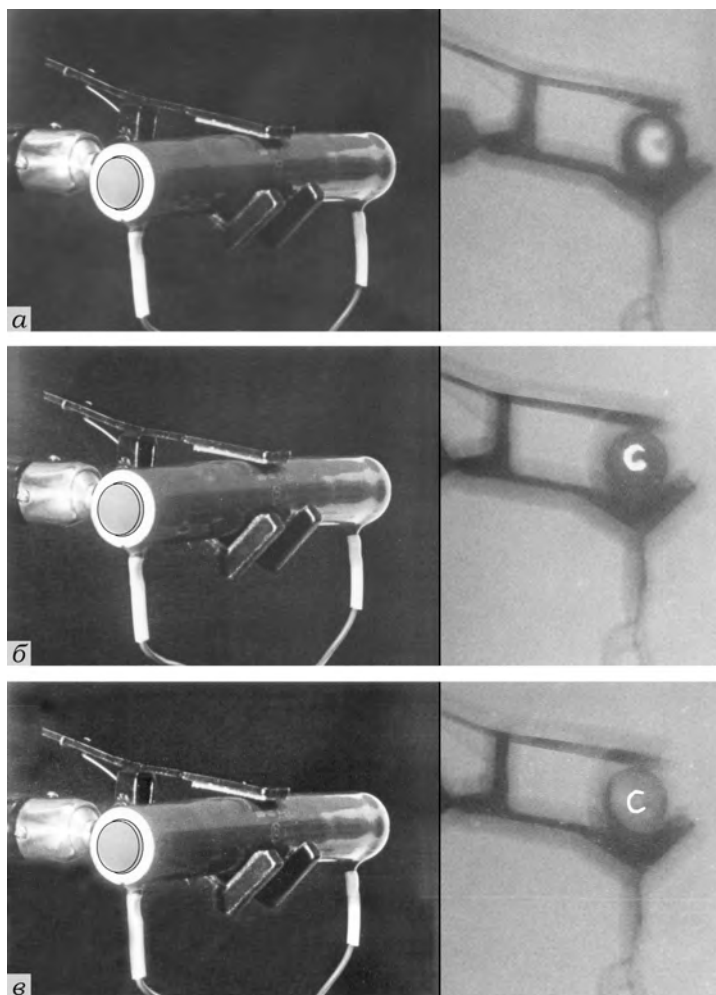


Рис. 4.4. При включении нагревателя цилиндр из оргстекла становится собирающей градиентной линзой и на экране постепенно появляется изображение спирали лампы

нормальной работы нагревателя. Впрочем, проще подсоединить выводы обмотки к автотрансформатору (удобно использовать блок питания типа В-24) и, осторожно повышая напряжение, контролировать температуру нагревателя. Так следует найти

оптимальное значение напряжения и при этом напряжении в дальнейшем работать с самодельным нагревателем.

Понятно, что опыты с электрическими нагревателями можно ставить в том и только том случае, если вы знаете и неукоснительно выполняете требования техники безопасности. Лучше всего работать в школьном физическом кабинете под руководством учителя физики. Если такой возможности нет, и пользоваться сетевым напряжением вас никто не научил, то домашние эксперименты проводите с нагревателями, в которых применяется горячая вода.

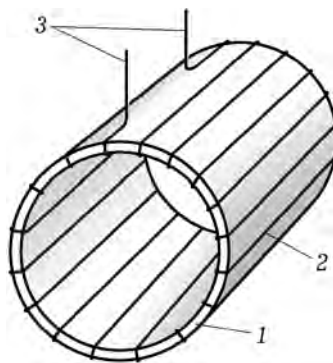


Рис. 4.5. Эскиз самодельного электрического нагревателя для псевдолинзы

Для самостоятельной проработки

1. Измерение температуры нагревателя. Результаты исследований станут более убедительными, если в экспериментах систематически проводить измерения температуры. Простой и достаточно точный метод заключается в использовании термопары. Наиболее пригодными материалами являются медь и константан (сплав 60% меди и 40% никеля). Они вполне доступны, так как медная проволока используется для намотки различных катушек, а константановая — для изготовления реостатов. Чем тоньше проволоки, тем менее инерционна термопара. Обычно проволоки термопары стараются сварить. Но в наших экспериментах температура не превышает $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому концы медной и константановой проволок лучше спаять оловом. Термический коэффициент ЭДС для термопары медь–константан составляет 41 мкВ/К . Пользуясь цифровым мультиметром с пределом измерения 200 мВ , вы легко определите температуру с погрешностью порядка $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Более точные результаты даст бытовой мультиметр, укомплектованный специальной термопарой; в этом случае прибор выдает значение температуры непосредственно в градусах Цельсия.

4.3. Рассеивающая градиентная линза

- Если при нагревании боковой поверхности цилиндра из оргстекла получается собирающая псевдолинза, то логично предположить, что охлаждение боковой поверхности цилиндра приведет к образованию рассеивающей псевдолинзы. Проще всего проверить это предположение, используя псевдолинзу, нагрева-

телем которой является резиновая груша с горячей водой (§ 4.1). Но сумеете ли вы охлаждением получить такой перепад температур, который позволит обнаружить рассеивающие свойства псевдолинзы?

В «Справочнике химика» [1] имеется рецепт одной из наиболее простых, доступных и эффективных охлаждающих смесей: при смешивании 42,2 г безводного хлористого кальция (CaCl_2) со 100 г снега или льда температура смеси понижается до -55°C . А в «Справочнике физика-экспериментатора» [2] написано, что при смешивании 3 весовых частей снега или льда с 4 весовыми частями хлористого кальция температура смеси становится равной -48°C . Рецепты несколько отличаются друг от друга и дают разные результаты, но в принципе оба они должны обеспечить успех опыта. Действительно, комнатная температура, а следовательно, и температура ненагретого оргстекла примерно равны 20°C . Нагревая цилиндр из оргстекла кипящей водой, вы повышали температуру боковой поверхности цилиндра максимум на 80°C . А охлаждая хотя бы до -40°C , вы будете иметь перепад температур между боковой поверхностью цилиндра и его осевой областью, составляющий 60°C . Если в первом случае получается собирающая псевдолинза, то почему бы во втором не получиться рассеивающей?

● Соберите экспериментальную установку (рис. 4.6). Она должна состоять из источника света 1 (настольной лампы), псевдолинзы 2, обычной собирающей линзы 3 (в качестве которой можно использовать очковое стекло оптической силой в 1–2 диоптрии) и белого экрана 4 для наблюдений. Расположите лампу так, чтобы собирающая линза давала ее изображение на расстоянии около метра от себя.

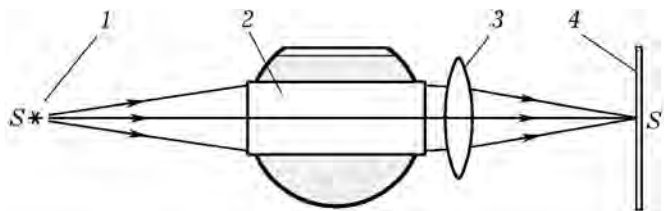


Рис. 4.6. Оптическая схема установки для опытов с рассеивающей псевдолинзой

Теперь нужно изготовить охлаждающую смесь. Хлористый кальций можно приобрести в аптеке или достать в школьном химическом кабинете. Принести снег или лед зимой — не пробле-

ма. Летом можно использовать лед из холодильника. Хлористый кальций и лед по отдельности раздробите в мелкий порошок и быстро смешайте в нужной пропорции в стакане. Получившуюся охлаждающую смесь залейте в резиновую грушу псевдолинзы.

Вы заметите, что по мере охлаждения боковой поверхности цилиндра из оргстекла изображение лампы на экране ухудшается. Передвиньте экран, увеличивая расстояние между ним и псевдолинзой: при определенном его положении вы вновь получите резкое изображение лампы. Следовательно, охлаждаемый с боковой поверхности цилиндр из оргстекла в самом деле работает как рассеивающая линза: совместно с собирающей он образует оптическую систему, фокусное расстояние которой больше, чем фокусное расстояние входящей в систему собирающей линзы.

Нетрудно сделать и более удобный прибор для опытов (рис. 4.7). Он должен состоять из камеры 1, снабженной сливной трубкой с краном 2. В стенках камеры посредством уплотнительных колец 3 из резины закреплен цилиндр 4 из оргстекла. Один из торцов цилиндра плоский, а второй выполнен в виде выпуклой сферической поверхности (можно оба торца цилиндра обработать так, чтобы они были слегка выпуклыми).

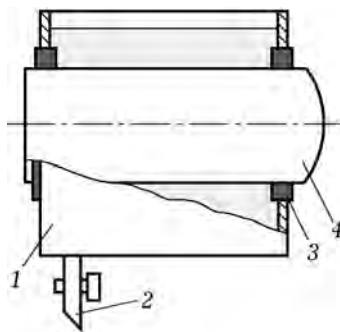


Рис. 4.7. Прибор для демонстрации собирающей и рассеивающей псевдолинз

Последнее сделано с той целью, чтобы исключить из установки отдельную собирающую линзу — роль ее будет выполнять выпуклый торец цилиндра. Для изготовления такого цилиндра нужно, ни о чем не думая и не стараясь специально сделать сферическую поверхность, отшлифовать и отполировать его торец. Работая, вы неизбежно будете немного наклонять цилиндр так, что его торец помимо вашей воли получится выпуклым (разумеется, при шлифовке и полировке нужно поворачивать цилиндр вокруг его оси).

Ставить опыты с описанным прибором следует так. При комнатной температуре с помощью цилиндра, выполняющего роль собирающей линзы, получают на экране изображение лампы накаливания. Затем заливают в камеру охлаждающую смесь. При этом фокусное расстояние цилиндра увеличивается и, чтобы опять получить изображение, экран приходится отодвигать от

псевдолинзы. После этого подставляют под кран камеры стакан и, открыв кран, заливают в камеру горячую воду. Когда охлаждающая смесь сольется в стакан, кран закрывают и камеру заполняют горячей водой. Это приводит к уменьшению фокусного расстояния цилиндра, в чем убеждаются, передвигая экран ближе к псевдолинзе.

Для самостоятельной проработки

1. **Справочник химика.** Том 1 / Под ред. *Б. П. Никольского*. — Л.–М.: Госхимиздат, 1962. — С. 1054.

2. *Кэй Д., Лэби Т.* **Справочник физика-экспериментатора.** — М.: ИЛ, 1949. — 299 с. (С. 291).

В этих справочниках приведены различные рецепты охлаждающих смесей, из которых вы сможете выбрать наиболее приемлемый для себя. Будет очень смешно, если вы поставите описанные в параграфе опыты и не догадаетесь просто посмотреть через рассеивающую псевдолинзу. Сделайте это в первую очередь! Рассеивающая псевдолинза должна давать уменьшенные изображения предметов, и в этом нужно убедиться.

4.4. Световой пучок внутри градиентной линзы

• В сущности вы уже хорошо представляете себе, как распространяется свет внутри собирающей псевдолинзы из оргстекла. Но описание еще одного опыта, наверное, не повредит, тем более, что опыт достаточно прост, а результат его красив и убедителен.

Из оргстекла толщиной 30 мм выпилите брусок оргстекла по размерам, указанным на рис. 4.8. Торцы бруска отшлифуйте и

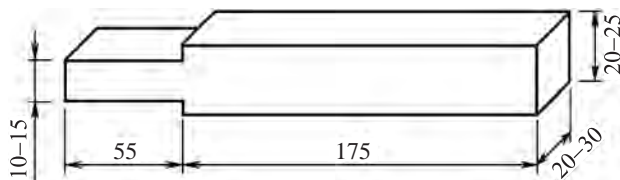


Рис. 4.8. Такой брусок из оргстекла удобен в опытах по наблюдению светового пучка внутри собирающей псевдолинзы

отполируйте. Сечение бруска в наиболее узкой его части, которая будет выполнять роль цилиндрической псевдолинзы, значительно больше поперечного сечения полосок из оргстекла, применявшихся в опытах по криволинейному распространению света (§ 2.8). Это позволяет проще получить красивый световой пучок внутри оргстекла. Заднюю поверхность бруска надо сделать матовой и покрасить белой краской с тем, чтобы на ней был виден след светового пучка.

Нагреватели можно сделать из резисторов типа ВС мощностью 2 Вт и сопротивлением 16 кОм. Каждый из двух нагревателей должен содержать по четыре резистора (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Нагреватели из радиотехнических резисторов: под левым нагревателем расположены изолирующие гетинаксовые пластинки

Резисторы нужно укрепить на текстолитовой пластинке размером $5 \times 50 \times 50$ мм и соединить между собой параллельно. Выводы резисторов можно изолировать тонкой пластинкой гетинакса размером $2 \times 50 \times 50$ мм. Нагреватели такой конструкции вы можете включать непосредственно в электроосветительную сеть напряжением 220 В. Чтобы нагреватели можно было питать от напряжения 36 В, их нужно изготовить из четырех параллельно соединенных резисторов того же типа ВС мощностью 2 Вт, но сопротивлением 620–1000 Ом каждый.

Электрические нагреватели описанной конструкции подойдут для многих опытов по криволинейному распространению света. Поэтому, если вы испытывали затруднения с нагревателями в предложенных ранее экспериментах, попробуйте приспособить эти. Не забывайте о необходимости соблюдения требований техники безопасности!

Внешний вид подготовленного к работе прибора показан на рис. 4.10. Вы видите, что нагреватели прижаты к оргстеклу

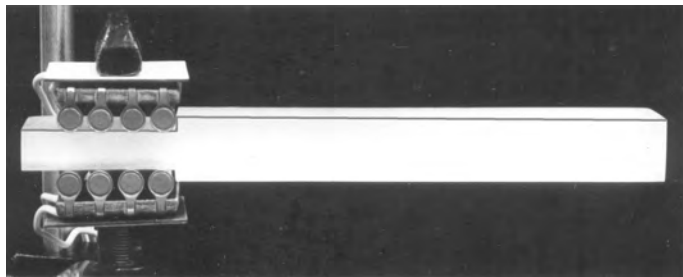


Рис. 4.10. Прибор для опытов по фокусировке света псевдолинзой

струбциной, которая зажата в лапке универсального штатива. Можно использовать и другое крепление, изготовленное из подручных средств. Проявите изобретательность!

● В полностью подготовленном приборе создайте параллельный или близкий к нему пучок света и включите нагреватели. Вы будете наблюдать, что по мере возникновения в оргстекле градиента температуры и, следовательно, градиента показателя преломления свет начинает фокусироваться. Спустя некоторое время фокусное расстояние получившейся цилиндрической псевдолинзы станет минимальным. Если вы и дальше оставите нагреватели включенными, то фокусное расстояние псевдолинзы начнет увеличиваться. Объяснить последний результат можно только уменьшением градиента показателя преломления: оргстекло с течением времени прогревается более или менее равномерно. Фотографии, иллюстрирующие опыт, приведены на рис. 4.11.

В условиях описанного эксперимента нетрудно оценить градиент показателя преломления в оргстекле. Для простоты будем считать, что искомый градиент постоянен вдоль оси x на всем протяжении сфокусированного пучка (рис. 4.12). Тогда согласно теореме Пифагора из треугольника AOF получаем

$$F^2 + \left(R - \frac{d}{2}\right)^2 = R^2,$$

где F — фокус и одновременно фокусное расстояние псевдолинзы (напомним, что на нее падает параллельный пучок света), R — радиус кривизны крайнего луча светового пучка, d — ширина падающего параллельного пучка света. После элементарных преобразований, пренебрегая малой по сравнению с другими величиной $(d/2)^2$, из предшествующей формулы получаем $R = F^2/d$. Поскольку радиус кривизны светового пучка, распространяющегося в оптически неоднородной среде, выражается через показатель преломления среды и градиент показателя преломления: $R = \frac{n}{dn/dy}$ (§ 1.4), то искомый градиент показателя преломления в направлении оси y

$$\frac{dn}{dy} = \frac{nd}{F^2}. \quad (4.1)$$

Вычислим величину градиента показателя преломления по данным одного из наших опытов. Они таковы: $d = 14$ мм, $F = 100$ мм (минимальное фокусное расстояние), показатель преломления оргстекла приблизительно $n = 1,5$. Подстановка этих значений в формулу (4.1) дает $dn/dy = 2,1 \cdot 10^{-3}$ мм $^{-1}$.

Проверим себя. Если считать градиент показателя преломления во всех точках оси y от середины до верхнего края

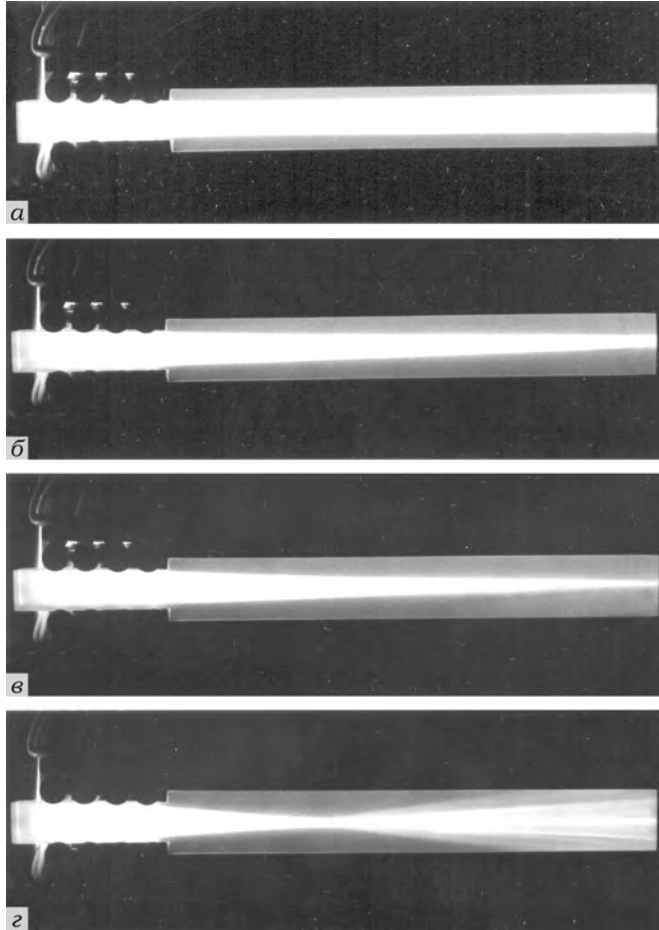


Рис. 4.11. На левый торец бруска (рис. 4.8) был пущен параллельный пучок света; фотографии показывают, как при включении нагревателей пучок постепенно фокусируется

псевдолинзы одинаковым, то изменение показателя преломления на указанном промежутке составляет

$$\Delta n = \Delta y \frac{dn}{dy} = \frac{d}{2} \frac{dn}{dy} = 1,5 \cdot 10^{-2}. \quad (4.2)$$

С другой стороны, вам хорошо известно, что температурный коэффициент показателя преломления оргстекла по абсолютной

величине $|dn/dT| = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ (§ 2.6). Принимая разницу между температурами осевой линии и края псевдолинзы в $\Delta T = 80 \text{ K}$, получим, что изменение показателя преломления

$$\Delta n = \left| \frac{dn}{dT} \right| \Delta T = 1,3 \cdot 10^{-2}. \quad (4.3)$$

Вы видите, что результаты оценок (4.2) и (4.3) по порядку величины неплохо согласуются между собой. Совпадение было

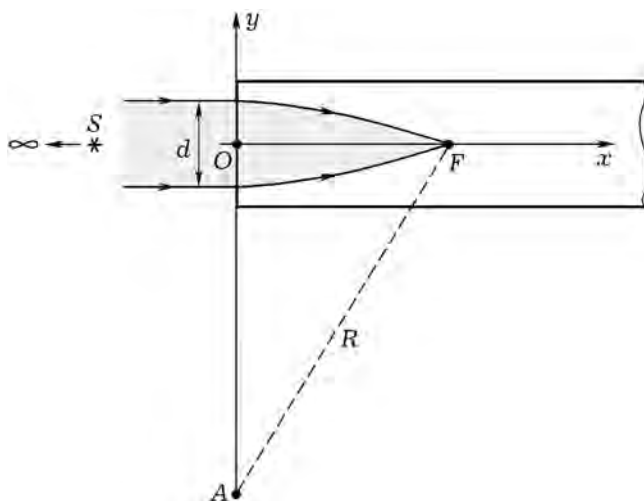


Рис. 4.12. К вычислению градиента показателя преломления в псевдолинзе

бы, конечно, более точным, если бы мы тщательнее просчитали и провели эксперимент. Думаю, нет необходимости подробно рассказывать, как это сделать: при желании вы сможете поставить перед собой соответствующую задачу и решить ее самостоятельно.

Для самостоятельной проработки

1. **Ландсберг Г. С. Оптика.** — М.: Физматлит, 2003. — 848 с. (С. 745–749).

2. **Пекара А. Новый облик оптики.** — М.: Советское радио, 1973. — 264 с. (С. 138–160).

В книгах изложены основы нелинейной оптики — современного раздела физики, который бурно развивается и в наши дни. Рекомендую вам разобраться в явлении самофокусировки света. Суть его, если говорить кратко, заключается в том, что достаточно интенсивный световой пучок (от мощного лазера), проходя через среду, делает ее оптически неоднородной, причем возникающий градиент показателя преломления

таков, что приводит к самофокусировке пучка света. Только что описанные опыты по фокусировке света оптически неоднородной средой можно рассматривать в качестве модельных экспериментов для явления самофокусировки света.

3. Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. — М.: Мир, 1981. — 544 с. (С. 338–365).

Рассмотрены изменение показателя преломления в поле интенсивного лазерного излучения, явления автоколлимации, самофокусировки и расфокусировки пучка лазерного света. Приведены экспериментальные результаты и теоретические сведения.

4.5. Простая демонстрация градиентной линзы

- Вы подробно исследовали различные градиентные линзы из оргстекла. Это удивительные приборы, опыты с которыми производят сильное впечатление. Но учебные опыты особенно хороши тогда, когда экспериментальные установки отличаются максимальной простотой, проведение опыта занимает минимальное время, а объяснение его результата понятно любому желающему разобраться в явлении. Попробуйте создать такой учебный эксперимент, который удовлетворяет перечисленным критериям.

- Возможный вариант требуемого учебного эксперимента понятен из рис. 4.13, на котором схематически в обозначенной цифрами последовательности показано все, что требуется для подготовки, постановки и объяснения опыта.

Вначале нужно подобрать или сделать цилиндр из оргстекла с плоскими параллельными прозрачными торцами. Мы рекомендуем цилиндр диаметром 20 мм и длиной 60 мм. Однако чем меньше диаметр цилиндра, тем проще достать оргстекло и легче поставить опыт, но и менее эффектен его результат.

Для удобства из резины (от автомобильной камеры) толщиной 2–3 мм вырезают полоску размером 60 × 120 мм. Пробковым сверлом в полоске делают отверстие и вставляют в него цилиндр из оргстекла.

На стол ставят лампу накаливания, желательно с фигурной нитью. На расстоянии примерно два метра от нее располагают белый экран. В стакане кипятят воду, используя электроплитку или электрокипятильник.

Опыт проводят следующим образом. Вначале на расстоянии около полуметра от лампы помещают цилиндр и показывают, что на экране возникает обычная тень с округлым пятном, образованным светом, прошедшим сквозь цилиндр. Затем цилиндр опускают на 15–20 с в только что вскипевшую воду, достают

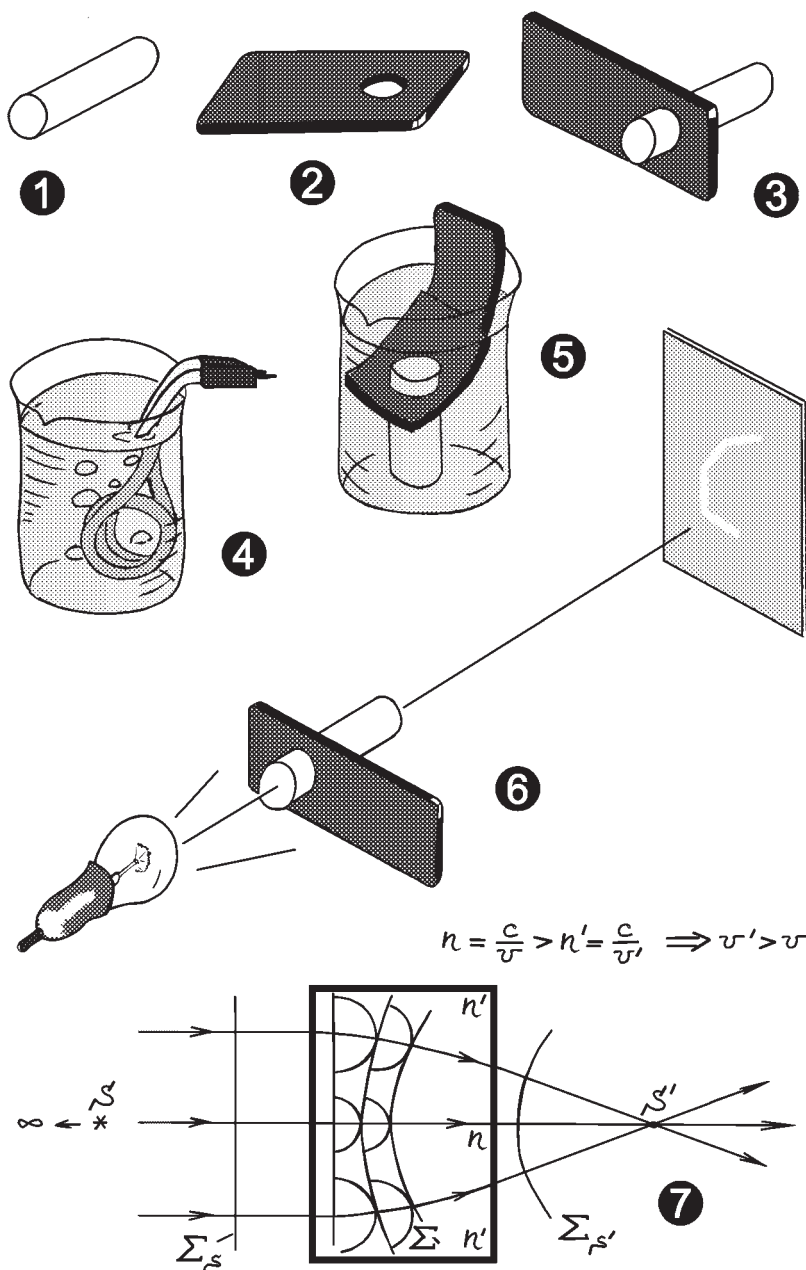


Рис. 4.13. Изготовление, демонстрация и объяснение простейшей градиентной линзы

из воды, быстро обтирают чистой тряпочкой и вновь помещают между лампой и экраном. При этом наблюдают, что на экране возникает резкое изображение спирали лампы! Результат опыта объясняют, как показано на рис. 4.13, с помощью принципа Гюйгенса.

Для самостоятельной проработки

1. Демонстрация, проще которой не может быть. Демонстрация может быть еще упрощена, если отказаться от резинового держателя градиентной линзы: в этом случае цилиндр из оргстекла берут двумя пальцами вблизи его торца и вертикально погружают в горячую воду так, чтобы в воздухе осталась его часть длиной около 5 мм. Далее, как обычно, сухой чистой салфеткой протирают цилиндр и пока он не охладился, демонстрируют градиентную линзу. Попробуйте!

Глава 5

ОСНОВЫ ОПТИКИ
СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

Полистав несколько следующих страниц, иной читатель может упрекнуть автора за то, что в предназначенной для старшеклассников книге он пишет интегралы. Автор, конечно, смущен, но не испытывает особых угрызений совести: да, эта глава в теоретическом плане существенно сложнее остальных, но зато какие изумительные явления в ней рассматриваются! Хотите с ними познакомиться поближе — нужно немного поработать, и не только руками, но и головой. Впрочем, было бы ошибкой дополнительно пугать вас: все эти «страшные» формулы в общем-то вполне элементарны, и если не сейчас, то через год–другой, когда вы немного подучитесь в институте, станут вам близки и понятны. Тем же из вас, кто испытывает отвращение к любым формулам (не надо слишком стыдиться этого — Фарадей их тоже не очень жаловал), советуем читать главу с конца: модельные опыты, описанные в ней, по-прежнему вполне доступны и, если не гнаться за изготовлением относительно сложных установок, все без исключения могут быть поставлены даже в домашних условиях.

Теперь несколько слов конкретно о том, чем мы будем заниматься. В оптически неоднородных средах показатель преломления может изменяться по различным законам в разных направлениях. Здесь мы ограничиваемся самым простым случаем, когда показатель преломления среды изменяется только в одном направлении. Такие среды получили название *слоисто-неоднородных*¹⁾, и именно с ними мы будем работать. Нас

¹⁾ Строго говоря, слоисто-неоднородными называют такие оптически неоднородные среды, в которых равные значения показателя преломления образуют слои. Если эти слои плоскопараллельны, то есть если показатель преломления среды зависит только от одной координаты декартовой системы, то среду называют *плоскостройной*. Значит, фактически мы будем рассматривать здесь плоскослоистые среды. Но этот термин, на наш взгляд, не совсем подходит для учебных целей, и, поскольку путаницы не может возникнуть, в дальнейшем мы его не используем.

в первую очередь интересует возможность получения аналитического выражения для светового луча в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления. Кроме того, мы займемся физическим и компьютерным моделированием распространения света в таких средах.

Пожалуй, то, что нужно, уже сказано, и пора приступать к делу. Автор еще раз просит не бояться трудностей: при должной настойчивости они вполне преодолимы.

5.1. Распространение света в слоисто-неоднородной среде

• Представим себе оптически неоднородную среду, показатель преломления n которой является функцией только одной координаты y :

$$n = n(y). \quad (5.1)$$

Такая среда, как уже отмечалось, называется слоисто-неоднородной, и примерами ее могут служить земная атмосфера, показатель преломления которой в нормальных условиях уменьшается с высотой, брусок из оргстекла, соприкасающийся одной из своих граней с плоским нагревателем, и т. д. Выясним, как распространяется свет в подобной среде.

Пусть в точке $S(0, y_1)$ среды находится точечный источник света, испускающий лучи по всевозможным направлениям (рис. 5.1). Выберем из расходящегося пучка произвольный луч, идущий под углом $\varphi_1 < \pi/2$ к оси y (этот угол будем называть углом входа луча в слоисто-неоднородную среду), и найдем траекторию выбранного луча. Разобьем оптически неоднородную среду на плоскопараллельные слои, перпендикулярные оси y и на-

столько тонкие, что в пределах каждого слоя показатель преломления можно считать постоянным. Тогда допустимо представление, что внутри каждого из слоев свет движется прямолинейно,

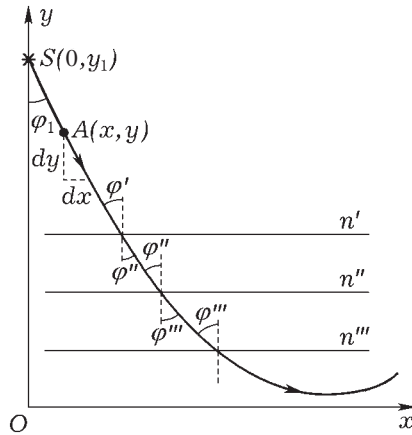


Рис. 5.1. К выводу уравнения траектории светового луча в слоисто-неоднородной среде

а на границах между соседними слоями преломляется так, что траектория светового луча представляет собой ломаную линию. Согласно закону преломления

$$\frac{\sin \varphi'}{\sin \varphi''} = \frac{n''}{n'}, \quad \frac{\sin \varphi''}{\sin \varphi'''} = \frac{n'''}{n''}, \dots,$$

или,

$$n' \sin \varphi' = n'' \sin \varphi'' = n''' \sin \varphi''' = \dots$$

Мы видим, что хотя показатель преломления и угол падения от слоя к слою изменяются, но их произведение остается постоянным.

Если теперь толщины всех слоев устремить к нулю, то в пределе вместо ломаной мы получим криволинейную траекторию светового луча. Очевидно, что в этом случае произведение показателя преломления $n(y)$ на синус угла φ между траекторией луча и направлением, параллельным оси y , во всех точках траектории остается неизменным:

$$n(y) \sin \varphi = m, \quad (5.2)$$

где m — некоторая постоянная. Физический смысл постоянной m достаточно прост: это значение показателя преломления в той плоскости среды (если, конечно, для данного луча она существует), в точках которой $\sin \varphi = 1$, то есть там, где световой луч направлен перпендикулярно оси y .

Для произвольной точки A траектории (рис. 5.1) можно написать

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{dx}{dy}. \quad (5.3)$$

Поскольку

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - \sin^2 \varphi}},$$

из формул (5.3) и (5.2) следует, что

$$\frac{dx}{dy} = -\frac{m}{\sqrt{n^2(y) - m^2}}. \quad (5.4)$$

Интегрирование этого дифференциального уравнения дает

$$x = \int_0^x dx = -m \int_{y_1}^y \frac{dy}{\sqrt{n^2(y) - m^2}}. \quad (5.5)$$

Мы получили общее уравнение траектории светового луча в слоисто-неоднородной среде. Как и следовало ожидать, чтобы

определить конкретный вид траектории, необходимо знать, по какому именно закону (5.1) изменяется показатель преломления среды. Тогда, подставив в формулу (5.5) конкретную зависимость $n = n(y)$, можно попытаться вычислить интеграл и записать уравнение траектории луча в явном виде $y = y(x)$. Однако кое-что о распространении света в слоисто-неоднородной среде можно выяснить и без этого. Нетрудно, например, определить, в какую сторону изгибается световой луч и вычислить радиус кривизны его траектории. Попробуйте сделать это самостоятельно.

● Чтобы узнать, в какую сторону изгибается световой луч при распространении в слоисто-неоднородной среде, выясним, в какую сторону выпукла траектория этого луча. Из курса математического анализа известно, что функция $y = y(x)$ выпукла вниз, если вторая производная ее $d^2y/dx^2 > 0$, и выпукла вверх, если $d^2y/dx^2 < 0$. Производя дифференцирование по x производной dy/dx , выраженной из формулы (5.4), имеем

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{1}{2m} \frac{2n(y)}{\sqrt{n^2(y) - m^2}} \frac{dn}{dy} \frac{dy}{dx}.$$

Исключая из последней формулы dy/dx , получаем

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{n(y)}{m^2} \frac{dn}{dy}. \quad (5.6)$$

Производная dn/dy имеет простой физический смысл: это быстрая или скорость изменения показателя преломления среды в направлении оси y , то есть градиент показателя преломления $dn/dy = \text{grad } n$.

Поскольку отношение $n(y)/m^2 > 0$, то выпуклость или вогнутость траектории луча определяется знаком градиента показателя преломления. Если $dn/dy > 0$, то траектория распространения света выпукла вниз, если $dn/dy < 0$, то она выпукла вверх. Но при $dn/dy > 0$ показатель преломления среды увеличивается с ростом координаты y , поэтому можно сделать вывод, что траектория светового луча всегда выпукла в сторону уменьшающихся значений показателя преломления. Иными словами, при распространении в слоисто-неоднородной среде световой луч изгибается, отклоняясь в сторону увеличивающихся значений показателя преломления. Это схематически показывает рис. 5.2, на котором увеличивающаяся оптическая плотность среды условно обозначена возрастом плотности окраски.

Найдем теперь радиус кривизны светового луча. Если траектория луча описывается функцией $y = y(x)$, то, как известно,

радиус кривизны ее

$$R = \frac{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}}{d^2y/dx^2}. \quad (5.7)$$

Нам не известна функция $y = y(x)$, но зато мы знаем выражения для ее производных dy/dx (см. (5.4)), d^2y/dx^2 (см. (5.6)).

Подставляя эти выражения в формулу (5.7), получаем

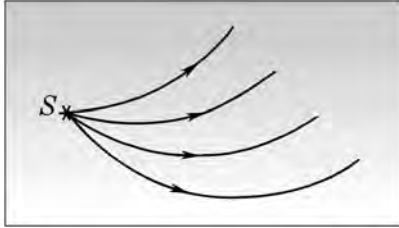
$$R = \frac{n^2(y)}{m \, dn/dy}.$$

Вспоминая, что $m = n \sin \varphi$ (см. (5.2)), можно сделать вывод, что искомый радиус кривизны траектории луча

$$R = \frac{n(y)}{\sin \varphi \cdot dn/dy}. \quad (5.8)$$

Напомним, что φ — это угол между лучом и направлением, параллельным оси y в той точке траектории,

Рис. 5.2. Если оптическая плотность слоисто-неоднородной среды монотонно увеличивается снизу вверх, то световые лучи, выходящие из точечного источника по разным направлениям, изгибаются вверх



в которой определяется радиус кривизны. Пользуясь выведенной формулой, можно вычислить минимальный радиус кривизны траектории луча, значение которого получим, положив $\sin \varphi = 1$:

$$R = \frac{n}{dn/dy}. \quad (5.9)$$

Таким образом, наибольшее искривление светового луча наблюдается, когда $\sin \varphi = 1$ или $\varphi = \pi/2$, то есть в той точке, где направление распространения света перпендикулярно оси y . Иными словами, искривление максимально в той точке траектории, в которой луч перпендикулярен направлению градиента показателя преломления среды. Этому максимальному искривлению соответствует минимальный радиус кривизны, который равен отношению показателя преломления среды к градиенту показателя преломления (см. § 1.4).

В оптически однородной среде градиент показателя преломления равен нулю, а радиус кривизны траектории луча — бесконечности. Значит, в такой среде свет распространяется прямолинейно. При падении на границу раздела двух оптически однородных сред свет в общем случае частично отражается, скачком изменяя направление своего распространения. Согласно формуле (5.9) это объясняется тем, что на границе раздела сред

градиент показателя преломления равен бесконечности и радиус кривизны луча в точке падения, следовательно, равен нулю.

Для самостоятельной проработки

1. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. — М.: Наука, 1973. — 343 с.

В этой книге известного советского ученого дано, как он сам пишет в предисловии, «систематическое изложение теории распространения упругих и электромагнитных волн в слоистых средах». Книга не проста и вряд ли окажется доступной каждому из вас. Тем не менее знать, что она существует, вы должны. Автор будет польщен, если среди его читателей найдутся такие, которые настолько заинтересуются оптикой неоднородных сред, что им потребуется книга Л. М. Бреховских.

5.2. Среда с постоянным градиентом показателя преломления

● Сколь бы сложна зависимость показателя преломления n среды от координаты y ни была (5.1), в первом приближении для ограниченной области ее всегда можно считать линейной:

$$n = n_0 + ky, \quad (5.10)$$

где n_0 — значение показателя преломления в точках среды с координатами $y = 0$, $k = dn/dy$ — постоянный градиент показателя преломления. Найдите аналитическое выражение для траектории светового луча в среде, показатель преломления которой изменяется по закону (5.10). Постройте график найденной вами функции.

● В формуле (5.5) произведем замену переменной, перейдя от y к n :

$$x = -m \int_{y_1}^y \frac{dy}{\sqrt{n^2(y) - m^2}} = -\frac{m}{k} \int_{n_1}^n \frac{dn}{\sqrt{n^2(y) - m^2}},$$

где n_1 — показатель преломления среды в точках с координатами y_1 : $n_1 = n_0 + ky_1$. Если воспользоваться подстановкой $n = m \operatorname{ch} z$, то нетрудно убедиться, что первообразная последнего интеграла равна гиперболическому аркаосинусу. Поэтому

$$x = -\frac{m}{k} \operatorname{arch} \frac{n}{m} \Big|_{n_1}^n = -\frac{m}{k} \left(\operatorname{arch} \frac{n}{m} - \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \right).$$

Отсюда

$$\operatorname{arch} \frac{n}{m} = -\frac{k}{m} x + \operatorname{arch} \frac{n_1}{m}.$$

Взяв от обеих частей этой формулы гиперболический косинус, получаем

$$n = m \operatorname{ch} \left(-\frac{k}{m} x + \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \right).$$

Учитывая закон (5.10) и принимая во внимание четность гиперболического косинуса, перепишем предыдущую формулу в виде

$$y = -\frac{n_0}{k} + \frac{m}{k} \operatorname{ch} \left(\frac{k}{m} x - \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \right). \quad (5.11)$$

Полученное уравнение в явном виде описывает траекторию распространения света в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления.

Функция (5.11) является гиперболическим косинусом. Чтобы примерно построить ее график, найдем координаты минимума этой функции. Дифференцируя функцию (5.11) по координате x , получаем

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{sh} \left(\frac{k}{m} x - \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \right). \quad (5.12)$$

Приравняв эту производную к нулю, обнаруживаем, что указанное равенство будет выполняться, если

$$\frac{k}{m} x - \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} = 0.$$

Отсюда абсцисса минимума (на графике будем обозначать его точкой M)

$$x_M = \frac{m}{k} \operatorname{arch} \frac{n_1}{m}. \quad (5.13)$$

Подставив это значение абсциссы в уравнение (5.11), найдем ординату той же точки M :

$$y_M = \frac{-n_0 + m}{k}. \quad (5.14)$$

Гиперболический косинус симметричен относительно вертикальной оси, проходящей через точку минимума M . Поскольку точка $S(0, y_1)$ принадлежит графику функции (5.11), следовательно, ему принадлежит и точка $N(x_1, y_1)$, где $x_1 = 2x_M$. Построив в декартовой системе координат

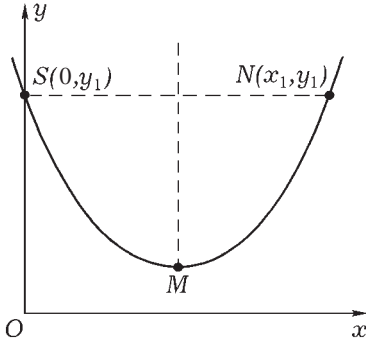


Рис. 5.3. График гиперболического косинуса — наглядное изображение траектории распространения света в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления

нат точки S , M и N , вы сумеете приблизительно нарисовать график функции (5.11), как это показано на рис. 5.3.

Можно действовать и иначе. Гиперболический косинус

$$y = \operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (5.15)$$

имеет график, обозначенный на рис. 5.4 цифрой 1. Функция (5.11) может быть переписана в виде

$$y = -\frac{n_0}{k} + \frac{m}{k} \operatorname{ch} \left[\frac{k}{m} \left(x - \frac{m}{k} \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \right) \right]. \quad (5.16)$$

Чтобы из графика функции (5.15) «изготовить» график функции (5.16), нужно график (5.15) «умножить» на m/k ; полученную

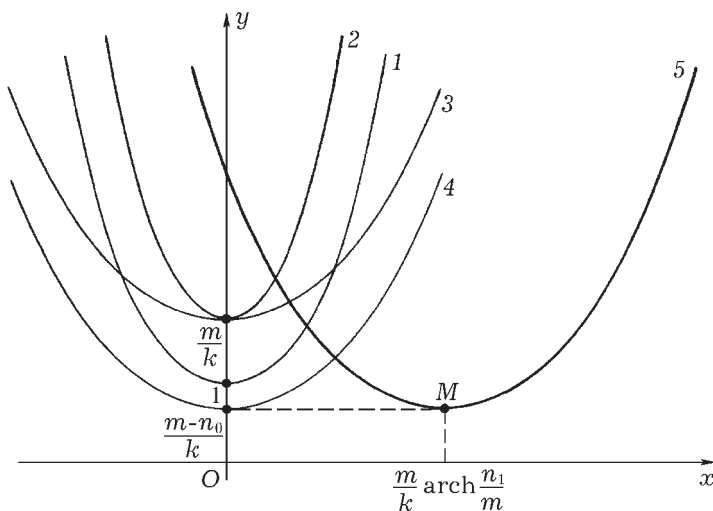


Рис. 5.4. Преобразования графика гиперболического косинуса

кривую 2 «растянуть» по направлению оси x в m/k раз; получившийся график 3 сместить вниз на величину n_0/k ; и, наконец, график 4 перенести вправо на величину $(m/k) \operatorname{arch}(n_1/m)$. В результате получится график 5, который и требовалось построить.

Для самостоятельной проработки

1. Гельфанд И. М., Глаголева Е. Г., Шноль Э. Э. **Функции и графики (основные приемы)**. — М.: Наука, 1973. — 96 с.

2. Егеров В. К., Радунский Б. А., Тальский Д. А. **Методика построения графиков функций**. — М.: Высшая школа, 1967. — С. 79, 80.

«Подсовывая» в качестве эксперимента свою рукопись студентам, автор с изумлением обнаружил, что никакие сведения из математического анализа, используемые в ней, не вызывают таких затруднений,

как элементарный метод построения графиков функций. Рекомендуемые книги позволят вам освежить свои знания в этой области.

2. Среда с линейной зависимостью квадрата показателя преломления от координаты. Подобные среды чаще анализируются в литературе, чем рассмотренная нами. Докажите, что в слоисто-неоднородной среде с таким законом распределения показателя преломления траектории распространения света представляют собой параболы.

3. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. — М.: Наука, 1980. — 304 с. (С. 126–140).

Эта книга поможет вам выполнить предыдущее задание и к тому же познакомит с современным состоянием теории интересующих нас вопросов.

5.3. Моделирование светового луча цепной линией

• Несколько отвлечемся от оптики и вспомним статику. Представим себе гибкую однородную нерастяжимую и тяжелую нить, концы которой закреплены в точках A и B , расположенных на горизонтальной прямой. Если длина нити больше расстояния AB , нить провиснет. Найдем уравнение, описывающее положение провисшей нити.

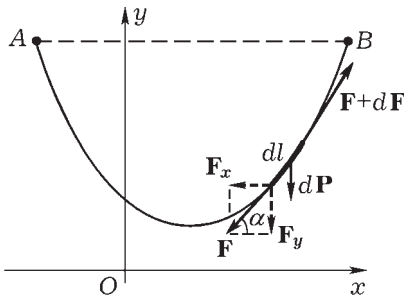


Рис. 5.5. К выводу уравнения провисающей нити

Для этого обозначим массу единицы длины нити через ρ . Сила тяжести, действующая на элемент длиной dl нити,

$$dP = \rho g dl, \quad (5.17)$$

где g — ускорение свободного падения. Поскольку нить находится в равновесии, сумма сил, действующих на любой ее элемент dl , равна нулю (рис. 5.5):

$$dP + \mathbf{F} + (\mathbf{F} + d\mathbf{F}) = 0,$$

где \mathbf{F} и $\mathbf{F} + d\mathbf{F}$ — силы натяжения нити. Переходя от векторного уравнения к уравнениям в проекциях, получаем

$$\begin{aligned} -F_x + (F_x + dF_x) &= 0, \\ -F_y + (F_y + dF_y) - dP &= 0. \end{aligned}$$

Отсюда $dF_x = 0$ (то есть $F_x = \text{const}$) и $dF_y = dP$.

Из рисунка видно, что $dy/dx = \text{tg } \alpha = F_y/F_x$. Дифференцируя эту формулу по x и учитывая, что $F_x = \text{const}$, а $dF_y = \rho g dl$,

получаем

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{F_x} \frac{dF_y}{dx} = \frac{\rho g}{F_x} \frac{dl}{dx}.$$

Так как $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2}$ или $dl/dx = \sqrt{1 + (dy/dx)^2}$, то обозначив $F_x/\rho g = a$, получаем дифференциальное уравнение

$$a \frac{d^2 y}{dx^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}. \quad (5.18)$$

Проинтегрировать уравнение можно, воспользовавшись подстановкой $dy/dx = \text{sh } z$. Тогда $d^2 y/dx^2 = \text{ch } z \cdot dz/dx$.

Принимая во внимание, что $1 + \text{sh}^2 x = \text{ch}^2 x$, уравнение (5.18) приводим к виду $a dz/dx = 1$. Отсюда

$$z = \frac{1}{a} x + C_1, \quad \frac{dy}{dx} = \text{sh} \left(\frac{1}{a} x + C_1 \right).$$

Поэтому окончательно получаем

$$y = a \text{ch} \left(\frac{x}{a} + C_1 \right) + C_2. \quad (5.19)$$

Чтобы определить постоянные интегрирования C_1 и C_2 , нужно использовать какие-нибудь начальные условия. Делать этого мы не станем по той простой причине, что главный результат нами уже получен.

Действительно, сравнение формул (5.19) и (5.11) показывает, что кривая, по которой провисает нить, описывается тем же самым уравнением, что и траектория распространения света в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления. Это позволяет использовать провисшую нить в качестве физической модели траектории светового луча. Попробуйте изготовить такую модель.

● Казалось бы, все просто: нужно взять, например, деревянную рейку, расположить ее горизонтально и привязать к рейке концы нити так, чтобы расстояние между точками крепления оказалось меньше длины нити. Однако если вы попытаетесь сделать это, воспользовавшись обычной швейной ниткой, то скорее всего, ничего хорошего не выйдет: нить, конечно, провиснет, но кривая будет мало походить на гиперболический косинус. Вы можете попробовать заменить нить веревкой, проволокой, резиновой трубкой и т. п. — все равно результат будет малоудовлетворительным, поскольку вместо плавной кривой вы получите кривую со множеством перегибов.

Поэкспериментировав, вскоре вы догадаетесь, что неудача объясняется чрезмерной легкостью обычной нити. Стоит нить намочить в воде, как она станет провисать нужным образом. Но

намокшая нить — не совсем подходящая модель светового луча, во-первых, потому, что с ней неудобно работать, а во-вторых, потому, что она неоднородна по плотности (под действием силы тяжести вода стекает по нити вниз и, собираясь в ее нижней части, искажает картину провисания). Таким образом, простые опыты убеждают вас в том, что нить действительно должна быть тяжелой, однородной, гибкой и нерастяжимой. Теперь уже нетрудно сообразить, что в качестве такой нити лучше всего использовать цепочку. К слову сказать, именно поэтому график гиперболического косинуса получил название *цепной линии*. Подходящую цепочку вы без особых трудностей сможете сделать самостоятельно. Для этого нужно виток к витку накрутить медную проволоку на цилиндрический стержень диаметром 3–4 мм, затем разрезать получившуюся спираль на отдельные кольца и, наконец, из колец собрать цепочку. Практика, однако, показывает, что для моделирования световых лучей в слоисто-неоднородной среде наилучшим образом подходят тонкие цепочки

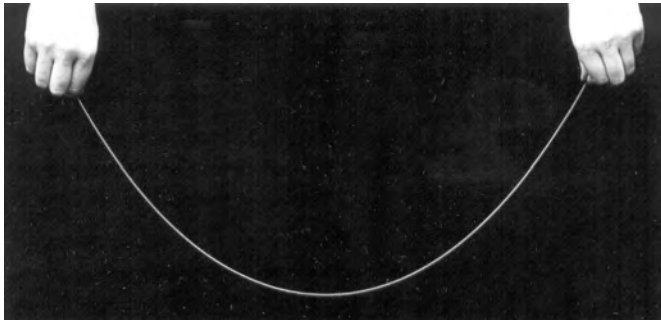


Рис. 5.6. Тонкая металлическая цепочка позволяет смоделировать световой луч в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления

женских украшений. На рис. 5.6 приведена фотография модели светового луча, изготовленной из такой цепочки (наибольший размер отдельного ее звена составляет около 2 мм).

Для самостоятельной проработки

1. Янпольский А. Р. Гиперболические функции. — М.: Физматгиз, 1960. — 196 с.

В предлагаемой вашему вниманию книге собраны сведения о гиперболических функциях и их применениях при решении различных задач математики, геометрии, механики и физики. Книга окажется полезной тем из вас, кто решил ближе познакомиться с гиперболическими функциями и их свойствами.

5.4. Моделирование пучка лучей цепными линиями

• Пусть в точке $S(0, y_1)$ слоисто-неоднородной среды с постоянным градиентом показателя преломления находится источник света, испускающий лучи по всевозможным направлениям в пределах угла φ_1 от 0 до $\pi/2$. Мы хотим смоделировать пучок лучей цепными линиями. Чтобы решить эту задачу, выберем из пучка произвольный луч, выходящий из источника под углом φ_1 к оси y , и найдем длину l такой нити, чтобы при закреплении ее концов в точках $S(0, y_1)$ и $N(x_1, y_1)$ провисшая нить совпала с траекторией выбранного луча (см. рис. 5.3).

Запишем уравнение светового луча в среде с постоянным градиентом показателя преломления (5.11):

$$y = -\frac{n_0}{k} + \frac{m}{k} \operatorname{ch} \left(\frac{k}{m} x - \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \right).$$

Подставив в это уравнение ординату y_1 точки N , найдем абсциссу x_1 этой точки:

$$x_1 = \frac{m}{k} \left(\operatorname{arch} \frac{ky_1 + n_0}{m} + \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \right) = 2 \frac{m}{k} \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \quad (5.20)$$

[здесь использовано соотношение $n_1 = n_0 + ky_1$ (см. (5.10))]. Длину дуги кривой $y = y(x)$ между точками S и N , как известно, можно найти следующим образом:

$$l = \int_0^{x_1} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} dx.$$

Подставляя сюда значение производной dy/dx из (5.12) и принимая во внимание, что $1 + \operatorname{sh}^2 z = \operatorname{ch}^2 z$, получаем

$$\begin{aligned} l &= \int_0^{x_1} \sqrt{1 + \operatorname{sh}^2 \left(\frac{k}{m} x - \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \right)} dx = \int_0^{x_1} \operatorname{ch} \left(\frac{k}{m} x - \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \right) dx = \\ &= \frac{m}{k} \operatorname{sh} \left(\frac{k}{m} x - \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} \right) \Big|_0^{x_1} = 2 \frac{m}{k} \operatorname{sh} \operatorname{arch} \frac{n_1}{m}. \quad (5.21) \end{aligned}$$

Учитывая, что $\operatorname{sh} z = \sqrt{\operatorname{ch}^2 z - 1}$ и $m = n_1 \sin \varphi_1$ (см. (5.2)), из последней формулы получаем искомую длину дуги цепной линии между точками S и N :

$$l = 2 \frac{m}{k} \sqrt{\frac{n_1^2}{m^2} - 1} = 2 \frac{n_1}{k} \cos \varphi_1. \quad (5.22)$$

Теперь вы владеете всем необходимым, чтобы построить модель пучка лучей, распространяющихся в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления. Сделайте это.

• Лист фанеры или толстого картона размером примерно 50×80 см обтяните черной тканью и установите его вертикально. Остро отточенным мелом начертите на ткани горизонтальную и вертикальную прямые. В точку пересечения их вбейте небольшой гвоздик без шляпки. Эта точка будет моделировать источник света, поэтому для определенности обозначим ее S . От вертикальной прямой постройте углы φ_1 с вершинами в точке S . Значения углов φ_1 , если вы не ставите какой-нибудь специальной задачи, могут быть произвольными, например, 80° , 70° , 60° и т. д. Переписав формулу (5.22) в виде

$$l = l_0 \cos \varphi_1, \quad (5.23)$$

выберите длину цепочки l_0 , соответствующую нулевому углу входа света в слоисто-неоднородную среду. Для каждого из выбранных вами углов φ_1 по формуле (5.23) рассчитайте соответствующую длину цепочки l . На вбитый в точку S гвоздик наденьте концы цепочек нужных длин и, взяв свободный конец любой цепочки в руку, перемещайте его по горизонтальной прямой до тех пор, пока касательная к цепочке в точке S не совпадет со стороной соответствующего длине взятой цепочки угла. Булавкой прикрепите к ткани на горизонтальной прямой тот конец цепочки, нужное положение которого вы нашли. Проведите описанную операцию со всеми оставшимися цепочками, и у вас получится модель пучка лучей, выходящих из точки S .

Вполне возможно, что точность построенной модели не совсем удовлетворит вас, так как на глаз трудно определить, совпадает ли сторона угла с касательной к цепной линии или нет. В таком случае нужно рассчитать координаты x_1 концов цепочек разных длин на горизонтальной прямой.

Из формулы (5.21) следует, что

$$\operatorname{sh} \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} = \frac{k}{2m} l \quad \text{или} \quad \operatorname{arch} \frac{n_1}{m} = \operatorname{arsh} \frac{k}{2m} l.$$

Подстановка этого выражения в формулу (5.20) дает

$$x_1 = 2 \frac{m}{k} \operatorname{arsh} \frac{k}{2m} l.$$

Поскольку $l = l_0 \cos \varphi_1$ (см. (5.23)), причем $l_0 = 2n_1/k$ (см. (5.22)), а $m = n_1 \sin \varphi_1$ (см. (5.2)), из последней формулы

получаем

$$x_1 = l_0 \sin \varphi_1 \cdot \operatorname{arsh} \operatorname{ctg} \varphi_1. \quad (5.24)$$

Микрокалькулятор позволяет в течение нескольких минут по формулам (5.23) и (5.24) вычислить для каждого угла φ_1 длину цепочки и координату точки закрепления второго ее конца. Результаты такого расчета для $l_0 = 800$ мм сведены в табл. 1.

Таблица 1

φ_1 , град	l , мм	x_1 , мм	φ_1 , град	l , мм	x_1 , мм
0	800	0	40	610	520
10	790	340	50	510	470
20	750	480	60	400	380
30	690	530	70	270	260

На рис. 5.7 представлена фотография описанной модели, которая показывает, что любые два луча, выходящие из одной точки S под разными, но достаточно большими углами φ_1' и φ_1'' ,

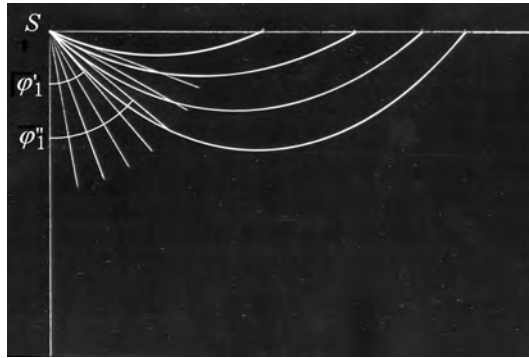


Рис. 5.7. Модель пучка лучей, распространяющихся в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления

при распространении в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления нигде больше, кроме точки S , не пересекаются. Заметим, что аналитически получить этот результат отнюдь не просто, что лишний раз подчеркивает возможности физического моделирования. Ход лучей, подобный смоделированному, нередко имеет место в реальных условиях при возникновении миража. Мысленно поместите свой глаз на пути одного из лучей так, чтобы свет входил в его зрачок. Тогда источник света вы увидите по направлению касательной

к лучу в точке пересечения его со зрачком, то есть смещенным относительно истинного положения.

На рис. 5.8 представлена последовательная серия фотографий модели светового пучка, в котором постепенно уменьшается угол входа лучей в слоисто-неоднородную среду. Эта серия показывает, что при достаточно малом угле входа данный световой луч обязательно пересечет такой луч, который имеет больший угол входа (рис. 5.8 б, в). Если вы поместите свой глаз в точку пересечения двух лучей и будете смотреть в направлении, противоположном направлению распространения света, то вместо одного источника увидите два, смещенные относительно реального положения источника.

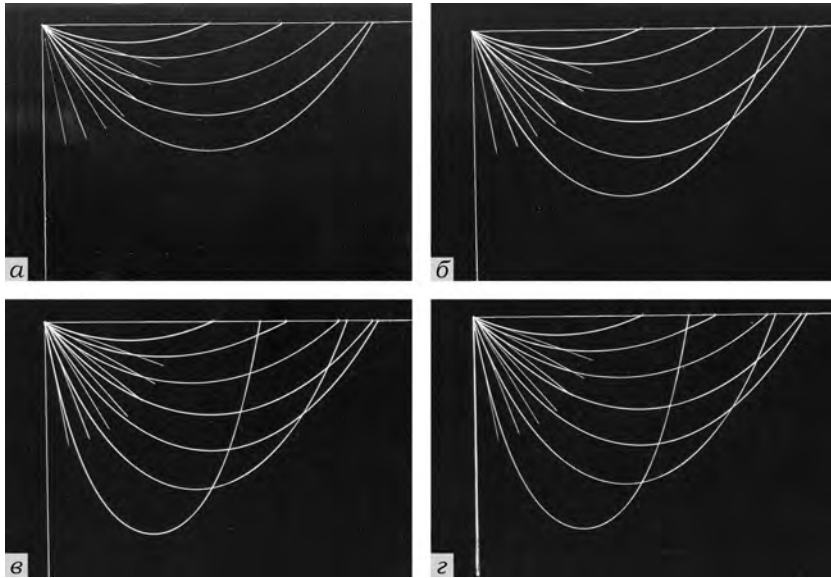


Рис. 5.8. Модель пучка лучей: а — при больших углах входа в слоисто-неоднородную среду световые лучи не пересекаются; б, в — при уменьшении угла входа наблюдаются пересечения лучей; г — при нулевом угле входа световой луч отражается обратно и идет по тому же направлению, в котором он падал

Особый интерес представляет модель, фотография которой приведена на рис. 5.8 г. Здесь вы видите, что если угол входа света в слоисто-неоднородную среду равен нулю, то свет, углубившись в эту среду, полностью отражается от определенной ее точки и возвращается назад. Эта ситуация требует небольшого анализа. Из формулы (5.22) следует, что при $\varphi_1 = 0$ луч света до точки отражения пройдет расстояние $l/2 = n_1/k$. Координата

точки, до которой дойдет свет, очевидно, равна $y = y_1 - n_1/k$. Поскольку показатель преломления среды изменяется по закону (5.10): $n = n_0 + ky$, то его значение в точке отражения составляет $n = n_0 + k(y_1 - n_1/k) = n_0 + ky_1 - n_1$. Но n_1 — это значение показателя преломления в точках с координатами y_1 , то есть $n_1 = n_0 + ky_1$. Поэтому показатель преломления среды в точке отражения луча $n = 0$. Таким образом, изображенный на рис. 5.8 г ход лучей будет иметь место в среде, показатель преломления которой изменяется от нуля по линейному закону (5.10).

Свыкшемуся с элементарной оптикой читателю кажется, что таких экзотических сред нет, а значит, проделанные рассуждения представляют собой бесполезную игру в формулы. Однако если мы отвлечемся от чистой оптики и обратимся к родственным явлениям распространения радиоволн, то легко убедимся не только в познавательной, но и в практической важности полученных результатов. Действительно, если электромагнитная волна распространяется в ионизованном газе, то в первом приближении показатель преломления такой среды

$$n = \sqrt{1 - \frac{e^2 N}{m \varepsilon_0 \omega^2}}, \quad (5.25)$$

где e — заряд, m — масса электрона, N — концентрация свободных электронов (число электронов в единице объема), ε_0 — электрическая постоянная, ω — круговая частота волны. Из этой формулы следует, что показатель преломления ионизованного газа сильно зависит от частоты электромагнитной волны и при некотором значении частоты может обратиться в нуль.

В земной атмосфере плотность воздуха с ростом высоты уменьшается, и это приводит к непрерывному уменьшению показателя преломления. Если бы атмосфера просто переходила в вакуум, то показатель преломления ее уменьшался бы до единицы. На самом деле в верхних слоях атмосфера ионизована, причем концентрация свободных электронов в ней с увеличением высоты растет, достигает максимума и затем уменьшается. Ясно поэтому, что для электромагнитных волн определенной частоты земная атмосфера представляет собой слоисто-неоднородную среду, показатель преломления которой непрерывно уменьшается от значения, несколько большего единицы, до нуля. В такой среде электромагнитная волна распространяется криволинейно, и если угол входа ее в эту среду равен нулю, то, углубившись в нее на определенную величину, волна полностью отражается и возвращается в обратном направлении по тому же пути, по

которому падала. Все это имеет громадное значение, например, для радиосвязи на коротких и ультракоротких волнах. Таким образом, фотография, представленная на рис. 5.8 *г*, если ее перевернуть, может служить упрощенной моделью распространения радиоволн в земной атмосфере.

Для самостоятельной проработки

1. Границы применимости геометрической оптики. Геометрическая или лучевая оптика перестает работать в случае, с которым мы соприкоснулись в конце этого параграфа. В самом деле, при стремлении показателя преломления среды к нулю скорость, а следовательно, и длина световой волны стремятся к бесконечности. Но о лучах света можно говорить лишь в том случае, если длина волны пренебрежимо мала. Попробуйте показать, что условием применимости геометрической оптики для оптически неоднородных сред является малость длины световой волны по сравнению с радиусом кривизны луча.

2. Красюк Н. П., Дымович Н. Д. Электродинамика и распространение радиоволн. — М.: Высшая школа, 1974. — 536 с. (С. 385–390 и 395–423).

По этой книге вы сможете познакомиться с некоторыми свойствами ионосферы и особенностями распространения радиоволн в атмосфере. Кроме того, здесь имеется элементарный вывод формулы для радиуса кривизны луча и рассмотрено условие применимости геометрической оптики.

3. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. — М.: Наука, 1990. — 432 с. (С. 167–191).

Здесь рассмотрены некоторые вопросы геометрической оптики слоисто-неоднородных сред.

4. Физика океана / Под ред. Ю. П. Доронина. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978. — 296 с. (С. 271–277).

Не следует думать, что изучаемые нами явления относятся только к оптике: они характерны для всех волн, независимо от их природы. Рекомендуемая книга позволит вам разобраться в том, как распространяется звук в морской слоисто-неоднородной среде.

5.5. Простой вывод уравнения луча

● Выше показано, что в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления свет распространяется по цепной линии. Вывод соответствующего уравнения, приведенный в § 5.2, громоздок и требует большого времени. Разработайте более простой вывод уравнения светового луча, который в принципе можно сделать в течение получаса на школьном уроке в классе углубленного изучения физики.

• В слоисто-неоднородной среде направим свет в сторону уменьшающихся значений показателя преломления. При этом световой луч изогнется и обозначит симметричную кривую (рис. 5.9). Проведем ось y так, чтобы она совпала с осью симметрии, направим ее в сторону роста показателя преломления и выберем начало координат в точке, где показатель преломления равен нулю; через эту точку перпендикулярно оси y проведем ось x .

Теперь можно записать, что показатель преломления увеличивается в направлении оси y по линейному закону:

$$n = ky, \quad (5.26)$$

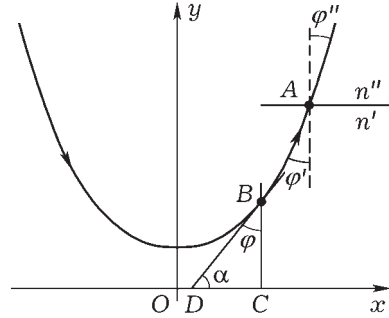


Рис. 5.9. К выводу уравнения луча

где $k = \text{const}$ — градиент показателя преломления.

Для произвольной точки A луча по закону преломления имеем $\sin \varphi' / \sin \varphi'' = n'' / n'$ или

$$n' \sin \varphi' = n'' \sin \varphi'',$$

где φ' и φ'' — соответственно углы падения и преломления на границе раздела слоев с показателями преломления n' и n'' . Это равенство справедливо и для той точки луча, для которой угол падения $\varphi = \pi/2$. Поэтому

$$n \sin \varphi = m = \text{const}, \quad (5.27)$$

где φ — угол входа луча в слой с показателем преломления n , m — показатель преломления среды в том слое, от которого свет испытывает полное внутреннее отражение.

Найдем угол наклона α касательной в произвольной точке B луча. Из геометрических соображений

$$\text{tg } \alpha = \frac{1}{\text{tg } \varphi} = \frac{\sqrt{1 - \sin^2 \varphi}}{\sin \varphi}.$$

Отсюда, учитывая (5.27) и (5.26), имеем

$$\text{tg } \alpha = \frac{\sqrt{n^2 - m^2}}{m} = \frac{\sqrt{y^2 - m^2/k^2}}{m/k}. \quad (5.28)$$

Докажем, что траекторией луча является цепная линия (гиперболический косинус). В системе координат xOy уравнение

цепной линии, симметричной относительно оси ординат (см. § 5.2):

$$y = a \operatorname{ch} \frac{x}{a}, \quad (5.29)$$

где a — некоторый коэффициент. Угол наклона касательной к цепной линии определяется первой производной:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = \operatorname{sh} \frac{x}{a} = \sqrt{\operatorname{ch}^2 \frac{x}{a} - 1}.$$

Принимая во внимание (5.29), имеем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{y^2 - a^2}}{a}. \quad (5.30)$$

Сравнивая выражения (5.28) и (5.30), видим, что первые производные для обеих кривых совершенно одинаковы, если положить, что $a = m/k$. Раз одинаковы производные, то с точностью до постоянного слагаемого одинаковы и первообразные. Подставляя найденное значение a в (5.29), получаем, что уравнение луча имеет вид

$$y = \frac{m}{k} \operatorname{ch} \frac{k}{m} x + C.$$

Значение C найдем из очевидного условия, что при $x = 0$ угол $\varphi = \pi/2$ и, согласно (5.27), $n = m$, следовательно, по (5.26) $y = m/k$, значит, $C = 0$. Таким образом, окончательно уравнение луча имеет вид

$$y = \frac{m}{k} \operatorname{ch} \frac{k}{m} x. \quad (5.31)$$

Перейти от этого уравнения к уравнению (5.11) вы вполне сможете самостоятельно.

Для самостоятельной проработки

1. Ход светового луча. Пользуясь уравнением (5.31), проанализируйте, как меняется траектория распространения света при изменении параметров слоисто-неоднородной среды.

2. Стасенко А. Волны на пляже, Солнце в небе и многое другое // Квант. — 1995. — № 3. — С. 37–38.

Рассмотрено криволинейное распространение волн на поверхности воды, дан вывод уравнения луча, проведена аналогия со звуковыми и световыми волнами.

5.6. Физическая и графическая модели светового луча

- Физическое моделирование световых лучей в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления мы осуществили посредством цепочек, подвешенных в двух

точках (см. § 5.4). Компьютер позволяет построить на экране дисплея графические модели при любых параметрах рассматриваемой среды. Важно убедиться, что физическая и графическая модели одного и того же луча совпадают. Для этого можно прямо перед экраном дисплея подвесить цепочку такой длины, которая равна вычисленной компьютером длине луча, и удостовериться, что цепочка в точности совпадает с изображенным на экране световым лучом. Попробуйте реализовать представленный проект.

• Начать следует с написания компьютерной программы. В качестве языка программирования выберем *Pascal*. Будем считать, что оптически неоднородная среда создана в прозрачном образце прямоугольного сечения. Программа должна запросить длину и высоту образца, значения показателя преломления на его нижней и верхней границах, координату y точки входа луча в образец и значение угла входа луча. Затем программа строит контур образца, производит вычисления гиперболического косинуса, арекосинуса и значений показателя преломления в зависимости от вертикальной координаты, по полученным данным строит траекторию светового луча (5.11), выдает значение длины светового луча (5.22) от точки его входа до расположенной на

```

[ ray1 ]
uses Graph, Crt;
{===== Входные данные =====}
const
  l = 300;      {Длина образца (мм)}
  h = 200;      {Высота образца (мм)}
  n0 = 0;       {Показатель преломления нижней границы}
  n1 = 1.5;     {Показатель преломления верхней границы}
  y1 = 199;    {Координата входа луча в образец}
  k = (n1 - n0)/h; {Градиент}
var
  x, y, m, phi: Real;
const
  dx = 0.05;   {Шаг изменения координаты x}
  sx = 2.085;  {Коэффициент пересчета координат по x}
  sy = 2.085;  {Коэффициент пересчета координат по y}
var
  grDriver, grMode, i: Integer; c: Char;
  lls, xxs: string; ll, xx: Integer;
  Temp: array[0..90] of Real; {Массив для хранения углов входа}
  TempSize: Byte;           {Количество элементов в массиве}
{===== Вычисление гиперболического косинуса =====}
function ch(const x: Real): Real;
begin
  ch := (exp(x)+exp(-x))/2;
end;
{===== Вычисление арекосинуса =====}
function ach(const x: Real): Real;
begin
  ach := ln(x+sqrt(x*x-1));
end;
```

[ray1]

```

===== Зависимость n от y =====
function n(const y: Real): Real;
begin
  n := n0+k*y;
end;
===== Ввод текста в графическом режиме =====
function ReadKeyGr: Integer;
var a, b: Integer; s: string;
begin
  s := ''; SetColor(15);
  repeat
    OutTextXY(440,10,s); c := ReadKey;
    if c = #13 then Break;
    if c in ['0'..'9'] then s := s+c;
  until FALSE;
  Val(s,a,b); ReadKeyGr := a;
end;

BEGIN
  TempSize := 0;
  {===== Установка графического режима =====}
  grDriver := Detect; InitGraph(grDriver, grMode, 'c:\bp\bgi');
  if GraphResult <> grOk then Halt(1);
  repeat
    ClearDevice; {Очистка экрана}
    {===== Рисование образца =====}
    SetLineStyle(0,0,1); SetColor(15); SetFillStyle(0,0);
    Rectangle(Round(sx*0), Round(479+sy*0),
              Round(sx*1), Round(479-sy*h));
    Line(430,410,430,480); Line(430,410,Round(sx*1),410);
    OutTextXY(10,10,
              'Введите угол входа луча в образец (0...90 градусов) = ');
    SetLineStyle(0,0,3);
    inc(TempSize); Temp[TempSize] := ReadKeyGr*pi/180;
    {===== Рисование траекторий =====}
    for i := 1 to TempSize do begin
      if i = (TempSize) then SetColor(4) else SetColor(2);
      {===== Начальные значения =====}
      phi := Temp[i]; y := y1; x := 0; m := n(y1)*sin(phi);
      MoveTo(Round(sx*x), Round(479-sy*y));
      {===== Построение хода луча в образце =====}
      while (x<l) do begin
        y := -n(0)/k+m/k*ch(k/m*x-ach(n(y1)/m));
        {===== Проверка принадлежности y(x) образцу =====}
        if ((y<0) or (y>h)) then {выход из цикла} Break;
        LineTo(Round(sx*x), Round(479-sy*y));
        x := x+dx;
      end;
    end;
    SetColor(15);
    {===== Вывод значений x и l =====}
    xx := Round(2*m/k*ach(n(y1)/m));
    ll := Round(2*n(y1)/k*cos(phi));
    Str(xx,xxs); xxs := 'X = '+xxs+' мм';
    Str(ll,lls); lls := 'L = '+lls+' мм';
    SetTextStyle(DefaultFont, HorizDir, 2);
    OutTextXY(445,420,xxs); OutTextXY(445,450,lls);
    {===== Вывод диалога продолжения работы =====}
    SetTextStyle(DefaultFont, HorizDir, 1);
    OutTextXY(10,20,'Продолжить (Y/N) ?'); c := ReadKey;
    until (c='n') or (c='N');
  CloseGraph;
END.

```

той же горизонтали точки выхода и запрашивает данные об угле входа следующего луча.

Подробное описание процесса программирования неинтересно, утомительно и не входит в наши задачи. Поэтому мы приводим готовую программу *ray 1*, в которой вы вполне сможете разобраться самостоятельно. Проще всего эту программу отсканировать (сфотографировать на цифровой фотоаппарат) и распознать. Возможно, больше пользы будет, если вы введете программу в компьютер с клавиатуры. И в том, и в другом случае введенную программу нужно запустить, проверить в работе, а затем поэкспериментировать с ней, меняя все, что можно. После детального изучения программы вы сможете приспособить ее для решения конкретных задач.

На рис. 5.10 изображен вид дисплея с результатами графического моделирования распространения света в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления.

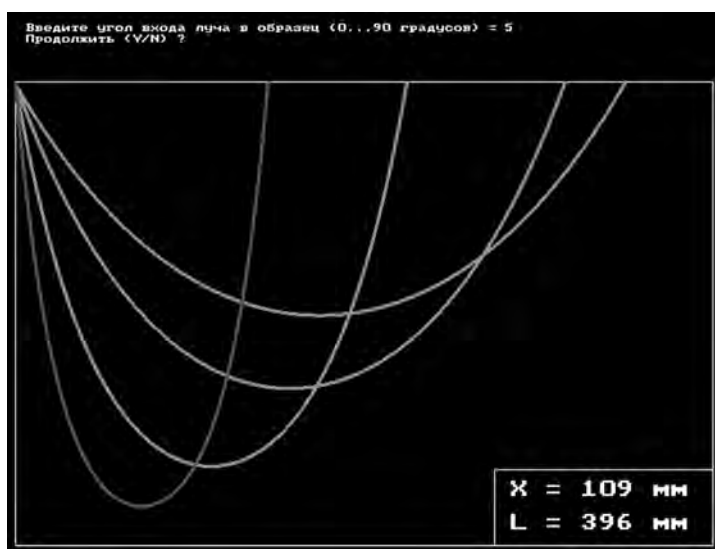


Рис. 5.10. Результат работы компьютерной программы по моделированию распространения света в оптически неоднородной среде

В верхней части экрана компьютер запрашивает значение угла входа светового луча в образец. После ввода требуемого значения и положительного ответа на вопрос о продолжении работы компьютер строит луч красного цвета и в правом нижнем углу экрана указывает значения горизонтальной координаты выхода x

и длины луча l от точки входа до точки выхода. Построенные ранее лучи имеют зеленый цвет.

Для самостоятельной проработки

1. Прибор для сопоставления графической и физической моделей светового луча. В качестве такого прибора можно использовать линейку с миллиметровыми делениями, закрепленную в штативе параллельно экрану так, чтобы ее нижний край совпадал с верхней границей слоисто-неоднородной среды, изображенной на экране дисплея. Возле нулевого деления следует закрепить один конец цепочки. Работают с прибором следующим образом. Запускают программу и задают угол входа луча в оптически неоднородную среду. При этом на экране появляются изображение луча, значение его длины и координата выхода луча из среды. Свободный конец цепочки берут в руку, цепочку натягивают вдоль линейки, отмеряют указанную на экране длину цепочки и в найденном месте берут цепочку двумя пальцами. Затем перемещают это место вдоль линейки на такое расстояние от ее начала, которое указывает компьютер. При этом цепочка провисает и непосредственно глазом видно, что она совпадает с изображенным на экране лучом.

Глава 6

ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА ОТ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ

Мы привыкли к тому, что полное внутреннее отражение света происходит на границе раздела двух оптически однородных сред, когда свет падает на эту границу из оптически менее плотной среды под углом, превышающим предельный. В этой главе предлагаются учебные исследования явления полного внутреннего отражения света от слоисто-неоднородной среды. Оказывается, это явление, если говорить о его результате, не слишком отличается от привычного, но воспринимается совершенно необычным, особенно при наблюдениях в динамике. В главе рассмотрены условия, при которых неравномерно нагретый образец оргстекла имеет постоянный градиент показателя преломления и проведен анализ явления полного внутреннего отражения света от соответствующей слоисто-неоднородной среды. Здесь рассказано, как сделать терморегулятор, термоиндикатор и нагреватель для получения слоя оргстекла с постоянным градиентом показателя преломления, подробно описана технология изготовления полуцилиндра для экспериментов. Наконец, предложены учебные исследования и компьютерная модель явления полного внутреннего отражения света в оптически неоднородной среде.

6.1. Образец оргстекла с постоянным градиентом показателя преломления

- Не пустым ли делом мы занимаемся? Выше получено уравнение светового луча в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления (5.11), сама траектория распространения света достаточно подробно исследована и даже смоделирована, а существуют ли вообще такие среды? Лучше спросить себя так: можно ли создать среду, в которой зависимость показателя преломления от координаты выражается законом $n = n_0 + ky$ (см. (5.10))? Чтобы ответить на поставленный вопрос, нужно рассмотреть какой-нибудь конкретный пример. Конечно, в первую очередь нас интересует неравномерно

нагретое оргстекло, поскольку именно оно наиболее пригодно для постановки простых опытов по криволинейному распространению света.

Известно, что в интервале температур от 20 до 60 °C зависимость показателя преломления оргстекла (полиметилметакрилата) от температуры линейна (см. § 2.6):

$$n = n' + \alpha(T - T'), \tag{6.1}$$

где $\alpha = -1,6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ и $n' = 1,492$ при температуре $T' = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Разумеется, приведенные значения α и n' нужно расценивать в качестве ориентировочных, поскольку промышленность в настоящее время выпускает разные сорта оргстекла. Докажите, что при обеспечении определенного теплового режима из оргстекла можно получить среду с постоянным градиентом показателя преломления. Оцените возможность создания соответствующей экспериментальной установки.

• Представим себе, что из оргстекла вырезан плоскопараллельный брусок, толщина которого h существенно меньше его



Рис. 6.1. Между нагревателем и холодильником расположен плоскопараллельный брусок из оргстекла

ширины и длины. Положим, что нижняя и верхняя грани бруска поддерживаются при постоянных температурах, соответственно равных T' и T'' , причем $T'' > T'$ (рис. 6.1). Тогда от верхней к нижней грани бруска за счет теплопроводности оргстекла будет распространяться тепло. При

достижении стационарного состояния системы поток тепла Q станет постоянным. Если считать, что теплопроводность λ не зависит от температуры T , то согласно закону Фурье (см. § 3.5)

$$Q = -\lambda \frac{dT}{dy} = \text{const.} \tag{6.2}$$

Отсюда следует, что градиент температуры dT/dy в направлении оси y есть величина постоянная. Обозначив ее буквой A , получаем $dT/dy = A$. Решение этого дифференциального уравнения дает

$$T = Ay + B. \tag{6.3}$$

Постоянные A и B можно определить из условий, что при $y = 0$ температура оргстекла $T = T'$, а при $y = h$ температура $T = T''$. Тогда $T' = B$ и $T'' = Ah + B = Ah + T'$, отсюда $A = (T'' - T')/h$.

Подставляя найденные значения A и B в формулу (6.3), получаем

$$T = \frac{T'' - T'}{h} y + T'. \quad (6.4)$$

Из формул (6.1) и (6.4) следует, что

$$n = n' + \alpha \frac{T'' - T'}{h} y. \quad (6.5)$$

Это выражение совпадает с формулой $n = n_0 + ky$ (см. (5.10)), если положить, что $n' = n_0$ и $\alpha(T'' - T')/h = k$. Таким образом, создав надлежащим способом стационарный тепловой режим в плоскопараллельном бруске оргстекла, действительно можно получить слоисто-неоднородную среду с постоянным градиентом показателя преломления

$$k = \frac{dn}{dy} = \alpha \frac{T'' - T'}{h}. \quad (6.6)$$

На рис. 6.2 приведены графики распределения температуры и показателя преломления в таком бруске.

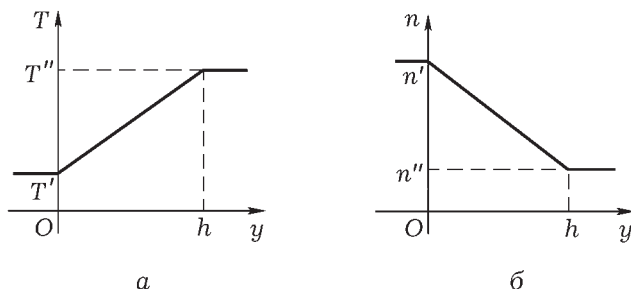


Рис. 6.2. В плоскопараллельном бруске из оргстекла, находящемся между нагревателем и холодильником, создан стационарный тепловой режим: a — график распределения температуры; b — график распределения показателя преломления оргстекла

Итак, мы делаем вывод, что условия, для которых справедлива рассмотренная выше теория, вполне могут быть реализованы в соответствующем эксперименте. Очевидно, экспериментальная установка для его проведения должна состоять из нагревателя и холодильника, между которыми расположен относительно тонкий плоскопараллельный брусок из оргстекла. Температуры нагревателя и холодильника нужно поддерживать постоянными не только во время непосредственного проведения эксперимента, но и в течение всего того времени до опыта, пока в бруске не установится стационарный тепловой режим. Следовательно,

необходимы хотя бы самые простые термостатирующие устройства. Наиболее доступный вариант таких устройств можно представить себе в виде двух плоских металлических сосудов, соприкасающихся с поверхностями бруска, по одному из которых непрерывно пропускается холодная вода (например, из водопровода), а по второму — горячая (допустим, кипяток).

Ясно, что изготовление и эксплуатация такой установки — совсем не простое дело, хотя идея, положенная в ее основу, выглядит простой и привлекательной. Поэтому в дальнейшем мы не будем стремиться получить из оргстекла среду с постоянным градиентом показателя преломления. Все описанные ниже опыты проводятся при нестационарном тепловом режиме образца из оргстекла, то есть в слоисто-неоднородных средах с непостоянным градиентом показателя преломления. Для таких сред рассмотренную выше теорию можно считать теорией первого приближения.

Для самостоятельной проработки

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 т. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: Физматлит, 2003. — 576 с. (С. 173–195).

Рекомендуем вам изучить (или просмотреть вновь) главу, посвященную теплопроводности, известного вузовского учебника физики. Материал этой главы, помимо прочего, позволит вам оценить распределение показателя преломления в неравномерно нагретом оргстекле в несколько более сложных случаях, чем рассмотренный выше.

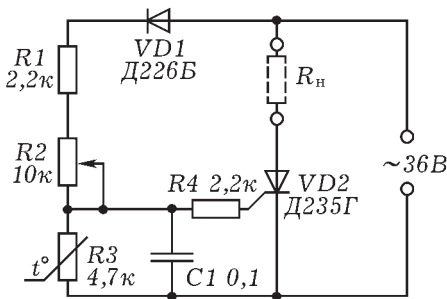


Рис. 6.3. Принципиальная схема терморегулятора. Радиодетали: диод $VD1$ типа Д226Б; тринистор $VD2$ типа Д235Г, КУ201В, КУ201Г, КУ202В, КУ202Г; резисторы $R1 = R4 = 2,2 \text{ кОм}$, $R2 = 10 \text{ кОм}$, $R3 = 4,7 \text{ кОм}$ (терморезистор типа М4К7В), R_n — резистор нагрузки (нагреватель); конденсатор $C1 = 0,1 \text{ мкФ}$

2. Терморегулятор. Не надо думать, что попытка создания в образце оргстекла постоянного градиента показателя преломления абсолютно безнадежна для школьного физического кабинета. На рис. 6.3 приведена принципиальная схема простейшего терморегулятора. Датчиком температуры в этом приборе служит терморезистор $R3$ типа М4К7В, сопротивление которого при комнатной температуре составляет примерно 4,7 кОм. Электрический нагреватель — обозначенный на схеме как резистор нагрузки R_n , нетрудно изготовить самостоятельно. Одна из возможных

конструкций нагревателя подробно описана ниже (см. § 6.3; нужно только иметь в виду, что нагреватель, работающий совместно с терморегулятором, должен содержать нихромовый провод несколько меньшей длины, чем нагреватель, рассчитанный на непосредственное включение в сеть напряжением 36 В). Разберитесь в принципе действия терморегулятора, разработайте способ его градуировки, соберите и наладьте прибор. Найдите ему применение в описанных ниже экспериментах.

6.2. Полное отражение от оптически неоднородной среды

● Ход светового луча, показанный, например, на рис. 5.3, очень напоминает то, что происходит при полном отражении света от границы раздела оптически однородных сред: луч, углубившись в слоисто-неоднородную среду, как бы отражается и идет назад, причем интенсивность отраженного света равна интенсивности падающего. Попробуем вычислить тот угол входа светового луча в оптически неоднородную среду, при котором еще наблюдается полное отражение света.

Для определенности будем считать, что эта оптически неоднородная среда представляет собой брусок оргстекла, в котором в результате неравномерного нагрева создан постоянный и отличный от нуля градиент показателя преломления. Пусть, как и раньше, показатель преломления оргстекла линейно возрастает в направлении оси y в соответствии с законом $n = n_0 + ky$, где $k = dn/dy$ — градиент показателя преломления и n_0 — значение показателя преломления в точках нижней грани бруска (рис. 6.4). Очевидно, луч 1, идущий от источника света S в сторону нижней грани бруска, испытает полное отражение от слоисто-неоднородной среды, а луч 3 — нет. Предельным лучом в этом смысле является луч 2, который касается нижней грани бруска. Этому лучу соответствует предельный угол входа света в слоисто-неоднородную среду $\varphi_{1пр}$. Для вычисления предельного угла нужно вспомнить, что ордината минимума траектории луча (точки M) выражается формулой $y_{\min} = (m - n_0)/k$

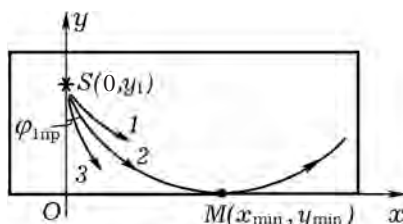


Рис. 6.4. К вычислению предельного угла входа луча в слоисто-неоднородную среду, при котором еще наблюдается полное отражение света

(см. (5.14)), где $m = n_1 \sin \varphi_{1\text{пр}}$ (см. (5.2)), причем n_1 — показатель преломления оргстекла в точках бруска с ординатами y_1 ($n_1 = n_0 + ky_1$). В нашем случае ордината минимума равна нулю ($y_{\text{min}} = 0$), поэтому $m = n_0$ или $n_1 \sin \varphi_{1\text{пр}} = n_0$. Таким образом, полное отражение света будет иметь место, если выполняется условие

$$\sin \varphi_1 \geq \sin \varphi_{1\text{пр}} = \frac{n_0}{n_1}. \quad (6.7)$$

Мы получили замечательный результат, который заслуживает того, чтобы представить его себе как можно нагляднее. Попробуйте сделать это. Попробуйте также доказать, что тот же результат получится при любом (а не только линейном) законе изменения показателя преломления слоисто-неоднородной среды.

• Пусть две оптически однородные среды с показателями преломления n_0 и n_1 (напомним, что $n_0 < n_1$) разделены плоскопараллельным слоем толщиной d оптически неоднородной среды, показатель преломления которой линейно изменяется от значения n_0 до значения n_1 в направлении от нижней к верхней границе этого слоя (рис. 6.5). Допустим, что из верхней среды

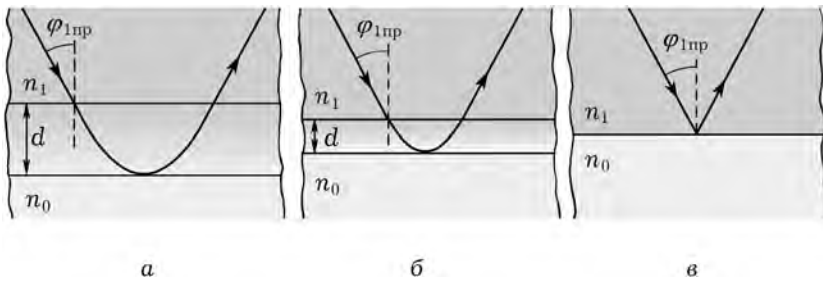


Рис. 6.5. Сравнение полного отражения от слоисто-неоднородной среды с полным отражением от границы раздела оптически однородных сред

под предельным углом падения $\varphi_{1\text{пр}}$ на плоскопараллельный слой падает световой луч (который, очевидно, прямолинеен). Внутри этого слоя свет будет распространяться уже по криволинейной траектории, которая нижней своей точкой касается границы среды с показателем преломления n_0 (рис. 6.5 а). Выйдя из плоскопараллельного слоя, свет опять войдет в оптически однородную среду и вновь станет распространяться прямолинейно, причем угол отражения от плоскопараллельного слоя оптически неоднородной среды будет равен углу падения. Если теперь уменьшать толщину слоя d , сохраняя остальные условия неизменными, то ход светового луча станет таким, какой показан на рис. 6.5 б,

т. е. внутри слоя траектория распространения света деформируется, но угол отражения по-прежнему будет равен углу падения. Наконец, в пределе, когда толщина оптически неоднородного слоя станет равна нулю ($d = 0$), вместо криволинейного хода луча в этом слое будет иметь место полное отражение света от границы раздела оптически однородных сред с показателями преломления n_0 и n_1 (рис. 6.5 в).

Чтобы обобщить полученный результат, будем считать, что показатель преломления слоисто-неоднородной среды (рис. 6.4) непрерывно растет от значения n_0 при $y = 0$ до значения n_1 при $y = y_1$, изменяясь по произвольному закону $n = n(y)$. Дифференциальное уравнение траектории предельного луча в этом случае имеет вид (5.4):

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{\sqrt{n^2(y) - m^2}}{m},$$

где $m = n_1 \sin \varphi_{1\text{пр}}$. Из условия минимума траектории $dy/dx = 0$ следует, что $n(y) = m$. Минимум траектории лежит на оси x , если в последней формуле положить $y = 0$. Но при $y = 0$ показатель преломления $n(0) = n_0$, поэтому получаем $n_0 = m$, то есть опять приходим к соотношению (6.7): $\sin \varphi_{1\text{пр}} = n_0/n_1$.

Таким образом, можно сделать вывод, что полное отражение будет иметь место во всех тех случаях, когда углы входа света в слоисто-неоднородную среду больше или равны предельному углу, синус которого определяется отношением минимального показателя преломления среды к тому значению показателя преломления, которым среда обладает в точке входа в нее луча.

Для самостоятельной проработки

1. Предельный угол входа света в слоисто-неоднородную среду (6.7) может быть найден путем элементарных рассуждений без привлечения методов высшей математики. Проведите такие рассуждения.

2. Волноводное распространение света. Пусть плоскопараллельный слой оптически неоднородной среды граничит с двумя одинаковыми оптически однородными средами, показатель преломления которых n_0 (рис. 6.5). Будем считать, что показатель преломления слоя плавно возрастает от значения n_0 на его границах до некоторого максимального значения n в среднем сечении этого слоя. Мысленно рассмотрите ход световых лучей от него. Покажите, что всегда найдутся лучи, которые не могут выйти из слоя и распространяются в нем волнообразно. Сравните это явление с теми, которые изучены нами раньше (§ 1.5).

6.3. Оборудование для опытов по полному отражению света

● Настало время пронаблюдать ход светового пучка при полном отражении его от слоисто-неоднородной среды. Сделать это можно разными способами, но для нас наиболее привлекателен тот, который позволяет сравнить явление криволинейного распространения света в слоисто-неоднородной среде с явлением полного отражения от границы раздела двух оптически однородных сред. Вспомните школьный опыт по полному отражению света, в котором используется полуцилиндр из стекла или оргстекла. Ясно, что если в этом опыте плоскую грань полуцилиндра нагревать, то вблизи нее оргстекло будет представлять собой слоисто-неоднородную среду. Вы без особых затруднений сумеете поставить такой эксперимент и пронаблюдать возникающие в нем великолепные явления, если будете располагать полуцилиндром из оргстекла нужных размеров и нагревателем. Подумайте, как их изготовить.

● Прежде всего нужно сделать диск или цилиндр из оргстекла диаметром примерно 160 мм и толщиной 10–40 мм (чем толще диск, тем проще изготовить полуцилиндр нужного качества и легче выполнить опыты). Вначале ножовкой по металлу из листа оргстекла грубо выпилите заготовку диска. Затем приготовьте две фанерные прокладки толщиной 10–12 мм и диаметром около 140 мм. Вложив заготовку диска между прокладками, слегка зажмите получившийся «сэндвич» между патроном и так называемым «вращающимся центром», вставленным в заднюю бабку токарного станка. Насколько это возможно, отцентрируйте заготовку диска и окончательно подожмите ее к патрону задней бабкой. Поскольку заготовка между прокладками удерживается только силой трения, обработку ее резцом нужно производить достаточно осторожно. После получения цилиндрической поверхности, не вынимая заготовки из токарного станка, отшлифуйте эту поверхность все более мелкой шкуркой, а затем отполируйте пастой ГОИ, нанесенной на смоченную керосином ткань. Эту часть работы следует выполнить с максимальной аккуратностью, стараясь избежать завалов цилиндрической поверхности по ее краям. Описанные операции не так трудны, как это может показаться тем, кто их никогда не делал: автор совершенно уверен, что любой школьник, допущенный к токарному станку, в состоянии справиться с ними.

Готовый диск, достав из токарного станка, ножовкой по металлу разрежьте по диаметру так, чтобы получились два полуци-

линдра. Для этого на плоских поверхностях диска друг против друга чертилкой нацарапайте диаметральные линии. Зажмите диск в тиски, проложив между тисками и диском фанерные прокладки, чтобы не испортить поверхности диска. Возьмите заправленную острым полотном ножовку и вдвоем со своим товарищем начните распиливать диск. Каждый из работающих при этом должен следить за тем, чтобы полотно проходило точно по линии, нацарапанной на обращенной к нему поверхности оргстекла. Пилить нужно не спеша, периодически вводя в пропил небольшие порции машинного масла.

Помните, что при большой скорости распиловки ножовочное полотно и оргстекло сильно разогреваются теплом, выделяющимся от трения. Это может привести к тому, что оргстекло от перегрева станет оптически неоднородным и затем после охлаждения сохранит возникшую неоднородность.

Плоскую грань и одну из боковых поверхностей каждого полуцилиндра отшлифуйте (рис. 6.6). Сделать это лучше всего посредством нанесенного на стекло влажного абразивного порошка способом, описанным выше (§ 2.4). Плоскую грань одного из полуцилиндров дополнительно нужно отполировать. С этой

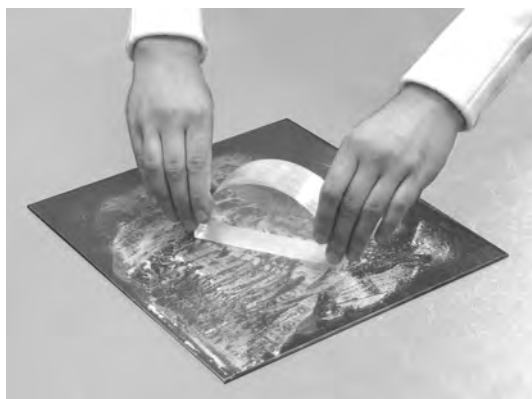


Рис. 6.6. Обработка плоской грани полуцилиндра на стекле абразивом, смоченным водой

целью вначале произведите тонкую шлифовку грани на самой мелкой шкурке, которой вы располагаете (лучше достать так называемую «нулевку»). Оргстекло — мягкий материал, поэтому полировка его требует лишь элементарной аккуратности и не занимает слишком большого времени. Полировать оргстекло следует пастой ГОИ. Нанесите ее на смоченную керосином плоскую

поверхность полировальника, представляющего собой лист толстой фанеры, туго обтянутый двумя–тремя слоями не слишком грубой ткани. По этой поверхности перемещайте полуцилиндр до тех пор, пока его плоская грань не окажется полностью отполированной. После полировки полуцилиндр тщательно промойте холодной водой с мылом и высушите. Если на отполированной поверхности остались видимые глазом царапины, то нужно вновь произвести тонкую шлифовку поверхности и затем снова ее отполировать. При работе опыт приходит очень быстро, поэтому вскоре вы сможете по отшлифованной поверхности уверенно прогнозировать качество полировки. Самым неприятным дефектом тонкой шлифовки и полировки, с которым нужно активно бороться, являются завалы по краям обрабатываемой грани. На этих завалах при постановке опытов будет происходить дополнительное преломление света, которое, безусловно, ухудшит их результаты. Чтобы свести завалы к минимуму, тонкую шлифовку и полировку нужно производить на плоских шлифовальнике и полировальнике, ни в коем случае не наклоняя полуцилиндр при обработке его грани. И последнее замечание: условия наблюдения светового пучка улучшатся, если боковую поверхность каждого полуцилиндра покрасить белой нитрозмалью.

Обратимся теперь к изготовлению нагревателя. В экспериментах наиболее удобен электрический нагреватель. Он должен обеспечивать быстрый разогрев поверхности оргстекла до требуемой температуры и вместе с тем не перегревать оргстекло свыше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. После выключения нагреватель должен охлаждаться также достаточно быстро. Требования сравнительно кратковременного нагрева и охлаждения оргстекла обусловлены тем, что явления криволинейного распространения света лучше всего наблюдать в динамике, следя за их развитием. Практика показывает, что любой нагреватель, который касается поверхности оргстекла, мало удовлетворяет высказанным требованиям, поскольку он неизбежно оказывается излишне инерционным. Теплопередачу от малоинерционного нагревателя к оргстеклу целесообразно обеспечить путем излучения. При разработке конструкции нагревателя нужно ориентироваться на напряжение его питания 36 В , допустимое в учебных опытах с точки зрения должного соблюдения правил техники безопасности.

Приготовьте нихромовый проводник (от старого реостата или электроплитки) диаметром около $0,3\text{ мм}$ и длиной $1,5\text{--}2\text{ м}$. Закрепите концы его на двух штативах так, чтобы проводник висел в воздухе, и подайте на него напряжение 36 В от трансформатора. Сразу вы заметите, что проводник за счет нагревания

электрическим током удлиняется и провисает сильнее. Постепенно уменьшайте его длину (каждый раз выключая напряжение!) до тех пор, пока нихромовый проводник не станет раскален до темно-красного свечения. Чтобы вам легче было ориентироваться, укажем, что длина такого проводника будет составлять около 115 см. Далее подберите полоску слюды шириной 39–40 мм, длиной 120–160 мм и толщиной 0,6–1 мм. Пластинки слюды больших размеров часто применяются в различных бытовых электронагревательных приборах, поэтому их сравнительно нетрудно достать. В крайнем случае полоску нужных размеров можно набрать из маленьких листков слюды, наложив их друг на друга внахлест и скрепив липкой лентой; после первого включения нагревателя лента сгорит, а листки слюды будут достаточно прочно удерживаться его обмоткой. По краям приготовленной полоски слюды лобзиком через равные расстояния сделайте небольшие пропилы и плотно намотайте на полоску нихромовый провод отобранной длины, укладывая его витки в пропилы. После этого, используя болты с гайками, дюралевые уголки и клеммы, соберите нагреватель так, как показано на рис. 6.7. Чтобы при постановке опытов не получить ожога, нагреватель нужно снабдить

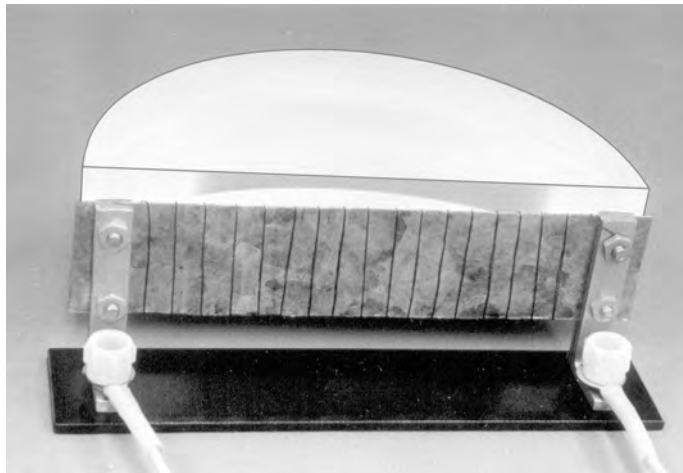


Рис. 6.7. Электрический нагреватель, установленный параллельно плоской грани полуцилиндра из оргстекла

защитным металлическим кожухом, оставив открытой только одну его боковую поверхность. Располагать поверхность оргстекла от нагревателя надо на расстоянии 15–30 мм; время разогрева оргстекла обычно не превышает 1–3 мин.

Для самостоятельной проработки

1. Термоиндикатор. Проконтролировать температуру нагретого оргстекла можно с помощью простого термоиндикатора, принципиальная схема которого приведена на рис. 6.8. В качестве датчика температуры в этом приборе можно использовать терморезистор $R1$ любого

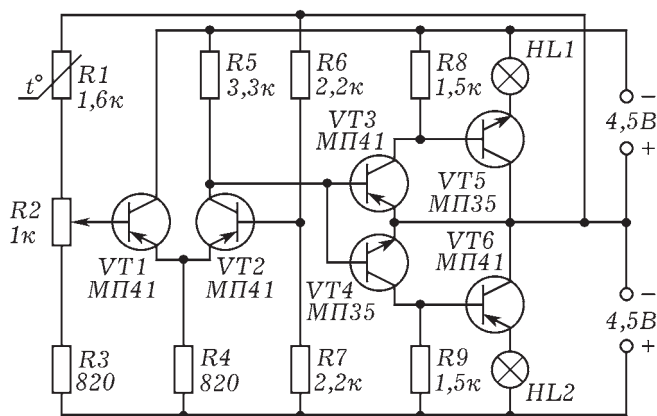


Рис. 6.8. Принципиальная схема термоиндикатора. Радиодетали: транзисторы $VT1$, $VT2$, $VT3$, $VT6$ типа МП39-МП42, $VT4$, $VT5$ типа МП35-МП38; резисторы $R1 = 1,6\text{ кОм}$ (терморезистор типа СТ1-17), $R2 = 1\text{ кОм}$, $R3 = R4 = 820\text{ Ом}$, $R5 = 3,3\text{ кОм}$, $R6 = R7 = 2,2\text{ кОм}$, $R8 = R9 = 1,5\text{ кОм}$; лампочки накаливания $HL1$, $HL2$ рассчитаны на напряжение 3,5 В и ток 0,26 А; источником питания служат две последовательно соединенные батарейки карманного фонаря на 4,5 В

типа (чем меньше размеры терморезистора, тем он менее инерционен и, следовательно, более удобен в работе), сопротивление которого при комнатной температуре составляет 1–2 кОм. На транзисторах $VT1$ и $VT2$ выполнен так называемый дифференциальный усилитель — устройство, которое при некотором входном напряжении на выходе дает напряжение, равное нулю, а при увеличении или уменьшении входного напряжения дает соответственно усиленное положительное или отрицательное напряжение. Это напряжение поступает на общий вход двух электронных переключателей, собранных на транзисторах $VT3$, $VT5$ и $VT4$, $VT6$. Нагрузками обоих переключателей являются индикаторные лампочки $HL1$, $HL2$, рассчитанные на напряжение 3,5 В и ток 0,26 А. Свечение одной из лампочек указывает, что температура терморезистора $R1$ ниже того значения, которое задано посредством переменного резистора $R2$, а свечение второй, что температура терморезистора выше установленной. Подробно изучите принцип действия термоиндикатора, соберите и отградуируйте прибор.

2. Максимальная температура нагрева оргстекла. Пользуясь термоиндикатором или иным прибором для измерения температуры, поставьте опыт, показывающий, что нагретое до температуры, превы-

шающей $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, оргстекло после охлаждения сохраняет возникшую в результате нагрева оптическую неоднородность.

6.4. Эксперимент по полному отражению света

- Вы теперь имеете все необходимое для исследования явления полного отражения света от слоисто-неоднородной среды. Продумайте эксперимент и выполните его.

- На стол поместите невысокую подставочку и на ней горизонтально расположите полуцилиндр с отполированной плоской гранью. Электрический нагреватель поставьте параллельно плоской грани полуцилиндра (рис. 6.7). От осветителя, снабженного щелевой диафрагмой шириной примерно 2 мм, направьте узкий световой пучок через цилиндрическую поверхность в центр плоской грани полуцилиндра. Отрегулируйте положение осветителя так, чтобы на находящейся снизу матовой поверхности полуцилиндра был отчетливо виден след падающего пучка.

Прежде чем начинать эксперимент, по формуле (6.7) вычислите предельный угол падения света, при котором должно наблюдаться явление полного отражения от слоисто-неоднородной среды. Если вы зададитесь перепадом температуры оргстекла от 20 до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, то у вас получится значение предельного угла, близкое к 83° . Примерно под таким углом падения и нужно направить свет на плоскую грань полуцилиндра. Вы увидите типичный ход падающего и отраженного световых пучков при полном отражении от границы раздела двух оптически однородных сред. Посмотрите на полуцилиндр не сверху, а немного сбоку. Тогда в стоящей вертикально плоской грани полуцилиндра вы заметите отражение следов, созданных падающим и отраженным пучками на нижней матовой поверхности полуцилиндра. Ощущение при этом таково, будто вы видите два «пересекающихся» пучка. Это наилучшие условия наблюдения, поскольку именно в них наиболее отчетливо проявляются различия между полным отражением в оптически однородной среде и криволинейным распространением света в оптически неоднородной. На рис. 6.9 а приведена фотография явления, о котором идет речь (на этой и последующих фотографиях свет распространяется слева направо).

Включите электрический нагреватель, и спустя несколько секунд вы обнаружите, что прямолинейный световой пучок начинает искривляться! Это искривление поначалу выражено не очень сильно и проявляется в основном в том, что «точка пересечения» видимых глазом пучков смещается вправо (рис. 6.9 б).

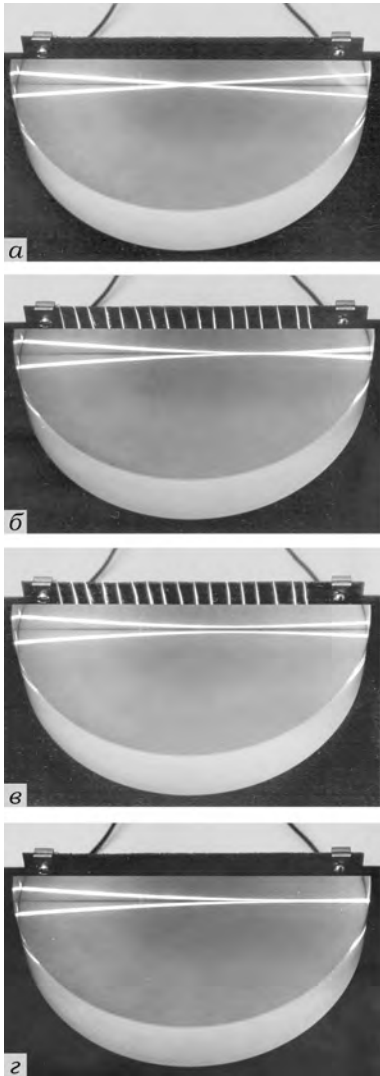


Рис. 6.9. Полное отражение света от слоисто-неоднородной среды: *a* — нагреватель выключен, свет испытывает полное отражение от границы оргстекло–воздух; *б, в* — нагреватель включен, и температура оргстекла вблизи него повышается; *г* — оргстекло охлаждается

Однако по мере роста температуры плоской грани полуцилиндра полное отражение света от границы оргстекло–воздух постепенно сменяется полным отражением от созданной вами слоисто-неоднородной среды: вы видите как бы два искривленных световых пучка, не соприкасающиеся между собой (рис. 6.9 *б*). Если вы выключите нагреватель, то события станут развиваться в обратной последовательности, и в некоторый момент вы сможете наблюдать такой ход пучка, который изображен на рис. 6.9 *г*. Теперь создайте в оргстекле максимально возможный градиент показателя преломления (не перегрейте сгоряча оргстекло!) и изменяйте угол падения света на плоскую грань полуцилиндра. Вы без особого труда сможете найти такой наименьший угол падения, при котором световой пучок, распространяясь криволинейно, еще не касается плоской грани полуцилиндра (рис. 6.10).

Небольшое уменьшение этого угла приводит к тому, что криволинейность траектории распространения света становится незаметной и наблюдается хорошо изученное вами полное отражение от границы оргстекло–воздух.

В вашем распоряжении имеется еще один полуцилиндр, плоская грань которого оставлена матовой. Повторите описанные выше опыты с таким полуцилиндром. Для этого направьте узкий световой пучок нормально

на цилиндрическую поверхность так, чтобы угол падения его на плоскую грань полуцилиндра был не меньше 83° . Никакого

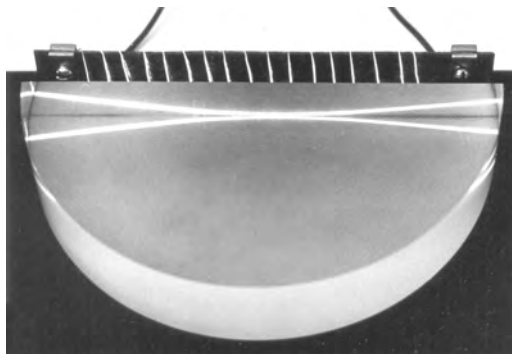


Рис. 6.10. Световой пучок распространяется под наименьшим углом падения, при котором он еще не касается плоской грани полуцилиндра из неравномерно нагретого оргстекла

отражения в этом случае вы наблюдать не будете: свет, доходя до матовой грани, испытывает на ней рассеяние, и падающий пучок просто исчезает (рис. 6.11 а). Включите нагреватель, расположенный вблизи матовой грани полуцилиндра параллельно ей. Вы обнаружите, как по мере возникновения и роста градиента показателя преломления оргстекла световой пучок искривляется, что приводит к смещению области рассеяния его вправо (рис. 6.11 б).

Наконец, при достаточно большом градиенте показателя преломления световой пучок распространяется криволинейно, не достигая матовой грани полуцилиндра (рис. 6.11 в). Это очень эффектный опыт, и, поставив его, вы, безусловно, испытаете чувство глубокою удовлетворения.

Для самостоятельной проработки

1. Демонстрационный вариант эксперимента по полному отражению. С явлением полного внутреннего отражения света от слоисто-неоднородной среды вы сможете познакомить одновременно многих наблюдателей, если разработаете и изготовите прибор для демонстрационного эксперимента. На рис. 6.12 приведена фотография, по которой нетрудно представить себе одну из возможных конструкций требуемого прибора. Попробуйте в демонстрационном опыте использовать полупроводниковый лазер.

2. Домашний вариант опыта. В домашних условиях вы вряд ли сумеете изготовить из оргстекла полуцилиндр требуемого качества. Однако исследовать полное внутреннее отражение света от слоисто-неоднородной среды можно и дома, если вместо полуцилиндра исполь-

зовать брусок или полоску из оргстекла, а электрический нагреватель заменить жидкостным или для нагревания оргстекла воспользоваться феном. Разработайте и поставьте соответствующие опыты. Чтобы облегчить выполнение задания, приводим фотографии демонстрационного эксперимента (рис. 6.13). На первой из них показано начало опыта,

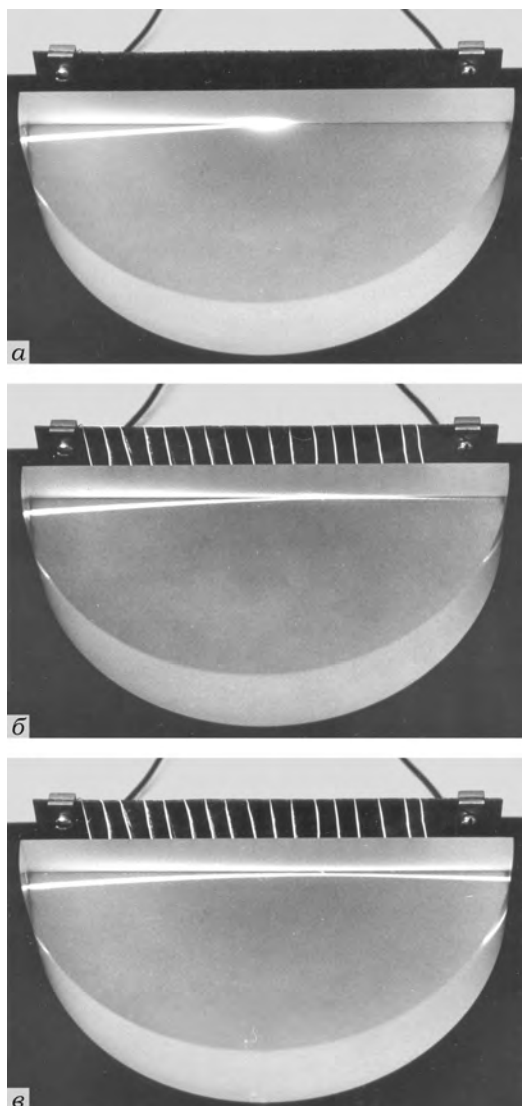


Рис. 6.11. Полуцилиндр с матовой плоской гранью: *а* — нагреватель выключен; *б, в* — градиент показателя преломления оргстекла возрастает

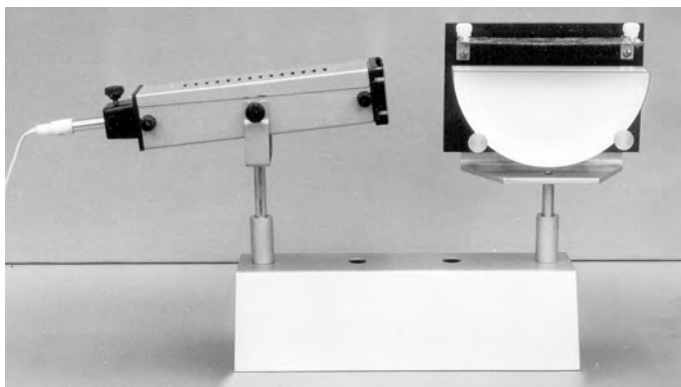


Рис. 6.12. Прибор для демонстрационных опытов по полному отражению света от слоисто-неоднородной среды

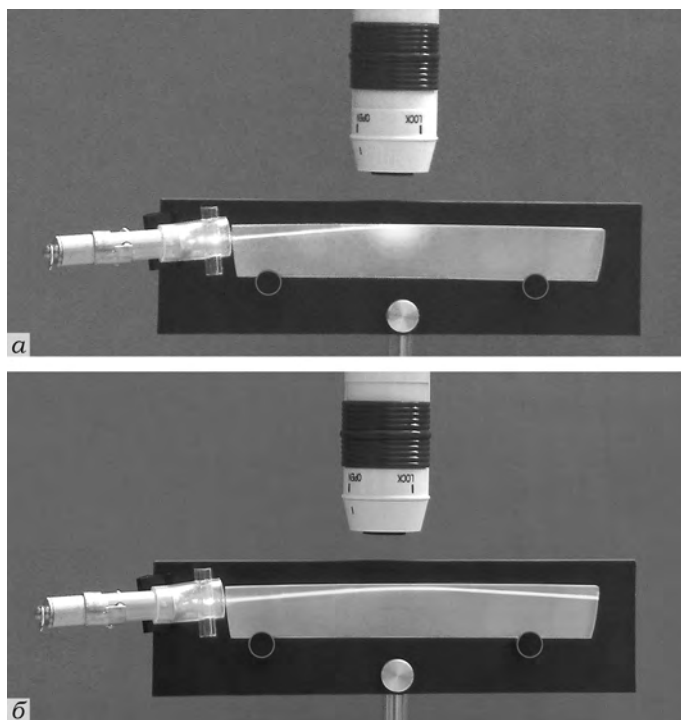


Рис. 6.13. Демонстрация полного внутреннего отражения света от слоисто-неоднородной среды: *а* — фен выключен, свет распространяется прямолинейно и рассеивается на верхней матовой грани полоски оргстекла; *б* — фен включен, струя горячего воздуха разогревает оргстекло сверху, в неравномерно нагретом оргстекле свет распространяется криволинейно и не достигает матовой грани

когда пучок света падает на верхнюю матовую грань полоски оргстекла толщиной 8–10 мм и рассеивается на ней. Эта полоска свободно лежит на двух эбонитовых держателях, установленных на гетинаксовой пластине. Полупроводниковый лазер куском резинового шланга закреплен на канцелярской скрепке, которая удерживает его на пластине в нужном положении. На лазер надет еще один кусок резинового шланга, в отверстия которого продет отрезок стеклянной трубки. Этот отрезок выполняет роль цилиндрической линзы, преобразуя близкий к параллельному пучок лазерного излучения в расходящийся в плоскости, перпендикулярной его оси. В результате на задней матовой поверхности полоски оргстекла получается хорошо видимый след светового пучка. На второй фотографии рис. 6.13 показано криволинейное распространение света в оргстекле через небольшое время после включения фена, горячей струей воздуха разогревающего оргстекло.

6.5. Компьютерное моделирование криволинейного распространения света

• В § 5.6 для компьютерного построения луча в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления использовалась готовая формула (5.11). Фактически компьютер, делая вычисления по этой формуле, на экране дисплея в определенном масштабе строил график функции (5.11). Но график этой функции вы умеете строить и без компьютера (см. § 5.2). А вот если в явном виде аналитическое уравнение светового луча не получено, то построить ход луча в оптически неоднородной среде будет совсем не просто. Компьютер позволяет непринужденно решить проблему, опираясь только на закон преломления и производя действия, аналогичные выполненным в § 5.1. Чтобы разобраться, как это можно сделать, обратимся к рис. 6.14.

Пусть плоскопараллельный образец оргстекла находится при температуре T' , и в некоторый момент температура верхней поверхности образца стала равна $T'' > T'$. Введем декартову систему координат xOy , совместив ось абсцисс с нижней поверхностью образца. Обозначим ординату верхней поверхности образца h'' и ординату точки входа луча в образец y_1 . Оргстекло прогревается сверху вниз, и при достижении стационарного режима граница между нагретой и ненагретой частями образца имеет координату h' .

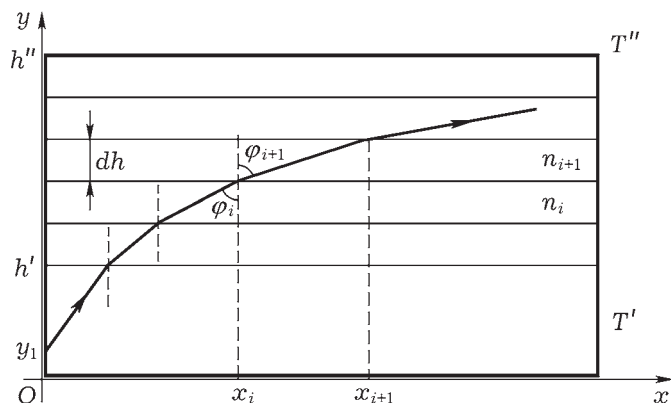
Тогда в соответствии с формулами (6.4) и (6.5) распределение температуры в нагретой части образца

$$T = \frac{T'' - T'}{h'' - h'} (y - h') + T', \quad (6.8)$$

и распределение показателя преломления

$$n = n' + \alpha \frac{T'' - T'}{h'' - h'} (y - h'). \quad (6.9)$$

Разобьем образец на плоскопараллельные слои одинаковой и настолько малой толщины dh , что в пределах каждого слоя



показатель преломления можно считать постоянным. Тогда на границе раздела двух слоев закон преломления имеет вид

$$\frac{\sin \varphi_i}{\sin \varphi_{i+1}} = \frac{n_{i+1}}{n_i}.$$

Отсюда

$$\sin \varphi_{i+1} = \frac{n_i}{n_{i+1}} \sin \varphi_i. \quad (6.10)$$

Если абсцисса выхода луча из i -го слоя x_i , то абсцисса выхода его из $i + 1$ -го слоя

$$x_{i+1} = x_i + dh \operatorname{tg} \varphi_{i+1} = x_i + dh \frac{\sin \varphi_{i+1}}{\sqrt{1 - \sin^2 \varphi_{i+1}}}. \quad (6.11)$$

Изложенного вполне достаточно, чтобы вы смогли самостоятельно написать программу, которая строит ход светового луча в неравномерно нагретом образце оргстекла.

● Возможный вариант требуемой компьютерной программы приведен ниже (*ray 2*). Как обычно, тем, кто только учится программировать, мы советуем либо ввести текст программы, либо отсканировать (сфотографировать на цифровой фотоаппарат) и распознать его, затем запустить программу и поработать с ней.

Далее нужно в деталях разобраться, как именно программа была написана.

```

[ ray2 ]
uses Graph;
{===== Входные данные =====}
const
  l      = 200; {Длина образца (мм)}
  h      = 20;  {Высота образца (мм)}
  n0     = 1.492; {Показатель преломления (ПП) оргстекла}
  phi0   = 86;   {Угол входа луча (0...90)}
  y1     = 4;   {Координата входа луча в образец}
  T1     = 20;  {Температура холодильника}
  T2     = 90;  {Температура нагревателя}
  h1     = 10;  {Координата слоя с температурой T1}
  alpha  = -0.00016; {Температурный коэффициент ПП}
  dh     = 0.01; {Высота слоя}
  sx     = 2.085; {Коэффициент пересчета координат по x}
  sy     = 2.085; {Коэффициент пересчета координат по y}
  cx     = 100; cy = 200; {Виртуальное начало координат}

var
  x, y, n1, n2, SinPhi, dy: Real;
  grDriver, grMode: Integer;
{===== Зависимость n от y =====}
function n(y: Real): Real;
begin
  if (y<h1) then n := n0
  else n := n0+alpha*((T2-T1)*(y-h1)/(h-h1));
end;

BEGIN
{===== Инициализация графического режима =====}
grDriver := Detect; InitGraph(grDriver, grMode, 'c:\bp\bgi');
{===== Начальные значения =====}
x := 0; y := y1; SinPhi := sin(phi0*pi/180);
{===== Рисование образца =====}
Rectangle(Round(cx+0*sx), Round(cy-h*sy),
          Round(cx+l*sx), Round(cy-0*sy));
{===== Установка толщины и цвета линии =====}
SetLineStyle(0,0,1); SetColor(4); dy := dh;
{===== Построение траектории луча =====}
MoveTo(Round(cx+x*sx), Round(cy-y*sy));
while (x<l) do begin
  n1 := n(y); n2 := n(y+dy); y := y+dy;
  {===== Проверка принадлежности y(x) образцу =====}
  if (y>h) or (y<0) then Break;
  SinPhi := SinPhi*n1/n2;
  x := x+dh*sqrt(1/(1-sqr(SinPhi))-1);
  LineTo(Round(cx+x*sx), Round(cy-y*sy));
  if (SinPhi>n2/n1) then dy := -dh; {Отражение луча}
end;
ReadLn; CloseGraph;
END.

```

Для самостоятельной проработки

1. Компьютерная модель и реальное явление. Полуцилиндр в рассмотренных выше экспериментах нужен лишь для того, чтобы сравнить полное внутреннее отражение от плоской границы раздела оптически однородных сред с аналогичным явлением, происходящим в слоисто-неоднородной среде. Установка для изучения последнего

явления может быть значительно проще. Вместо полуцилиндра достаточно взять узкую полоску оргстекла и пустить в ее торец световой пучок так, чтобы он падал на грань, обращенную к нагревателю (см. рис. 6.13). Такая установка в принципе может обеспечить сопоставление реального хода светового пучка и теоретически вычисленного. Для этого нужно предоставить компьютеру нарисовать на дисплее световой луч и рядом расположить образец оргстекла, в котором идет реальный световой пучок. Сделайте это.

2. Динамическая компьютерная модель. Рассмотренная в параграфе программа моделирует ход светового луча в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления. В опытах же вы наблюдаете явление в динамике: при включении нагревателя прямой луч постепенно начинает искривляться и, наконец, при достижении стационарного режима приобретает форму цепной линии. Попробуйте доработать представленную программу так, чтобы она моделировала развитие явления во времени подобно тому, как это происходит в действительности. Подскажем, как это сделать проще всего. Представьте, что в некоторый момент времени верхняя грань образца, температура которого T' , соприкоснулась с нагревателем, имеющим температуру T'' . Пусть за небольшое время dt прогрелся слой образца толщиной dh . Будем считать, что в этом слое установился стационарный режим так, что в нем имеется постоянный градиент температуры, определяемый разностью температур границ слоя. За следующий промежуток времени dt прогревается слой в два раза большей толщины и т. д. Составьте программу в соответствии с изложенной идеей. Подберите параметры компьютерной модели так, чтобы наблюдаемая на экране картина полностью (разумеется, с определенной точностью) соответствовала реальному явлению. Выявите упрощающие допущения предложенной модели.

Глава 7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЙ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИКИ

С криволинейным распространением света в оптически неоднородной среде связаны многие атмосферные явления, отличающиеся удивительной красотой. Далеко не каждому доводится стать их свидетелем в природе, причем не только потому, что эти явления редко происходят, но и потому, что в большинстве своем люди мало о них знают и поэтому стараются не замечать. Выполнив исследования этой главы, вы в искусственных условиях научитесь наблюдать и исследовать уникальные оптические явления. Вы получите миражи в неравномерно нагретых воздухе, воде и оргстекле. Экспериментально изучите одинарные, двойные и тройные миражи. В динамике исследуете возникновение и превращения фата-морганы. Созданные вами модели позволят не только качественно, но и количественно сравнивать миражи в различных средах. Вам предстоит собственными глазами увидеть зеленый луч и на разных физических моделях исследовать это редкое в природе оптическое явление. Наконец, вы научитесь создавать демонстрационные модели миражей и других явлений атмосферной оптики.

7.1. Модель миража Роберта Вуда

- Мираж — грандиозное явление природы, которое во все времена поражало воображение людей. Понятно поэтому желание построить модель этого явления, позволяющую проверить теорию миража. Одним из первых, кто смоделировал мираж в лабораторных условиях, был Роберт Вуд. Свою экспериментальную установку он описал следующим образом [1].

«Три стальные полосы, каждая длиной в 1 м, шириной в 20 см и толщиной в 3 или 4 мм, устанавливаются на железных треногах и тщательно выверяются в одной плоскости так, чтобы их верхние поверхности казались одной плоской поверхностью, в чем можно убедиться, смотря с одного из концов (рис. 7.1). Чтобы предупредить отражение, которое может получиться при скользящем падении, полосы посыпают сверху песком. Кусок матового стекла, освещенный сзади дуговой лам-

пой, представляет небо; вместо стекла можно взять зеркало, которое нужно расположить так, чтобы при наблюдении с противоположного



Рис. 7.1. Предложенная Р. Вудом модель миража, в которой для нагревания использованы газовые горелки

конца «пустыни» в нем отражалось небо. Искусственное небо должно доходить до уровня посыпанной песком поверхности; на его фоне располагается цепь гор, вырезанная из картона с вершинами от 1 до 2 см, долины должны опускаться до самого песка. «Пустыня» нагревается длинной газовой горелкой, сделанной из газовой трубы, в которой просверлен ряд небольших отверстий. Газ подводится с обоих концов трубы, высота пламени должна быть около 5 см. Если смотреть вдоль поверхности, посыпанной песком, держа глаз от 3 до 5 см выше этой поверхности, то при нагревании «пустыни» можно увидеть появление



Рис. 7.2. Такие фотографии миража получил на своей установке Р. Вуд

на песке блестящего пруда с водой, в котором видны перевернутые изображения гор и неба. Фотографии этого искусственного миража представлены на рис. 7.2.»

Установка Вуда действительно позволяет смоделировать явление миража, но делать ее в том виде, в каком в свое время (еще в 1899 году!) сделал Вуд, сейчас неразумно. Главный недостаток этой установки заключается в том, что каждый раз перед проведением опытов ее пришлось бы собирать и настраивать заново. С этим вполне можно было бы мириться, если бы сборка и наладивание установки требовали небольшого времени, а это не так. Второй существенный недостаток установки состоит в том, что в ней использованы газовые горелки. Я не могу представить себе учителя, который был бы спокоен, зная, что его ученики самостоятельно работают с газом. Это слишком опасно, да и совсем не нужно — мы сумеем предложить иные способы нагрева, обеспечивающие получение миража.

Критикуя известный прибор, мы одновременно вырабатываем требования к новому прибору, свободному от недостатков извест-

ного. Вот некоторые из таких требований: прибор должен быть совершенно безопасен; он должен быть всегда готов к работе; если прибор предполагается собирать перед работой с ним, то конструкция его должна быть такой, чтобы сборка прибора не отнимала слишком много времени (полчаса — максимальный срок), а сам прибор не требовал налаживания. В этом случае можно с достаточной уверенностью утверждать, что прибор будет применяться на практике; в иных условиях даже очень хороший прибор или экспериментальную установку никто использовать не станет: слишком велика плата временем за желание посмотреть физическое явление. Правда, меня никогда не останавливали временные затраты в попытках удовлетворить потребность увидеть новое явление. Думаю, и вы не должны слишком беспокоиться о своем времени: человек теряет его зря только тогда, когда ничего не делает. Но заботиться о времени своих товарищей нужно: делать приборы необходимо так, чтобы их применение требовало минимального времени — тогда вы высвободите время других для того, чтобы они могли использовать его с большей пользой, ну хотя бы на разработку таких приборов и опытов, которые не удалось сделать вам.

Пути совершенствования модели миража, предложенной Вудом, почти очевидны: в качестве нагревателя необходимо использовать нихромовую спираль, раскаляемую электрическим током; спираль нужно «спрятать» в кожух так, чтобы была исключена возможность соприкосновения с ней и поражения электрическим током; кожух должен быть таким, чтобы при скользящем падении световых лучей на его поверхности не наблюдалось зеркальное отражение света и т. д. Продумайте остальное самостоятельно и сопоставьте свой проект с моделью, которая описана ниже.

- Электрический нагреватель (рис. 7.3), используемый для моделирования миража, представляет собой дюралевую трубу 1 прямоугольного сечения размером 50×100 мм, длина которой составляет 1–2 м (мы опробовали трубы длиной 1 и 2 м; обе они давали вполне удовлетворительный мираж, но с более длинной трубой результаты эффективнее, хотя работа с ней менее приятна). В трубе расположен электрический нагреватель 2, выполненный из нихромовой спирали от электроплитки (диаметр спирали 5 мм, диаметр нихромового провода 0,5 мм, сопротивление ненагретой спирали 30 Ом). Труба заполнена чистым речным песком 3, выполняющим роль изолятора и наполнителя, фиксирующего в трубе спираль. Одно из отверстий трубы закрыто текстолитовой заглушкой 4, на которой расположены клеммы 5, соединенные

с концами спирали. Второе отверстие также закрыто текстолитовой заглушкой 6, в которую вкручены болты 7, соединенные между собой медной шинкой 8. На одной из стенок трубы расположены держатели 9, позволяющие закреплять прибор в штативах.

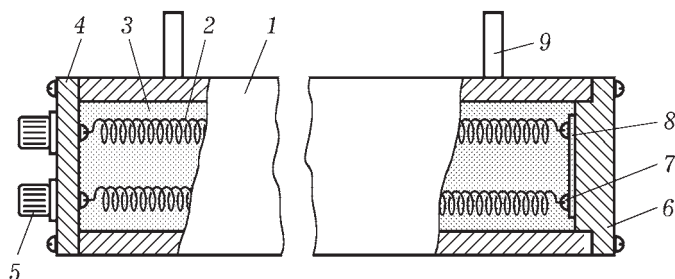


Рис. 7.3. Эскиз электрического нагревателя для моделирования миража в воздухе: это самый мощный нагреватель из всех, рассмотренных в книге

Сборку и налаживание прибора проведите в такой последовательности. К клеммам 5 подсоедините концы спирали 2 выбранной длины. Найдите середину спирали, привяжите к ней прочную нить, пропустите нить через трубу и, приставив заглушку 4 с клеммами 5 к одному отверстию трубы, за нить растяните спираль так, чтобы середина ее вышла из второго отверстия трубы. Далее спираль можно посередине разрезать; образовавшиеся концы ее нужно зажать под болты 7, соединенные медной шинкой 8. Заглушку с этими болтами прикрепите к трубе, трубу расположите вертикально и, оттянув заглушку 4 с клеммами, через образовавшееся отверстие понемногу засыпайте в трубу песок. Время от времени постукивайте по стенкам трубы, с тем чтобы песок уплотнялся; засыпку производите до тех пор, пока вся труба не заполнится песком. После этого заглушку 4 закрепите на трубе. На всякий случай авометром проверьте, не замыкает ли спираль на стенку трубы (этого, конечно, не должно получиться — песок надежно фиксирует спираль, но для собственного успокоения проверить нужно; более того, если вы при постановке опытов соедините трубу с заземлением, то получите совершенно безопасный прибор и полностью исключите возможность поражения электрическим током). Три грани трубы последовательно смажьте клеем БФ-2 и равномерно посыпьте тонким слоем песка. После высыхания клея прибор закрепите в двух штативах и подключите к автотрансформатору. Постепенно повышайте напряжение, подаваемое на нагреватель, и контролируйте температуру поверхностей трубы. Спешить здесь

не следует: прибор обладает значительной тепловой инерцией и нужно давать ему определенное время для прогрева. Подберите такое напряжение, при котором поверхность трубы прогревается до 100 °С за 15–20 минут (в нашей конструкции это напряжение составило 220 В).

Мне не хотелось бы здесь подробно описывать опыты с моделью — надеюсь, вы сможете поставить их вполне самостоятельно. Впрочем, можно и почитать следующие параграфы.

Для самостоятельной проработки

1. **Вуд Р. Физическая оптика.** — М.–Л.: ОНТИ, 1936. — 896 с. (С. 102–103).

2. **Вуд Р. Искусственные миражи** // Квант. — 1971. — № 10. — С. 29–32.

Приводится описание условий эксперимента, поставленного Робертом Вудом для изучения миража в лабораторных условиях.

2. **Тарасов Л. В. Физика в природе.** — М.: Просвещение, 1988. — 351 с. (С. 33–44).

В книге перечислены виды миражей, рассмотрены искривление светового луча в оптически неоднородной среде, радиус кривизны луча, нижние, верхние, двойные, тройные и сверхдальние миражи.

7.2. Моделирование миража в воздухе

● Различают три вида миражей: нижний, верхний и боковой. С *нижним миражом* каждый из вас многократно встречался, наблюдая его над разогретым асфальтовым или бетонным покрытием дороги. Нижний мираж чаще всего описывают в популярной литературе, рассказывая, как путешественники, томимые в пустыне жаждой, вдруг перед собой замечают озеро воды; они торопятся к озеру, а оно удаляется от них с тем большей скоростью, чем быстрее движение вперед, пока не исчезает совсем. Нижний мираж обусловлен искривлением световых лучей в слое более теплого воздуха, расположенном внизу, то есть вблизи земной поверхности.

Верхний мираж наблюдается тогда, когда слой более теплого воздуха расположен сверху, а к поверхности земли прилегает холодный воздух. Чаще всего такие условия имеют место в полярных областях: солнце прогревает воздух на некоторой высоте, а снизу он оказывается охлажденным, например, тающими льдами.

Боковой мираж встречается в случаях, когда граница между теплым и холодным воздухом вертикальна. Представьте себе озеро с высокими гористыми берегами. Восходящее солнце

прогревает один берег озера, в то время как противоположный остается холодным. Так образуются области теплого и холодного воздуха, соприкасающиеся по вертикальной границе.

Из сказанного ясно, что физическая суть нижнего, верхнего и бокового миражей одинакова и наблюдаемые результаты в общем тоже одинаковы: за счет криволинейного распространения света в воздухе с изменяющейся оптической плотностью наблюдатель видит не только сами предметы, но и их прямые или перевернутые (часто и деформированные) изображения. Поэтому для наблюдения в лабораторных условиях всех трех видов миражей достаточно создать в воздухе такой перепад температур, при котором границы между теплым и холодным воздухом были бы горизонтальны и вертикальны. Лучше сказать так: нужно создать такие распределения температуры в воздухе, при которых градиенты показателя преломления были бы направлены вниз, вверх и вбок. Именно это позволяет сделать описанный в предыдущем параграфе прибор, и вы легко убедитесь в сказанном, приступив к опытам.

- А делать их нужно так. Возле одного из концов трубы расположите небольшой предмет (если труба короткая, то предмет лучше поместить на расстоянии около метра от ее конца). В качестве предмета в простейшем случае можно использовать лампочку накаливания, рассчитанную на напряжение 6,5 В и снабженную матовым колпаком диаметром 25–40 мм. Включите нагреватель и подождите до тех пор, пока температура поверхностей трубы не станет близка к 100 °С. После этого нагреватель можно выключить — прибор будет охлаждаться очень медленно, и вы успеете провести все наблюдения.

Смотрите со второго конца трубы вдоль верхней, нижней или боковой ее поверхностей на предмет и попросите своего товарища медленно перемещать этот предмет в направлении, перпендикулярном лучу зрения, приближая и удаляя предмет от соответствующей поверхности трубы. Вы будете наблюдать соответственно нижний, верхний и боковой миражи. Последовательность искажений изображения круглого предмета при приближении его к модели, имеющей более высокую температуру, чем окружающий воздух, показана на фотографиях (рис. 7.4).

Мы рассмотрели так сказать «основательную» модель миража — прибор, не требующий настройки, всегда готовый к использованию, простой в обращении и безопасный. Сделав такой прибор для школы, вы можете быть уверены, что он будет применяться. Но не каждый из вас решится изготовить прибор,

подобный описанному, да и далеко не во всех школах условия таковы, что благоприятствуют этому. Видимо, имеет смысл кратко

рассказать здесь и о такой модели миража, которую вы сможете сделать даже у себя дома.

Прибор представляет собой длинную узкую кювету из тонкого металла, в которую можно наливать кипяток (рис. 7.5). Из тонкого дюралевого уголка соберите каркас 1 размером, например, $40 \times 60 \times 1000$ мм. Из листа алюминиевой фольги 2 толщиной 0,1–0,2 мм по размерам каркаса выгните кювету (посмотрите, как делаются бумажные или картонные коробки для упаковок и сделайте нечто подобное из фольги, только значительно больших размеров). Каркас введите внутрь кюветы и края фольги оберните вокруг него для придания кювете необходимой прочности. Проверьте качество вашей работы, залив в кювету воду, — боковые стенки кюветы при этом не должны выгибаться слишком сильно. Одну из стенок кюветы 3 снаружи покройте клеем БФ-2 и посыпьте песком.

Если предлагаемая кювета кажется вам не слишком надежной, то жидкостный нагреватель

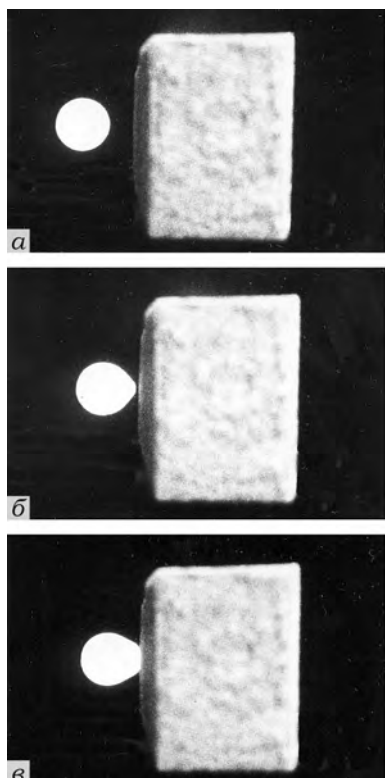


Рис. 7.4. Так искажается изображение круглого предмета при приближении предмета к достаточно длинному электрическому или водяному нагревателю

нетрудно спаять из тонкой латуни или жести. Его длина должна быть не менее 1 м, а сечение порядка 40×60 мм. Боковые стенки кюветы надо сделать плоскими и для устранения зеркального отражения одну из них покрыть тонким слоем чистого речного песка, приклеив его подходящим клеем (например, БФ-2). Внешний вид описанного прибора показан на рис. 7.6.

Наблюдения миража проводите вдоль этой стенки (очевидно, это будет боковой мираж). Если в кювету вы зальете только что вскипевшую воду, то мираж можно будет наблюдать в течение по крайней мере полчаса, что вполне достаточно для первоначаль-

ного ознакомления с явлением. В качестве объекта наблюдения можно использовать белый круг, искажения которого хорошо видны при изменении угла зрения.

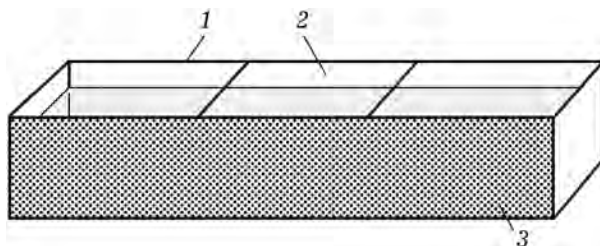


Рис. 7.5. Кювета из тонкой алюминиевой фольги, наполненная горячей водой, позволяет смоделировать мираж даже в домашних условиях



Рис. 7.6. Внешний вид кюветы для наблюдения миража в воздухе

Возможны и другие конструкции прибора для моделирования миража в воздухе. Вы сейчас владеете всеми основными идеями, поэтому мне достаточно сделать небольшой намек. Видели ли вы когда-нибудь гибкие электрогрелки? Уверю вас, что это почти готовая модель миража. Попробуйте! Не забывайте, однако, что электрогрелки работают от сетевого напряжения 220 В, поэтому экспериментировать с ними нужно, соблюдая осторожность.

Для самостоятельной проработки

1. Новосельцев В. Аномальные атмосферные явления // Квант. — 1996. — № 4. — С. 7–11.

Рассмотрены сложные случаи гало, миражей и других атмосферных оптических явлений, которые воспринимаются часто людьми как чудеса или непознанные объекты, но имеют в своей основе вполне объяснимые причины, нередко связанные с техногенной деятельностью человека.

7.3. Модель миража из неравномерно нагретого оргстекла

• Пусть брусок из оргстекла, температура которого равна температуре окружающего воздуха T' , в некоторый момент времени ставится своей нижней гранью на нагреватель, имеющий температуру $T'' > T'$ (рис. 7.7). На качественном уровне рассмотрите физику явлений, которые можно будет наблюдать сквозь оргстекло.

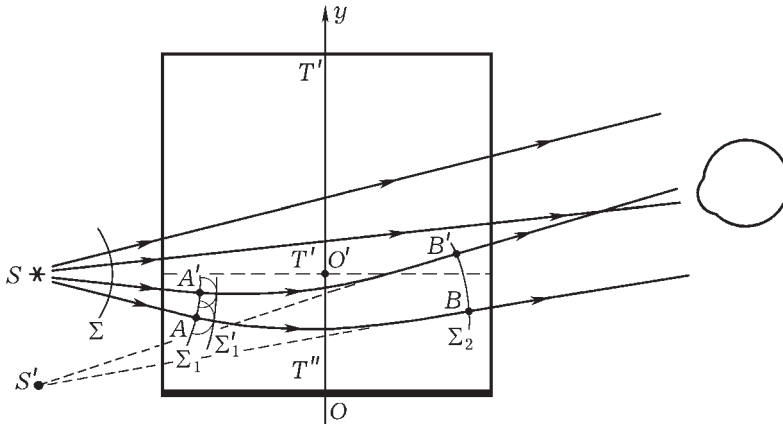


Рис. 7.7. Ход лучей в модели миража из неравномерно нагретого оргстекла

• От нагревателя по оргстеклу в направлении оси y будет распространяться поток тепла. Спустя определенное время прогреется слой оргстекла толщиной OO' , в котором температура будет изменяться от точки к точке, уменьшаясь в положительном направлении оси y . В соответствии с распределением температуры в переходном слое OO' непрерывно будет изменяться показатель преломления оргстекла в пределах от некоторого минимального значения n'' вблизи нагревателя до максимального значения n' вблизи верхней границы переходного слоя. Поскольку скорость света в веществе определяется отношением скорости света в вакууме к показателю преломления вещества $v = c/n$, то скорость света в более нагретых (нижних) слоях оргстекла будет больше, чем в менее нагретых (верхних).

Если брусок из оргстекла имеет плоскопараллельные прозрачные торцы, то наблюдение источника света S сквозь них даст следующее.

Во-первых, глаз увидит источник света в том месте, где он находится на самом деле, поскольку лучи света, распространяю-

щиеся выше переходного слоя OO' , идут через оптически однородное оргстекло и, следовательно, прямолинейны. Во-вторых, глаз увидит мнимое изображение S' источника. Это изображение дают лучи, проходящие сквозь оптически неоднородный слой OO' оргстекла, которые криволинейны.

В самом деле, точечный источник света S испускает сферическую волну Σ . Пусть, войдя в оргстекло, волновая поверхность занимает положение Σ_1 . По принципу Гюйгенса положение волновой поверхности в следующий момент времени можно найти, построив для этого момента вторичные световые волны с центрами в точках поверхности Σ_1 . Для простоты будем считать вторичные световые волны сферическими, хотя в оптически неоднородной среде они, очевидно, таковыми не являются. Поскольку свет в нижней (более нагретой) части бруска распространяется быстрее, чем в верхней (менее нагретой), то вторичная сферическая волна с центром в точке A будет иметь больший радиус, чем вторичная волна, испущенная точкой A' . В итоге волновая поверхность Σ'_1 , которая огибает все вторичные волны, окажется несколько повернутой по отношению к волновой поверхности Σ_1 . Вместе с поворотом волновой поверхности произойдет и поворот световых лучей, которые всегда нормальны фронту волны. Применяя принцип Гюйгенса шаг за шагом, мы приходим к выводу, что по выходе из неравномерно нагретого оргстекла волновая поверхность должна занять положение Σ_2 .

Этот же результат можно получить, используя принцип Ферма: время распространения света от точек волновой поверхности Σ_1 до соответствующих точек поверхности Σ_2 должно быть одинаковым (обращаем внимание читателя на связь между принципами Гюйгенса и Ферма!), поэтому волновые поверхности в оптически неоднородной среде деформируются и поворачиваются, а световые лучи криволинейны.

Важно еще раз подчеркнуть, что изгиб светового пучка происходит в сторону от меньших к большим значениям показателя преломления и выражен тем сильнее, чем быстрее изменяется показатель преломления в направлении оси y (чем больше градиент показателя преломления).

Ясно, что если перед бруском неравномерно нагретого оргстекла находится не точечный источник света, а предмет конечных размеров, то сквозь оргстекло будут наблюдаться сам предмет и его мнимое перевернутое изображение. Именно это явление и процесс развития его в динамике вы должны увидеть в опытах с моделью миража.

Для самостоятельной проработки

1. Двойной мираж. Выясните, как должен изменяться показатель преломления среды, чтобы стало возможным наблюдение двойного миража, то есть одновременно перевернутого и прямого мнимых изображений предмета.

7.4. «Лужи» внутри оргстекла

- Вернитесь к самому началу (§ 2.1), когда говорилось о возможных «лужах» внутри оргстекла, и постройте, наконец, модель миража из неравномерно нагретого оргстекла.

- Внешний вид одной из возможных конструкций предлагаемой модели миража изображен на рис. 7.8. В ней использован брусок оргстекла сечением 45×60 мм и длиной 100–150 мм, все

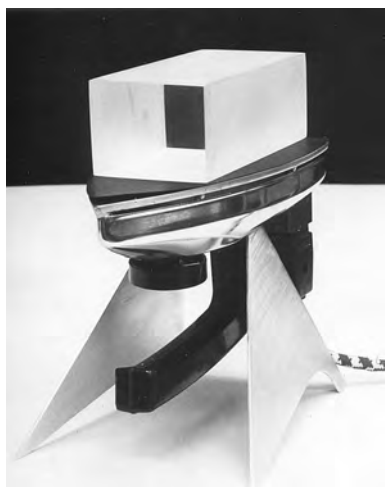


Рис. 7.8. Модель миража из бруска оргстекла, установленного на горячем утюге

границ которого обработкой шкуркой сделаны матовыми, а торцы отполированы пастой ГОИ на туго натянутой и смоченной керосином грубой ткани так, что совершенно прозрачны. Разумеется, приведенные размеры бруска могут быть изменены в широких пределах в зависимости от конкретных возможностей изготовителя. В качестве нагревателя в модели применен электроутюг, установленный на подставке так, что его плоская поверхность расположена сверху. На эту поверхность помещен лист черной бумаги. Вместо утюга можно использовать электроплитку, положив на нее слой асбеста, а поверх него — черную бумагу.

Перед проведением опыта определяют напряжение, при котором нагреватель дает температуру порядка 100°C . Для этого нагреватель подключают к автотрансформатору типа РНШ и, постепенно повышая напряжение, тем или иным способом оценивают получающуюся температуру поверхности нагревателя. Можно питать электроплитку или утюг непосредственно от электроосветительной сети, определив предварительно время, необходимое для прогрева их поверхностей до 100°C . Поскольку

тепловая инерция этих приборов значительна, при постановке опытов их можно вначале нагреть, а затем выключить и дальше работать с обесточенными нагревателями.

На поверхность разогретого нагревателя помещают брусок оргстекла, перед одним из торцов его располагают какой-нибудь предмет (для бруска указанных выше размеров высота предмета не должна превышать 10–15 мм), освещают его и наблюдают предмет через второй торец. По мере прогрева оргстекла его нижняя матовая грань постепенно становится «зеркальной» и появляется мираж. На рис. 7.9 представлены фотографии, иллю-

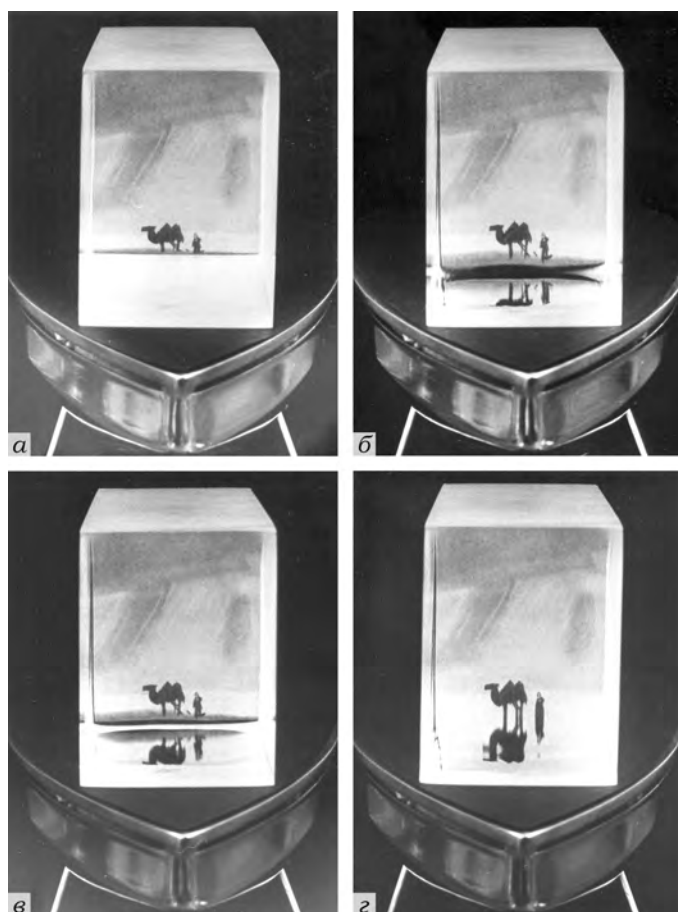


Рис. 7.9. «Лужи» внутри оргстекла: на первой фотографии оргстекло имеет комнатную температуру; остальные получены при постепенном росте температуры нижней грани бруска

стрирующие последовательность появления мнимого изображения предмета при постепенном нагревании оргстекла.

С одним бруском оргстекла описанный опыт может быть повторен неограниченное число раз, если оргстекло не перегревать: размягчение оргстекла при нагреве приведет к деформации торцов бруска и, что самое неприятное, к изменению структуры оргстекла, в результате которого после охлаждения оргстекло сохранит оптическую неоднородность. Впрочем, брусок имеет четыре грани, каждая из которых может быть рабочей, поэтому случайный перегрев одной из них еще не приводит к необходимости изготовления нового бруска.

Для самостоятельной проработки

1. Броунов П. И. Атмосферная оптика. — М.: Гостехиздат, 1924. — С. 26–51.

В этой книге подробно рассмотрено явление миража, приведены собственные наблюдения автора. Описываемые явления сопровождаются глубоким теоретическим анализом.

7.5. Сравнение моделей миража в оргстекле и в воздухе

● Описанные в предыдущем параграфе опыты показывают, что неравномерно нагретое оргстекло может быть использовано в качестве слоисто-неоднородной среды, позволяющей смоделировать мираж. Прежде чем приступить к дальнейшим экспериментам, выполним оценочные расчеты.

Брусок из оргстекла, находящийся при комнатной температуре $T' = 20^\circ\text{C}$, нижней гранью поместили на плоский нагреватель, имеющий температуру $T'' = 90^\circ\text{C}$. На переднем торце бруска нарисован предмет, высота которого, измеренная от нижней грани, составляет h . Выясним, какова должна быть длина бруска l , чтобы при наблюдении через второй торец в направлении середины нижней грани бруска был виден мираж всего предмета полностью.

Прежде всего напомним, что показатель преломления оргстекла при температуре $T' = 20^\circ\text{C}$ равен $n' = 1,492$, а при температуре $T'' = 90^\circ\text{C}$, согласно формуле (6.1), он примерно равен $n'' = 1,481$. Ясно, что спустя некоторое время после помещения бруска на нагреватель температура его нижней грани станет равна температуре нагревателя T'' , а температура оргстекла на высоте h от нижней грани бруска еще останется комнатной T' . Тогда соответствующие показатели преломления оргстекла

составят n'' и n' . Очевидно, в условиях поставленной задачи будет наблюдаться мираж всего предмета полностью (в виде «зеркального» отражения предмета в нижней грани бруска), если световой луч, направленный от верхней точки предмета в середину нижней грани, входит в слоисто-неоднородную среду под углом, не меньшим предельного $\varphi_{1\text{пр}}$. Выше найдено значение синуса предельного угла: $\sin \varphi_{1\text{пр}} = n''/n'$ (см. (6.7)). С другой стороны, из геометрических соображений (рис. 7.10) синус предельного угла

$$\sin \varphi_{1\text{пр}} = \frac{l/2}{\sqrt{h^2 + l^2/4}}$$

(на этом рисунке с целью упрощения вместо криволинейного изображен прямолинейный ход луча, и преломление света при

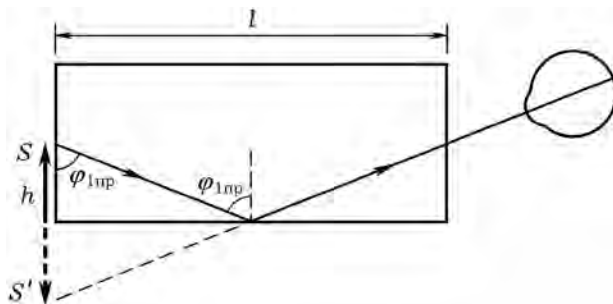


Рис. 7.10. К вычислению наименьших размеров установки для наблюдения миража

выходе его из заднего торца бруска не показано). Отсюда после элементарных преобразований имеем

$$l = \frac{2h}{\sqrt{(n'/n'')^2 - 1}}. \quad (7.1)$$

Подстановка в последнюю формулу вместо n' и n'' их значений дает $l \approx 16,6h$.

Таким образом, в рассмотренных условиях можно увидеть полный мираж предмета, если длина бруска не меньше чем в 17 раз превышает высоту предмета.

Интересно и небесполезно сравнить между собой миражи, полученные на моделях из оргстекла и из воздуха. Пусть воздух, имеющий температуру $T' = 0^\circ\text{C}$, соприкасается с плоской поверхностью нагревателя, находящегося при температуре $T'' = 100^\circ\text{C}$. Как и раньше, найдем соотношение между высотой h предмета, расположенного на поверхности нагревателя вблизи

одного из его концов, и длиной l этого нагревателя, чтобы при наблюдении с другого конца в направлении середины нагревателя был виден мираж всего предмета, а не какой-то его части.

Для решения поставленной задачи нужно знать зависимость показателя преломления воздуха от температуры. Эта зависимость, как известно [5], выражается следующей формулой:

$$n = 1 + \frac{n' - 1}{1 + \alpha T}, \quad (7.2)$$

где $n' = 1,000292$ при $T = T' = 0^\circ\text{C}$ и $\alpha = 1/273\text{K}^{-1}$. Подстановка в эту формулу значения $T'' = 100^\circ\text{C}$ дает $n'' = 1,000214$. Пользуясь полученными значениями показателя преломления, по формуле (7.1) находим, что приблизительно $l \approx 160h$. Таким образом, при использовании одинаковых по размерам предметов и приблизительно одинаковых перепадов температур модель миража в воздухе должна иметь в 10 раз бóльшую длину, чем модель миража в оргстекле. В этом нетрудно убедиться на опыте.

Разработайте и изготовьте простейшие экспериментальные установки для моделирования миража в воздухе и в оргстекле. Пронаблюдайте и сравните между собой модели миража на этих установках.

● Поскольку температура нагрева оргстекла и воздуха в обеих экспериментальных установках не должна превышать 100°C ,

в качестве нагревателей можно использовать металлические кюветы с горячей водой (см. § 7.2).

Обратимся сначала к моделированию миража в неравномерно нагретом оргстекле. Подберите или изготовьте брусок из оргстекла сечением примерно 45×60 мм (брусок, сечение которого меньше, чем 20×30 мм, неудобен в работе) и длиной $100\text{--}150$ мм. Торцы этого бруска должны быть прозрачными, а остальные четыре грани — матовыми. Из латуни или жести толщиной не более $0,6$ мм спаяйте прямоугольную кювету размером примерно $30 \times 50 \times 160$ мм. Кювету установите рядом с бруском так, чтобы одна из боковых стенок кюветы соприкасалась с матовой гранью бруска (рис. 7.11).

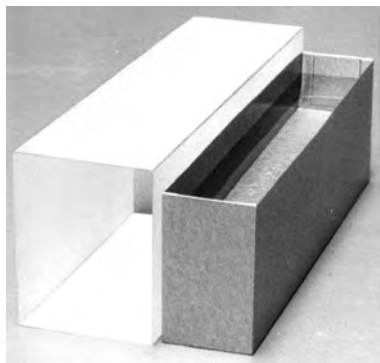


Рис. 7.11. Для моделирования миража можно использовать брусок из оргстекла, к одной из граней которого прикасается кювета с горячей водой

Кювету установите рядом с бруском так, чтобы одна из боковых стенок кюветы соприкасалась с матовой гранью бруска (рис. 7.11).

Вблизи одного из торцов бруска расположите предмет размером около 10 мм (можно использовать подходящий рисунок) и смотрите сквозь второй торец бруска в направлении середины той его грани, которая касается стенки кюветы. Вы будете видеть эту грань матовой и одновременно станете наблюдать сам предмет (рис. 7.12 *а*; здесь предметом является бумажная стрелка, на

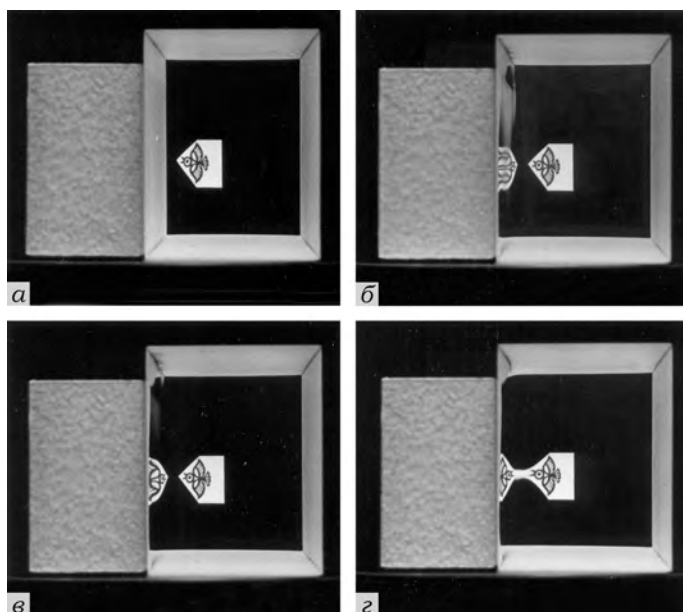


Рис. 7.12. Модель миража из неравномерно нагретого оргстекла: *а* — брусок оргстекла имеет комнатную температуру; *б*, *в*, *г* — в кювету залита горячая вода, и оргстекло вблизи кюветы постепенно нагревается

которой нарисована птичка). Теперь залейте в кювету только что вскипевшую воду. Спустя несколько секунд вы заметите, как матовая грань бруска отдельными участками становится как бы зеркальной и в ней появляется отражение — мираж! — предмета (рис. 7.12 *б*). Постепенно вся матовая грань, соприкасающаяся с кюветой, превращается в своеобразное зеркало, и вы наблюдаете отчетливый мираж предмета (рис. 7.12 *в*). Следующая стадия развития миража показана на рис. 7.12 *г*. Если вы слегка измените угол наблюдения так, что угол падения света от предмета на нагреваемую грань бруска уменьшится, то мираж будет иметь вид, показанный на рис. 7.13 *а*. При изменении угла наблюдения в противоположном направлении мираж трансформируется, как это показано на рис. 7.13 *б*.

Что касается модели миража в воздухе, то для сравнения с моделью миража в оргстекле можно использовать тот ее вариант, который описан в § 7.2.

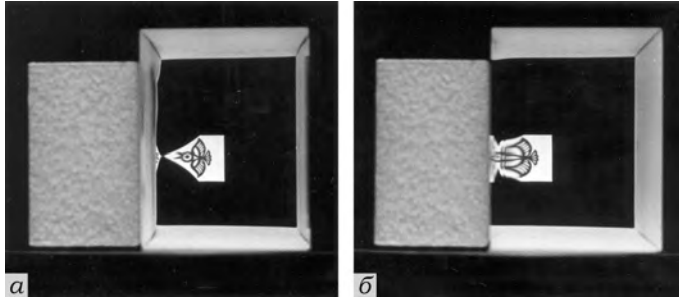


Рис. 7.13. Если градиент показателя преломления оргстекла сохраняется неизменным, то вид миража зависит от угла наблюдения

Для самостоятельной проработки

1. Модель миража в оргстекле с электрическим нагревателем может быть собрана так, как это показано на рис. 7.14: на текстолитовом основании вертикально закреплен нагреватель, по одну сторону от него расположен брусок из оргстекла, а по другую, примерно на таком же расстоянии, что и брусок, — терморезистор, являющийся датчиком температуры термоиндикатора или терморегулятора. Изготовьте подобный прибор и исследуйте его в работе.

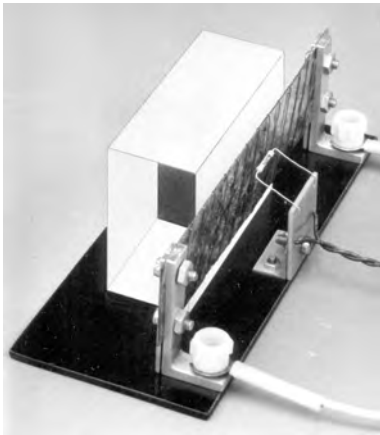


Рис. 7.14. Модель миража с электрическим нагревателем: использован терморегулятор, схема которого приведена на рис. 6.3

2. Миннарт М. Свет и цвет в природе. — М.: Наука, 1969. — 360 с. (С. 60).

3. Броунов П.И. Атмосферная оптика. — М.: ГНТИ, 1924. — С. 26.

Воспользовавшись рекомендованными книгами, вы можете пополнить свои знания о миражах.

4. Исследование оптической неоднородности. Вдоль боковой стенки кюветы (рис. 7.11) через оргстекло направьте узкий пучок излучения полупроводникового лазера так, чтобы свет падал на удаленный на несколько метров экран. В кювету залейте горячую воду. При этом на экране будет наблюдаться смещение светлого пятна. Поступатель-

но перемещайте лазер в направлении, перпендикулярном нагреваемой поверхности оргстекла. Наблюдая за смещением лазерного пятна на экране, сделайте заключение о характере оптической неоднородности оргстекла.

5. Физический практикум. Электричество и оптика / Под ред. В. И. Ивероновой. — М.: Наука, 1968. — 816 с. (С. 465, 466).

Дана зависимость показателя преломления воздуха от температуры.

7.6. Длина нагревателя для искривления луча в воздухе

● Вы построили модель миража в воздухе (см. § 7.1 и § 7.2) и пронаблюдали изображения предметов сквозь слой воздуха, соприкасающийся с нагретой поверхностью. Теперь исследуйте распространение узкого пучка света в этом слое.

В экспериментальной установке можно использовать кювету размером $40 \times 60 \times 1000$ мм, спаянную из латуни или жести толщиной 0,5 мм, боковые стенки которой покрыты клеем БФ-2 и присыпаны речным песком так, что имитируют песчаную поверхность Земли. В качестве источника узкого светового пучка лучше всего взять полупроводниковый лазер. На расстоянии 5–10 м от середины кюветы установите белый экран или просто направьте лазерный пучок на белую стену.

Для измерения температуры можно использовать термометр, погруженный в кювету. Однако он дает значение температуры воды, поэтому полученные данные являются оценочными для температуры воздуха.

Более точные измерения температуры в слое воздуха, граничащем с наполненной горячей водой кюветой, можно выполнить с помощью малоинерционной термопары (см. задание 1 в § 4.2).

Эксперимент проведите следующим образом. Включите полупроводниковый лазер и направьте узкий пучок света на белый экран, расположенный на расстоянии 5–10 м от лазера. На экране сделайте метку, обозначающую положение светлого пятна. Для повышения точности удобно отмечать положение первого дифракционного минимума картины, которая образуется на экране. Возле лазера подведите кювету к световому пучку так, чтобы он скользил вдоль ее боковой стенки вблизи дна кюветы. В кювету налейте только что вскипевшую в электрочайнике воду (достаточно примерно 0,5 л, так чтобы получился слой толщиной около 1 см). При этом на экране вы будете наблюдать смещение пятна в сторону от боковой поверхности кюветы.

Перемещайте и слегка поворачивайте кювету так, чтобы смещение пятна на экране стало максимальным. В этом случае, очевидно, световой пучок падает на середину кюветы под предельным углом полного внутреннего отражения.

В наших опытах получились следующие результаты. Температура воздуха в лаборатории $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура стенки кюветы, измеренная термпарой, $-53\text{ }^{\circ}\text{C}$, расстояние до экрана $l = 5\text{ м}$, смещение луча по экрану $x_3 = 53\text{ мм}$.

Попробуем теоретически объяснить экспериментальные результаты. Схема эксперимента представлена на рис. 7.15 (1 — полупроводниковый лазер, 2 — кювета с горячей водой, 3 — белый экран для наблюдений). Упрощенно можно считать, что световой пучок испытывает полное внутреннее отражение от нагретого слоя воздуха, соприкасающегося с кюветой. Тогда из закона преломления: $\sin i_{\text{пр}} = n_2/n_1$, где n_2 и n_1 — показатели преломления воздуха, непосредственно соприкасающегося с кюветой, и воздуха, находящегося вдалеке от нее.

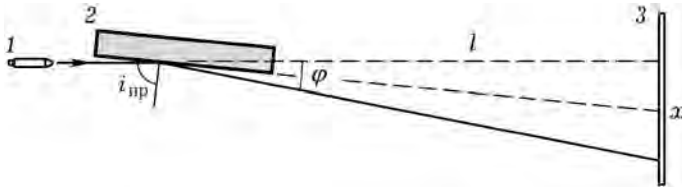


Рис. 7.15. К вычислению смещения луча при полном внутреннем отражении от нагретого слоя воздуха

Угол отклонения луча от первоначального направления $\varphi = 2(\pi/2 - i_{\text{пр}})$. Синус этого угла $\sin \varphi = \sin(\pi - 2i_{\text{пр}}) = 2 \sin i_{\text{пр}} \cos i_{\text{пр}}$. Так как угол φ мал, его тангенс можно заменить синусом. Отсюда смещение светлого пятна по экрану

$$x = l \sin \varphi = 2l \frac{n_2}{n_1} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}. \quad (7.3)$$

Зная зависимость показателя преломления воздуха от температуры (задание 5, § 7.5)

$$n = 1 + \frac{n' - 1}{1 + \alpha T},$$

где $n' = 1,000292$ при $T = T' = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\alpha = 1/273\text{ К}^{-1}$, можно рассчитать показатели преломления воздуха. Для $T_1 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_2 = 53\text{ }^{\circ}\text{C}$ получаются значения $n_1 = 1,000268$ и $n_2 = 1,000245$, а их отношение $n_2/n_1 = 0,999977$. Подставляя это значение

в формулу (7.3) для смещения луча по экрану, получаем $x_T = 6,8 \cdot 10^{-2}$ м. Это несколько отличается от полученной в эксперименте величины $x_э = 53$ мм. Такое различие объясняется, очевидно, тем, что световой пучок не выходит из области нагретого стенкой кюветы воздуха, а в расчетах в качестве T_1 мы брали комнатную температуру воздуха. Если термомпарой измерить температуру воздуха вблизи кюветы в тех точках, через которые проходит световой пучок, то получится значение $T_1 = 31$ °С; ему соответствуют показатель преломления $n_1 = 1,000262$ и отношение $n_2/n_1 = 0,999983$. По этим данным смещение по экрану пятна от лазерного пучка составляет $x_T = 5,8 \cdot 10^{-2}$ м, что значительно ближе к экспериментальным результатам.

Выполненное вами экспериментальное и теоретическое исследование криволинейного распространения света в слое неравномерно нагретого воздуха показывает, что это явление в принципе можно было бы использовать для постановки лабораторной работы физического практикума. Единственный (но существенный!) недостаток экспериментальной установки заключается в том, что в ней используется кювета длиной в метр. Выясните, нельзя ли сократить длину кюветы.

- На первый взгляд кажется, что длина кюветы с горячей водой никакой роли не играет: пучок света узок, поэтому испытает полное внутреннее отражение от значительно более короткой кюветы. Проверьте это. Замените в экспериментальной установке кювету на более компактную, размерами, например, $30 \times 50 \times 160$ мм (такую кювету вы использовали для неравномерного нагрева оргстекла в § 7.5). Повторите описанный выше опыт, и вы обнаружите, что пучок лазерного излучения отклоняется, но это отклонение незначительно по сравнению с тем, которое наблюдалось раньше. Почему для искривления луча в воздухе нельзя использовать нагреватель такой же длины, который обеспечивал искривление луча в оргстекле?

Чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к рис. 7.16. Обозначим диаметр светового пучка d . Чтобы весь пучок испытал

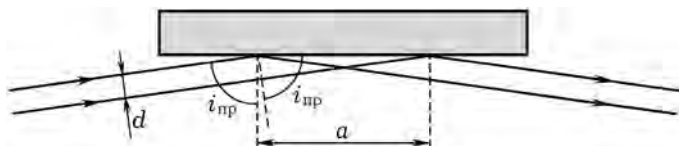


Рис. 7.16. К определению расстояния, на котором изменяет свое направление пучок света

полное внутреннее отражение от нагретого воздуха, длина кюветы не должна быть меньше величины a . Пучок света падает на кювету под предельным углом $i_{\text{пр}}$, тогда

$$a = \frac{d}{\cos i_{\text{пр}}} = \frac{d}{\sqrt{1 - \sin^2 i_{\text{пр}}}} = \frac{d}{\sqrt{1 - n_2^2/n_1^2}}.$$

При $d = 1$ мм, $n_1 = 1,000262$, $n_2 = 1,000245$ получаем, что $a = 172$ мм. Полупроводниковый лазер на расстоянии 0,5 м от себя дает пучок диаметром $d = 3$ мм. Тогда отрезок стенки кюветы, распространяясь вдоль которого пучок полностью отклонится, составляет $a = 516$ мм. Отсюда следует, что делать нагреватель длиной менее полуметра нецелесообразно.

Для самостоятельной проработки

1. Тарасов Д. Л., Тарасов Л. В. А что будет, если...? // Квант. — 1986. — № 12. — С. 9–11.

Рассматриваются явления, которые исчезнут, «если скорость света во всех прозрачных средах вдруг станет равна скорости света в вакууме».

2. Толщина оптически неоднородного слоя воздуха. Используя термопару и мультиметр, оцените толщину слоя воздуха, который прогревается вблизи стенки кюветы с горячей водой. Оптическим методом с помощью полупроводникового лазера убедитесь в правильности сделанной оценки.

3. Усилитель постоянного тока для термопары. Принципиальная схема предлагаемого прибора изображена на рис. 7.17. Его основой является операционный усилитель типа К140УД6 или К140УД7. Измерительный прибор $PV1$ — вольтметр типа М28 с нулем посередине шка-

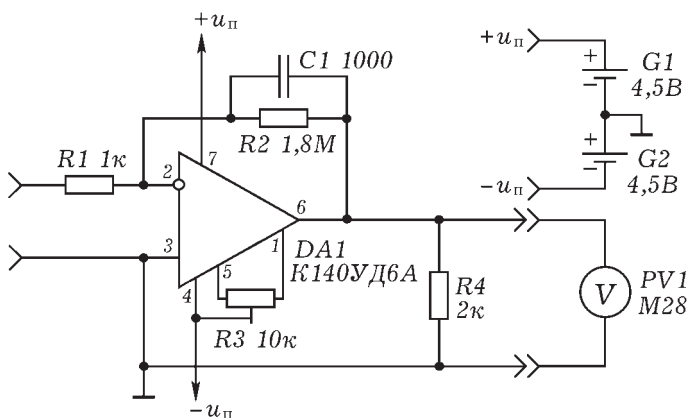


Рис. 7.17. Принципиальная схема усилителя постоянного тока для термопары

лы и пределами измерения 3 В и 0,5 В; для получения максимальной чувствительности используют предел 0,5 В. Конденсатор $C1$ выполняет роль фильтра, шунтируя резистор обратной связи $R2$ по переменной составляющей. Конструктивно прибор может быть выполнен навесным монтажом на плате из фольгированного гетинакса, в которой резаком сделаны необходимые прорези. Соединение с батареей питания лучше производить посредством специального разъема.

Налаживание прибора производят следующим образом. Вход усилителя замыкают накоротко и подстроечным резистором $R3$ балансируют операционный усилитель, устанавливая стрелку вольтметра на нуль. Далее эта установка сохраняется неопределенно долго, дрейф нуля практически отсутствует. Резистор $R3$ лучше взять с винтовой регулировкой.

7.7. Модель фата–морганы

- Фата–моргана — это сложный, сравнительно быстро и причудливо изменяющийся мираж, часто напоминающий города с крепостными стенами, башнями и дворцами, появление которого людская молва связывала с проделками некоей феи Морганы. Вы сейчас владеете всем необходимым, чтобы смоделировать мираж любой сложности. Попробуйте получить мираж, в котором помимо самого предмета видны два симметрично расположенных относительно него зеркальных изображения. Разработайте и соберите установку, позволяющую получить мираж на экране так, чтобы его могли видеть одновременно многие наблюдатели.

- Приготовьте брусок из оргстекла размером примерно $30 \times 60 \times 100$ мм. Торцы бруска площадью 30×60 мм должны быть отполированы; остальные четыре грани нужно отшлифовать так, чтобы они были матовыми. Изготовьте второй электрический нагреватель, точно такой же, как первый (рис. 6.7). Расположите брусок так, чтобы его прозрачные торцы были вертикальны, и рядом с бруском параллельно его боковым граням на расстояниях 20–30 мм от них разместите нагреватели (рис. 7.18). Перед одним из торцов бруска поставьте небольшой предмет шириной не более 10–15 мм и смотрите на него сквозь противоположный торец.

Вы увидите картину, подобную той, которая изображена на рис. 7.19а. Включив нагреватели, спустя небольшое время вы обнаружите, что по обе стороны от предмета появляются два его зеркальных изображения (рис. 7.19б)! Обратите внимание на боковые грани бруска: при наблюдениях эти матовые грани становятся похожими на зеркала; на фотографиях они как бы

исчезают (в них отражается темный фон, находящийся перед бруском). При дальнейшем нагревании боковых граней бруска

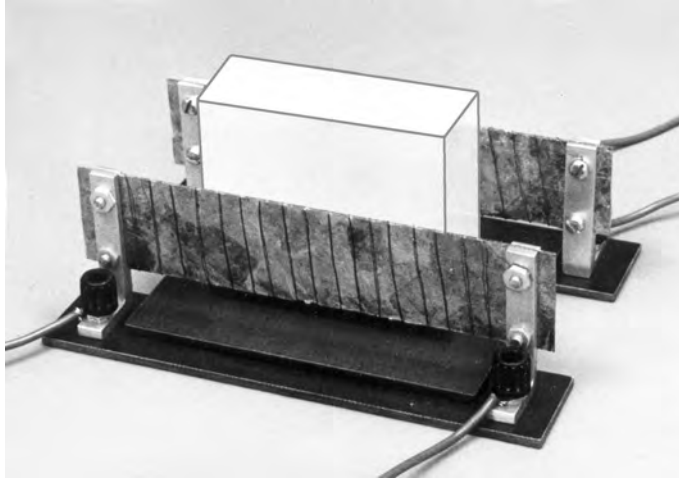


Рис. 7.18. Прибор для моделирования фата-морганы

становятся заметными искажения самого предмета (рис. 7.19 в); фактически в центре поля зрения вы наблюдаете прямой, а по краям — два перевернутых миража предмета. Если нагреватели выключить, то некоторое время за счет тепловой инерции фата-моргана продолжает развиваться (рис. 7.19 г), и при внимательном наблюдении вы можете заметить появление еще двух новых миражей, правда, значительно более искаженных по сравнению с первыми. Далее, по мере охлаждения оргстекла фата-моргана постепенно исчезает (рис. 7.19 д, е). Любопытно отметить, что поперечный размер миража на последней из приведенных фотографий существенно больше, чем соответствующий размер самого предмета на первой. Вы в состоянии объяснить это явление, поэтому укажем только, что оно прекрасно моделирует нередко наблюдающийся в природе увеличенный мираж.

Чтобы в описанном опыте получить наиболее эффектные результаты, важно подобрать оптимальные расстояния от бруска до предмета и до глаза наблюдателя. Мы предпочитаем располагать предмет на расстоянии 10–20 см от переднего торца бруска и глаз — на расстоянии 30–50 см от его заднего торца. Вместо электрических нагревателей практически с тем же успехом, но с несколько меньшими удобствами можно использовать жидкостные. Тогда установка для моделирования фата-морганы

будет представлять собой брусок из оргстекла, к боковым граням которого прижаты две плоские кюветы из тонкой латуни или жести, заполненные горячей водой. Такую установку вы сможете собрать даже у себя дома. Начинаящим нередко не удается при шлифовке и полировке торцов бруска избежать завалов по их краям. Если эти завалы невелики, то они обычно не мешают наблюдениям. Кардинальный способ устранения вредного влияния завалов заключается в изготовлении такого бруска, у которого нагреваемые грани несколько заглублены, так сказать, «внутри» оргстекла.

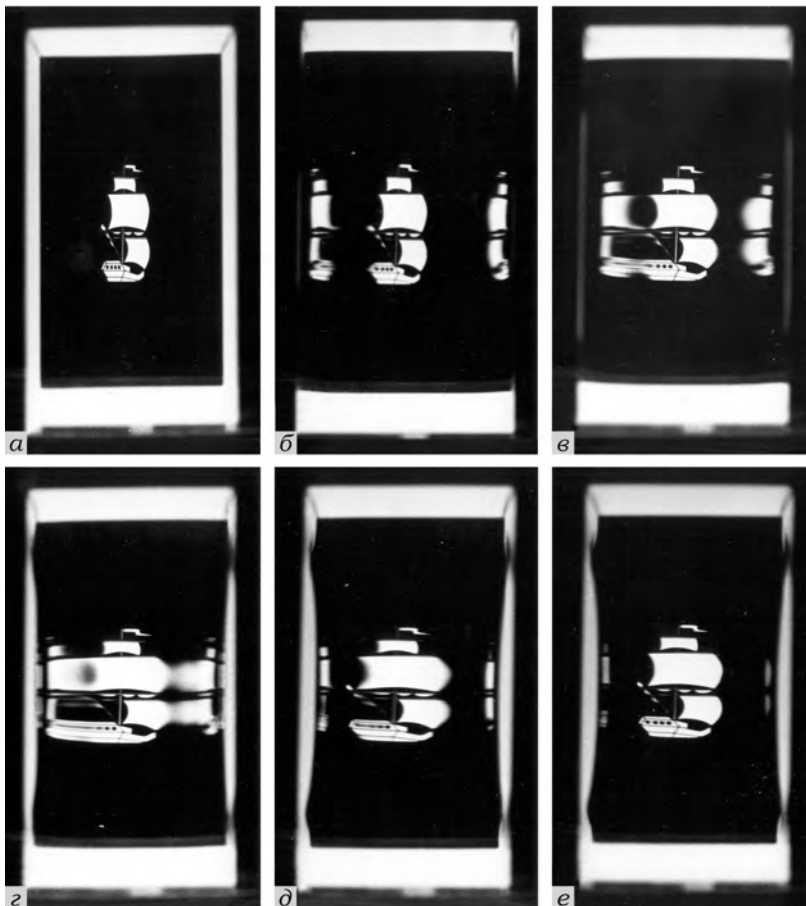


Рис. 7.19. Модель фата-морганы: *а* — нагреватели выключены; *б, в* — идет постепенный разогрев оргстекла; *г, д, е* — неравномерно нагретое оргстекло охлаждается

Имеет смысл заметить, что в установке, фотография которой приведена на рис. 7.18, целесообразно использовать брусок из оргстекла, длина которого не меньше длины нагревателей (на фотографии изображен более короткий брусок только для того, чтобы были видны оба нагревателя).

Для самостоятельной проработки

1. Градиентная линза в качестве модели фата–морганы.

В некоторых случаях сверхдальние миражи и фата–моргана возникают за счет линзоподобного действия слоев воздуха земной атмосферы. Разработайте и поставьте опыт, в котором фата–моргана создается градиентной линзой.

2. Гринева Г. И., Розенберг Г. В. Дела и проделки феи Морганы // Квант. — 1984. — № 8. — С. 20–26.

Описаны различные проявления криволинейного распространения света в атмосфере, их отрицательное и положительное влияние на жизнь и деятельность человека.

7.8. Мираж на экране

● Фата–моргану или мираж можно получить на экране. Эксперимент в этом случае получается, пожалуй, даже более впечатляющим, чем при визуальном наблюдении (хотя, разумеется, изучать явление лучше, если наблюдения производить непосредственно глазом). Попробуйте разработать демонстрационную установку, позволяющую в динамике получать изображение предмета и его мираж на экране.

● Схема соответствующей установки приведена на рис. 7.20. В качестве предмета проще всего использовать лампочку карманного фонаря 1. Она должна быть расположена около прозрачного торца бруска 2 из оргстекла вблизи его матовой грани. Рядом

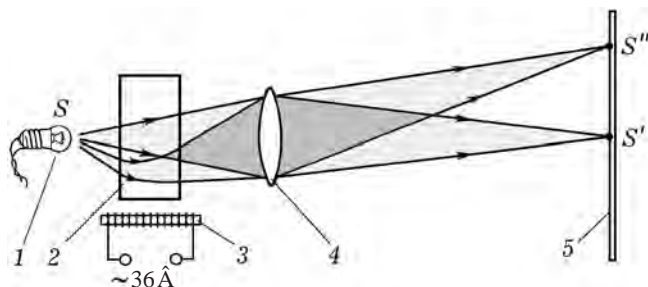


Рис. 7.20. Схема установки для демонстрации миража на экране

с этой гранью параллельно ей нужно разместить электрический нагреватель $З$. Объектив 4 с фокусным расстоянием 8–10 см дает на белом экране 5 изображение S' предмета S . При включении нагревателя видно, как постепенно появляется мираж S'' предмета.

На рис. 7.21 изображен один из возможных вариантов только что рассмотренной установки. При налаживании ее вы можете встретиться с рядом трудностей, главная из которых заключается в том, что мираж предмета лежит не в плоскости самого предмета. Поэтому для одновременного получения на экране резких изображений предмета и его миража нужно увеличить глубину резкости объектива. Это легко достигается диафрагмированием его (если вы используете объектив от школьного проекционного аппарата, как это показано на рис. 7.21, то достаточно снабдить

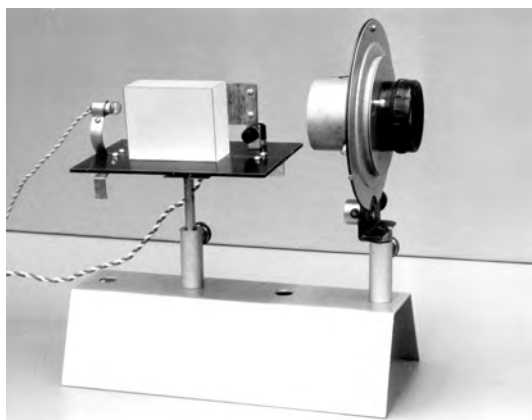


Рис. 7.21. Установка, собранная по схеме, представленной на рис. 7.20

его диафрагмой с отверстием диаметром около 10 мм). Кроме того, чтобы приблизить плоскость миража к плоскости предмета, в качестве слоисто-неоднородной среды нужно использовать возможно более короткий брусок из неравномерно нагретого оргстекла: длина его не должна превышать 50–80 мм. Вторая трудность заключается в выборе оптимальных положений предмета (лампочки) и объектива относительно бруска.

Для самостоятельной проработки

1. Видеоизображения миража. В настоящее время стала доступной достаточно качественная видеотехника. Используя цифровую видеокамеру, вы можете сделать видеофрагмент интересующего вас

физического явления или в реальном времени отобразить на экране телевизора в увеличенном виде происходящие явления. Самое главное, цифровая видеокамера позволяет записать изображение в компьютер и затем произвести требуемую его обработку. Попробуйте в изображенной на рис. 7.20 установке заменить объектив видеокамерой и на большом экране получить изображение миража в динамике. В этом случае лампочку придется питать пониженным напряжением или вообще заменить несамосветящимся предметом.

7.9. Мираж в воде

- Проведенные вами исследования показывают, что модель миража в воздухе должна иметь сравнительно большие размеры. Значительно более компактная модель миража в оргстекле требует немалого труда для ее создания: нужно раздобыть толстое оргстекло, из него выпилить (не допустив перегрева!) брусок в форме параллелепипеда, все грани его отшлифовать, а затем противоположные грани, через которые будут проводиться

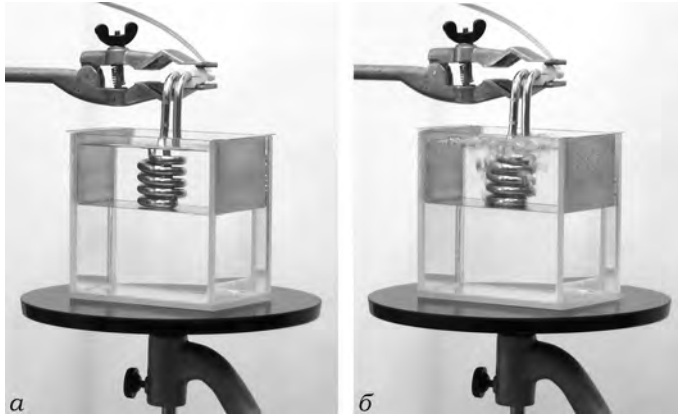


Рис. 7.22. Экспериментальная установка для наблюдения миража в неравномерно нагретой жидкости: *а* — кипятильник выключен, *б* — кипятильник включен, и вода над перегородкой кипит

наблюдения, отполировать. Попробуйте разработать более доступный способ получения оптически неоднородной среды для моделирования миража.

- Первое, что приходит в голову, это попытаться использовать неравномерно нагретую воду. Но если сосуд с водой поместить на нагреватель, то за счет конвекции вода быстро прогреется до одной и той же температуры. Можно, конечно, нагревать

вертикальную стенку, как это мы уже делали раньше (см. § 1.7, задание 2). Однако и в этом случае исключить конвекцию, а значит, и быстрое перемешивание горячей и холодной воды, не удастся. Остается одно: нагревать воду сверху. Проще всего (и безопаснее) использовать для этой цели бытовой кипятильник.

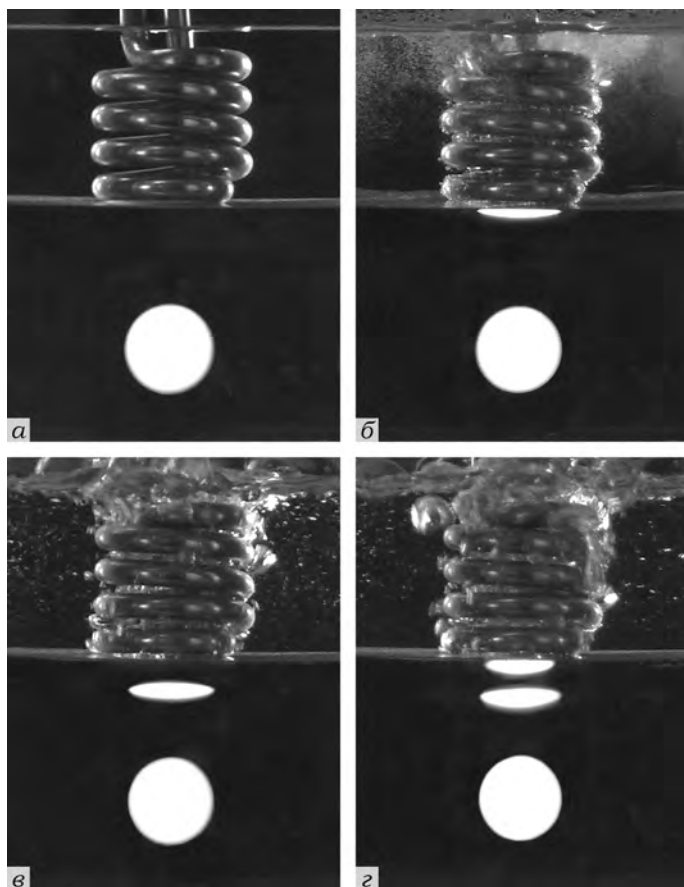


Рис. 7.23. Мираж в неравномерно нагретой жидкости: *а* — кипятильник выключен, *б, в, г* — кипятильник нагревается, и вода над перегородкой постепенно закипает

Для экспериментальной установки потребуется склеенная из стекла плоскопараллельная кювета размером примерно $50 \times 100 \times 100$ мм. Из дюрала или латуни толщиной около 0,5 мм вырежьте полоску шириной 49 мм и длиной 220 мм. Сделав поперечные надрезы, отогните края полоски шириной по 10 мм и загните

полоску так, чтобы она приняла П-образную форму. В кювету налейте отстоявшуюся или прокипяченную воду так, чтобы уровень ее оказался несколько выше середины. Аккуратно введите в кювету изогнутую полоску так, чтобы она повисла на отогнутых краях горизонтально и снизу ее не осталось воздушных пузырьков. Долейте воду в кювету и погрузите в нее кипятильник таким образом, чтобы он почти соприкоснулся с металлической полоской (рис. 7.22).

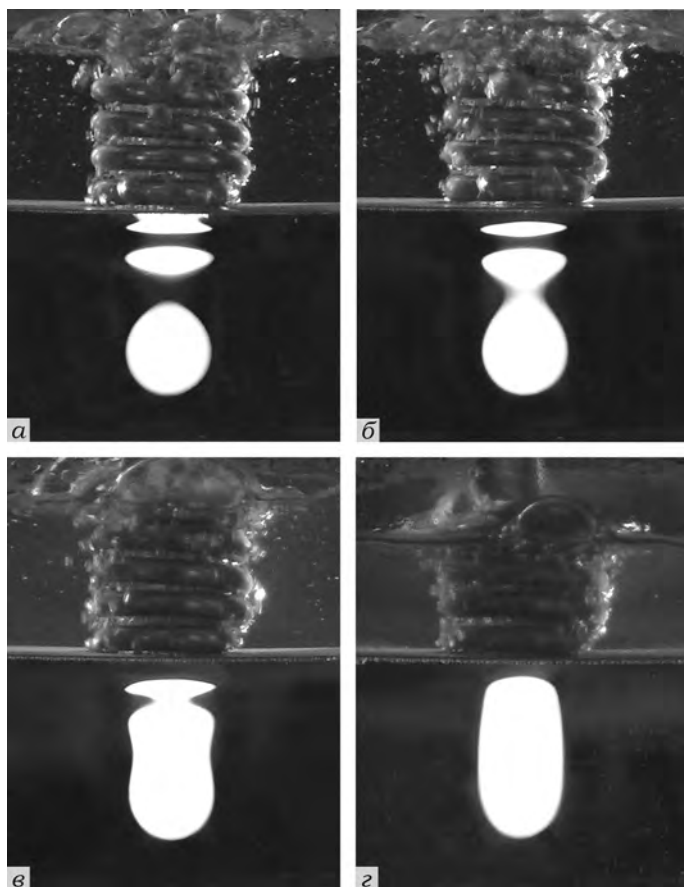


Рис. 7.24. Мираж в неравномерно нагретой жидкости: *а, б, в, г* — кипятильник включен, вода над перегородкой бурно кипит

На расстоянии около полуметра от кюветы с водой расположите какой-нибудь хорошо освещенный предмет. Можно использовать круглый источник света, который применялся для

моделирования миража в воздухе (§ 7.2). Глядя на этот предмет через кювету с водой, включите нагреватель. По мере нагревания воды в верхней части кюветы вы заметите появление миража возле горизонтальной перегородки. Постепенно вода закипает, этот мираж опускается вниз и отрывается от перегородки. Вслед за этим появляется второй мираж (рис. 7.23).

При дальнейшем кипении воды в верхней части кюветы можно наблюдать появление третьего миража. Далее он сливается со вторым, а первый мираж начинает сливаться с изображением предмета. По мере того, как вода прогревается в нижней части кюветы все более равномерно, наблюдается постепенное слияние всех миражей с изображением предмета (рис. 7.24). Это потрясающие по красоте оптические явления!

Для самостоятельной проработки

1. Мираж в цилиндрической кювете. Если вы не решились склеить плоскопараллельную кювету из стекла, то пронаблюдать описанные явления вы сможете, используя цилиндрический химический стакан. Подумайте, как сделать и закрепить на стакане металлическую перегородку, отделяющую кипящую воду от холодной. Разберитесь с тем, какие дополнительные искажения изображений дает вода, налитая в стакан. Проведите детальное исследование явления. Выясните, в чем преимущества цилиндрического стакана перед плоскопараллельной кюветой.

7.10. Зеленый луч

● Глядя на заходящее Солнце, когда оно уже почти полностью скроется за горизонтом так, что видимым останется лишь небольшой сегмент солнечного диска, в момент исчезновения этого сегмента при благоприятных условиях вы можете заметить так называемый «зеленый луч» — вспышку зеленого света, длящуюся обычно в течение нескольких секунд. Принято считать, что зеленый луч — чрезвычайно редкое явление атмосферной оптики, наблюдать которое удастся лишь немногим счастливым. М. Миннарт начинает рассказ о зеленом луче даже так: «По старинной шотландской легенде, всякий, кто хоть однажды видел зеленый луч, никогда не совершит ошибки в сердечных делах» [1]. Ниже описана установка, позволяющая наблюдать зеленый луч тогда, когда этого захочется. Очевидно, те из вас, кто соберет эту установку, в соответствии с легендой будут обладать определенными преимуществами перед остальными живущими. Если же говорить всерьез, то мне, например, довелось наблюдать настоящий зеленый луч уже после того, как я много

раз видел его в модельных опытах. Думаю, произошло это только благодаря тому, что я знал, что и как должен видеть. Поэтому можно надеяться, что модельные эксперименты и вам облегчат наблюдения взаправдашнего зеленого луча и, во всяком случае, вы не упустите благоприятной возможности увидеть зеленый луч в природе.

Зеленый луч, с которым связано немало легенд и мистических историй, имеет вполне прозаическое объяснение, которое можно дать даже в рамках элементарной физики. При закате Солнца свет распространяется через атмосферу вдоль земной поверхности. Плотность воздуха убывает с высотой, поэтому атмосфера представляет собой оптически неоднородную среду, в которой свет распространяется криволинейно. Многие наблюдатели отмечают, что для появления зеленого луча необходимо такое состояние атмосферы, при котором возможно возникновение верхнего миража, — это еще раз говорит о том, что существенным является прохождение света через оптически неоднородную среду.

От Солнца идет белый свет, состоящий, как мы знаем, из целого набора цветов (в наше время принято «разлагать» белый свет на семь цветов радуги: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый — перечисленные здесь в порядке убывания соответствующих им длин волн). От длины световой волны зависит показатель преломления вещества — это явление называется *дисперсией света*. При нормальной дисперсии с увеличением длины волны света показатель преломления уменьшается.

Мы имеем дело именно с нормальной дисперсией, поэтому можем заключить, что при распространении света через оптически неоднородную атмосферу сильнее всего отклоняются от своего первоначального направления коротковолновые компоненты белого света: фиолетовые, синие, голубые и зеленые лучи. Слабее отклоняются длинноволновые составляющие белого света: красные, оранжевые и желтые лучи.

Если бы свет шел от находящейся невысоко над горизонтом яркой светящейся точки, то наблюдая ее, вы обнаружили бы спектр. Но видимые размеры Солнца достаточно велики, а дисперсионные отклонения света различных длин волн малы, поэтому глядя на солнечный диск, мы в лучшем случае можем рассчитывать увидеть не спектр, а цветовую окраску краев этого диска: верхний край должен иметь фиолетовый оттенок, а нижний — красный. На самом деле мы не видим и этой окраски. Дело в том, что интенсивности указанных оттенков несравненно

меньше интенсивности белого света, испускаемого солнечным диском.

При закате Солнца, когда значительная часть диска скроется за горизонтом, видимым остается лишь небольшой верхний сегмент солнечного диска, окрашенный, как мы знаем, в коротковолновые составляющие белого света (рис. 7.25). Из этой коротковолновой части спектра наблюдается только зеленый свет потому, что свет меньших длин волн — голубой, синий и фиолетовый — сильно рассеивается атмосферой (напомним, что голубой цвет неба обусловлен именно этим рассеянием).

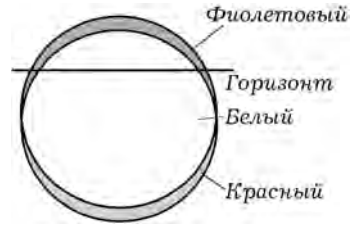


Рис. 7.25. Схематическое изображение заходящего Солнца

Попробуйте теперь перевести наши словесные рассуждения на язык простых формул.

• Пусть параллельный пучок белого света шириной d распространяется в оптически неоднородной среде так, как показано на рис. 7.26. Найдем зависимость угла отклонения φ этого пучка от длины световой волны. Будем считать, что в оптически

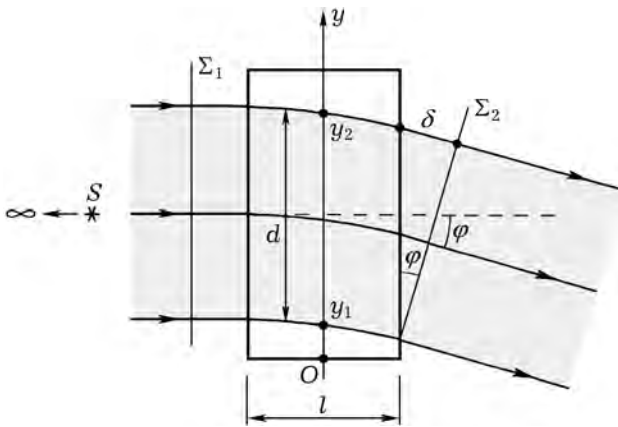


Рис. 7.26. К объяснению зеленого луча

неоднородной среде свет проходит путь длиной l , а показатель преломления среды n линейно зависит от координаты y :

$$n = n_0 - \frac{dn}{dy}y, \quad (7.4)$$

где n_0 — значение показателя преломления в точке с координатой $y = 0$, dn/dy — постоянный градиент показателя преломления. Обозначим через Σ_1 и Σ_2 положения фронта световой волны до вхождения в оптически неоднородную среду и после выхода из нее. Время распространения света от точек волновой поверхности Σ_1 до соответствующих точек волновой поверхности Σ_2

$$\tau = \frac{ln(y_1)}{c} = \frac{ln(y_2)}{c} + \frac{\delta}{c},$$

где $n(y_1)$ и $n(y_2)$ — значения показателей преломления соответственно в точках с координатами y_1 и y_2 , c — скорость света в вакууме. Из этого равенства выражаем величину δ :

$$\delta = l[n(y_1) - n(y_2)].$$

Подставляя в последнюю формулу значения $n(y_1)$ и $n(y_2)$, выраженные из формулы (7.4), получаем

$$\delta = l(y_2 - y_1) \frac{dn}{dy} = ld \frac{dn}{dy}.$$

Считая угол отклонения φ светового пучка малым, можем написать

$$\varphi = \frac{\delta}{d} = l \frac{dn}{dy}. \quad (7.5)$$

Таким образом, при отсутствии дисперсии (или для монохроматического света) угол отклонения светового пучка от первоначального направления при распространении его в оптически неоднородной среде пропорционален градиенту показателя преломления среды (см. § 2.7). Однако мы имеем дело с белым светом, и среда обладает дисперсией, которую необходимо учитывать.

Зависимость показателя преломления среды от длины световой волны λ во многих практически важных случаях можно определить по эмпирической формуле Коши

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2}, \quad (7.6)$$

где $a(y)$ и $b(y)$ — величины, которые для каждой среды нужно специально определять на опыте. Подставляя выражение (7.6) в формулу (7.5) и учитывая, что длина световой волны λ , падающего пучка не может зависеть от координаты y , получаем

$$\varphi = l \left(\frac{da}{dy} + \frac{1}{\lambda^2} \frac{db}{dy} \right). \quad (7.7)$$

Итак, мы приходим к выводу, что угол отклонения светового пучка зависит не только от градиента показателя преломления

среды, но и от длины световой волны: с увеличением длины волны угол отклонения уменьшается. Отсюда следует, что прохождение пучка белого света через оптически неоднородную среду приводит к разложению его в спектр. Этим и подтверждаются приведенные выше качественные рассуждения о механизме образования зеленого луча.

Для самостоятельной проработки

1. Миннарт М. Свет и цвет в природе. — М.: Наука, 1969. — 360 с. (С. 79–84).

Подробно рассмотрены явления зеленого и красного лучей. Сравните рис. 66 рекомендованной книги с пояснением к нему, имеющемуся в тексте на с. 81. Не находите ли вы противоречия?

2. Калитеевский Н. И. Волновая оптика. — М.: Высшая школа, 1978. — 384 с. (С. 110–122).

Изложены основные сведения о дисперсии света, дана классическая теория нормальной дисперсии.

7.11. Модель зеленого луча

● Создать нужный для моделирования зеленого луча градиент показателя преломления вы сможете неравномерным нагревом бруска оргстекла примерно так, как это делалось при моделировании миража (см. § 7.4). Лучше, однако, изготовить такой образец оргстекла, который навсегда сохранит необходимую в опытах оптическую неоднородность.

Выпилите брусок оргстекла размером $50 \times 60 \times 110$ мм. Все грани его, обработав шкуркой, сделайте матовыми. На электроплитку или перевернутый электроутюг поместите тонкую асбестовую прокладку, а на нее поставьте брусок оргстекла гранью, размер которой составляет 50×110 мм. Включите нагреватель и производите нагрев оргстекла до тех пор, пока оно не начнет размягчаться. Не увлекайтесь слишком сильно: плохо, если поверхность оргстекла, соприкасающаяся с нагревателем, будет пузыриться; нужно добиться лишь размягчения оргстекла, о чем вы можете судить по начинающейся деформации торцов бруска. После этого выключите нагреватель и оставьте брусок на нем до полного охлаждения (вы можете, разумеется, опробовать и другие способы термообработки, например, снять образец оргстекла с размягченным слоем с поверхности нагревателя и охладить его на воздухе при комнатной температуре или опустить размягченное оргстекло в холодную воду и т. п.).

От торцов прошедшего термообработку образца оргстекла ножовкой по металлу отпилите две пластинки толщиной по 5 мм (это необходимо сделать, чтобы исключить преломление света на деформированных в результате нагрева поверхностях торцов). Торцы получившегося бруска отшлифуйте и отполируйте так, чтобы они стали плоскими и совершенно прозрачными. В итоге вы получите брусок с «застывшей» в нем оптической неоднородностью. Интересно исследовать распределение показателя преломления в этой неоднородности (например, методом, изложенным в § 2.7). Обратив ваше внимание на возможность такого исследования, мы вернемся к той проблеме, которой непосредственно занимаемся.

Подберите пластмассовую или металлическую коробочку такой величины, чтобы в ней можно было закрепить лампочку карманного фонаря. В крышке коробочки сделайте круглое отверстие диаметром около 20 мм и перекройте его куском матового стекла или не слишком плотной белой бумаги. Собрав предлагаемый источник света, вы получите модель Солнца.

Теперь разработайте и выполните эксперимент по моделированию зеленого луча.

- Земную атмосферу будет моделировать приготовленный вами брусок оргстекла с оптической неоднородностью. Расположите его на небольшой подставочке (рис. 7.27), высоту которой можно регулировать. Источник света разместите на расстоянии около метра перед бруском, сами сядьте на расстоянии 0,5–1 м от бруска и смотрите сквозь него на источник. Не выпуская диск источника из поля зрения, наклоняйте голову, а при необходимости и перемещайте брусок в вертикальном направлении. Вы будете наблюдать неискаженное изображение «Солнца», когда свет проходит через оптически однородное оргстекло, и искажения «солнечного диска», если свет проходит через область оптической неоднородности. Сказанного вполне доста-

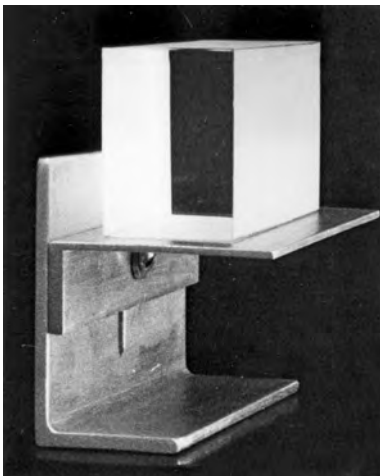


Рис. 7.27. Модель земной атмосферы из оргстекла

точно, чтобы при тщательном проведении наблюдений увидеть зеленый луч.

На рис.7.28 представлены последовательные фотографии «Солнца, опускающегося за горизонт», полученные в условиях описанного эксперимента (линия горизонта на фотографиях не

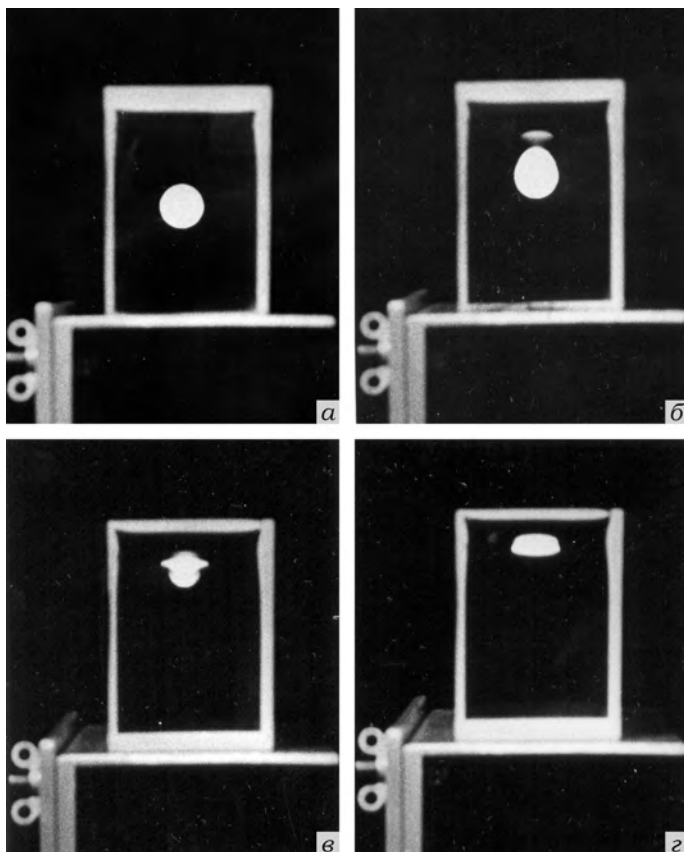


Рис. 7.28. Искажения диска при наблюдении его через оргстекло с «застывшей» оптической неоднородностью: если бы эти снимки были цветными, то на третьем из них вы увидели бы зеленый луч; наблюдения удобно проводить в той последовательности, в которой приведены фотографии; если по фотографиям вы хотите проследить за «заходящим Солнцем», то рассматривайте их в обратной последовательности

обозначена, поскольку вы самостоятельно сможете определить ее на опыте). Зеленый луч виден, когда изображение модели Солнца имеет вид, показанный на рис. 7.28 в.

В модельных экспериментах наблюдается не столько зеленый, сколько фиолетово-синий луч, и это вполне объяснимо: фиолетовый свет в условиях модели не рассеивается, а попадает в глаз. Впрочем, окраска «зеленого луча» сильно зависит от конкретных условий наблюдения, и изменяя их, вы можете увидеть «зеленый луч» действительно зеленоватого цвета. Заметим также, что наряду с зеленым лучом в модельных опытах вы столь же успешно сможете наблюдать и красный луч, который в природных условиях встречается крайне редко: нужно, чтобы возле горизонта оказалось облако с резкой нижней границей, и из-под него выглянул нижний сегмент заходящего Солнца. В описанной модели ничто не мешает последовательно увидеть зеленый и красный лучи.

Возможно, некоторым из вас будет трудно сразу обнаружить то, что нужно. Несравненно более значительные трудности испытывают ваши товарищи, которым вы захотите показать явление. К примеру, я нередко бывал обескуражен тем, что хотя сам видел зеленый луч, другие, проводя наблюдения в тех же условиях непосредственно за мной, либо упорно не замечали его, либо таким тоном объявляли об увиденном зеленом луче, что сразу становилось очевидным их желание поскорее отойти от установки. Поэтому пришлось пойти на хитрость, которую советую взять на вооружение и вам.

Как это ни странно, но далеко не все умеют управлять собственным глазом или даже просто отдавать себе отчет в том, что наблюдают. Значит, надо заменить индивидуальный глаз каждого единой для всех моделью глаза. А такую модель легко сделать из непрозрачной коробки, в отверстии одной из стенок которой в качестве зрачка укреплена собирающая линза с фокусным расстоянием 5–10 см, а отверстие противоположной стенки затянуто папиросной бумагой или перекрыто матовым стеклом, выполняющим роль сетчатки глаза. Нужно предусмотреть возможность перемещения линзы относительно матового стекла — это позволит настраивать на резкость («аккомодировать») модель глаза.

На рис. 7.29 приведена фотография простейшей модели глаза, изготовленной из пластмассовой коробки размером $80 \times 90 \times 110$ мм; в качестве линзы в модели применен объектив старого фильмоскопа; на фотографии вы видите изображение лампы, которое объектив дает на «сетчатке глаза».

Расположив должным образом модель глаза относительно моделей Солнца и земной атмосферы, вы получите на «сетчатке глаза» изображение «Солнца». Опуская или поднимая модель

Солнца, вы сможете показать своим товарищам характерные искажения изображения, зеленый и красный лучи. После этого можно провести наблюдения непосредственно глазом — явления, которые при этом можно заметить, гораздо богаче тех, которые обнаруживаются при работе с моделью глаза.

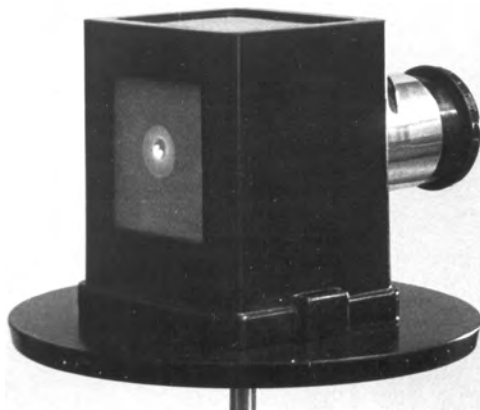


Рис. 7.29. Простейшая модель глаза для опытов по наблюдению зеленого луча

Для самостоятельной проработки

1. Тарасов Л. В. Физика в природе. — М.: Просвещение, 1988. — 351 с. (С. 18–32).

Рассмотрены удивительные явления, происходящие при закатах Солнца: красный цвет Солнца и голубой цвет неба, рефракция света в атмосфере, сплюснутость солнечного диска, зеленый луч, слепая полоса, кажущееся увеличение размеров Солнца.

2. Тарасов Л. В. Зеленый луч // Квант. — 1986. — № 6. — С. 16–17.

Описаны условия наблюдения зеленого луча при заходе Солнца. Приведен качественный анализ явления.

3. Броунов П. И. Атмосферная оптика. — М.: Гостехиздат, 1924. — С. 207–212.

Описаны очень интересные наблюдения зеленого луча в природе. Язык автора точен и поэтичен. «В тот момент, когда от Солнца, опустившегося при его закате под горизонт, над последним остается лишь небольшой сегмент солнечного диска, этот сегмент иногда вспыхивает на самое короткое время зелено-смарагдовым светом. То же самое происходит и при восходе Солнца, когда над горизонтом показывается узенький сегмент диска. Явление это реже наблюдается в наших широтах и чаще в более южных, чаще на море, чем на суше.»

7.12. Зеленый луч из кюветы с жидкостью

● Далеко не все из вас решатся для моделирования зеленого луча «заморозить» в оргстекле оптическую неоднородность. Но среду с градиентом показателя преломления можно получить и иным способом, например, диффузией одной жидкости в другую, неравномерным нагревом жидкости или твердого тела... Переберите все доступные для эксперимента вещества (а к ним относятся в первую очередь те, которые без проблем можно приобрести в продовольственных и хозяйственных магазинах). Посмотрите вокруг себя на прозрачные предметы. Напрягитесь и попробуйте разработать такой способ получения оптически неоднородной среды, который за несколько минут позволит создать условия для моделирования явлений миража и зеленого луча.

● Самый простой способ получения оптически неоднородной среды — это взаимная диффузия двух смешивающихся жидкостей с разными оптическими плотностями. Жидкости должны быть залиты в прозрачный сосуд, в качестве которого лучше всего использовать плоскопараллельную стеклянную кювету. Это вполне понятно: мы стремимся исследовать явления, происходящие в переходном слое между двумя жидкостями, и хотим, чтобы вне этого слоя искажения оптических изображений были незаметны.

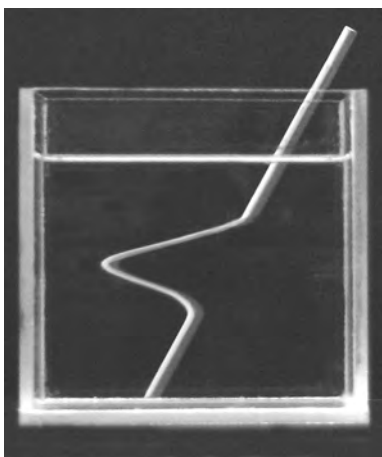


Рис. 7.30. Градиент показателя преломления в переходном слое между керосином и бензином

Теперь нужно подобрать подходящие для создания оптически неоднородной среды жидкости. Помните, мы экспериментировали с раствором поваренной соли (§ 1.3), обсуждали возможность применения водного раствора квасцов, спирта, глицерина (§ 1.5), применяли желатин (§ 3.4)? Но помимо этих жидкостей в быту широко используются и другие: ацетон, керосин, бензин. Правда, эти жидкости весьма горючи и в этом смысле опасны. Но если соблюдать элементарные меры предосторожности, оставаясь предельно собранными и аккуратными, то с ними вполне можно работать.

Итак, в плоскопараллельную стеклянную кювету размером примерно $50 \times 100 \times 100$ мм аккуратно до ее половины налейте чистый керосин и поверх него — бензин. Закройте кювету крышкой, чтобы жидкости не слишком испарялись, и поставьте ее на подъемный столик. За кюветой расположите прямую палочку под углом к границе раздела жидкостей и посмотрите, сколь велик градиент показателя преломления в переходном слое. Используя этот прием, проследите за процессом взаимной диффузии керосина и бензина. Примерно через час вы увидите картину, подобную изображенной на рис. 7.30.

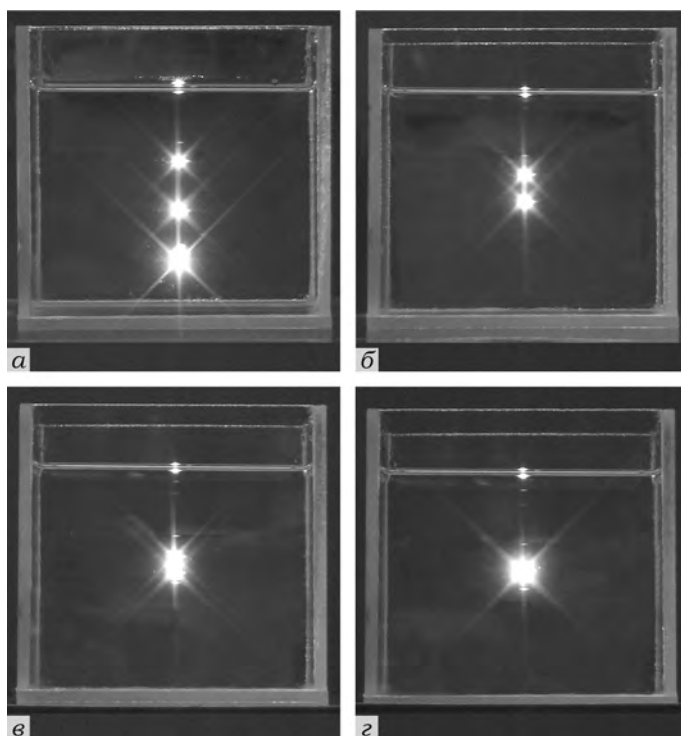


Рис. 7.31. Наблюдение зеленого луча при прохождении света через слой оптически неоднородной жидкости: *а* — снизу виден источник света, сверху — два миража, прямой и перевернутый; *б* — глаз наблюдателя (фотоаппарат) опускается, при этом источник света исчезает из поля зрения и миражи сближаются; *в* — миражи практически сливаются; *г* — виден яркий зеленый луч, а при дальнейшем опускании глаза — синий и фиолетовый

На расстоянии около метра от кюветы с оптически неоднородной жидкостью разместите лампочку карманного фонаря и

подключите ее к батарейке. Смотрите на этот источник сквозь кювету с расстояния 30–50 см от нее, поднимая и опуская голову. Вы заметите, что когда световой пучок от источника проходит через верхнюю или нижнюю половины кюветы видны неискаженные изображения лампочки. Объясняется это, конечно, тем, что свет от лампочки, попадая в глаз, проходит через оптически однородные среды. Но когда глаз расположен так, что свет попадает в его зрачок, пройдя сквозь переходный слой между двумя жидкостями, изображение лампочки получается сильно искаженным.

Продолжайте наблюдения в течение примерно часа. За этот срок жидкости заметно диффундируют друг в друга, и вы увидите прекрасный мираж, сначала одинарный, а затем и двойной! Перемещая голову вверх и вниз, в определенном положении вы обнаружите «зеленый луч», яркий насыщенный цвет которого, меняющийся от зеленого до фиолетового, бесспорно, произведет на вас сильное впечатление!

На рис. 7.31 приведены фотографии последовательных стадий только что описанного явления (фотоаппарат опускался сверху вниз); зеленый луч виден в позиции, показанной на рис. 2.

Для самостоятельной проработки

1. Протяженный источник света. Вместо лампочки карманного фонаря используйте настольную лампу, освещенный диск, подходящий предмет небольших размеров. Исследуйте условия, при которых наблюдаются двойной и тройной миражи.

2. Цилиндрическая кювета. Если ставится задача создания простейших условий для моделирования миража, то надо вспомнить, что мираж — это всегда более или менее искаженные изображения предметов. Поэтому вместо плоскопараллельной кюветы допустимо использование цилиндрической, которая при заполнении жидкостью будет давать сжатые в направлении, перпендикулярном ее оси, изображения. Функцию такой кюветы может выполнять тонкостенный химический стакан емкостью 100–250 мл. Преимущество стакана еще и в том, что для опыта потребуется совсем небольшое количество жидкостей. Итак, в химический стакан, стеклянная стенка которого не дает заметных искажений, аккуратно до его половины налейте чистый керосин и поверх него — бензин. Закройте стакан крышкой, чтобы жидкости не испарялись, и проведите наблюдения в последовательности, описанной выше. Вы заметите все те прекрасные явления, которые вам уже знакомы. Однако теперь сами миражи будут представлять собой значительно менее искаженные изображения предметов. Это объясняется, конечно, тем, что оптически неоднородная среда сжимает изображения по вертикали, а стакан с жидкостью, действуя как цилиндрическая линза, сжимает изображения по горизонтали.

Глава 8

ОПТИЧЕСКИЕ ГРАДИЕНТНЫЕ МОДЕЛИ

В этой главе рассмотрены возможности градиентной оптики для моделирования различных физических явлений. Мы начнем с задачи о движении массивного тела в поле тяжести и познакомимся с интересными физическими свойствами циклоиды. Затем смоделируем прохождение Венеры по солнечному диску. Специальное исследование будет посвящено моделированию грандиозного космического явления — гравитационной линзы. Далее мы построим оптические градиентные модели электронно-оптических систем. Наконец, в заключение исследуем возможности градиентной оптики для моделирования распространения упругих волн в атмосфере и океане.

8.1. Задача о брахистохроне

● *Брахистохрона* — кривая наибыстрейшего спуска: *brachistos* — кратчайший + *chronos* — время. В 1696 году И. Бернулли поставил задачу о брахистохроне: найти такую траекторию, двигаясь по которой из верхней точки в нижнюю в поле тяжести, тело затратит наименьшее время.

Решение этой задачи, данное Я. Бернулли, положило начало *вариационному исчислению*. Сам автор задачи решил ее оригинальным способом, непосредственно связанным с градиентной оптикой, который мы здесь и воспроизводим.

Согласно принципу Ферма свет распространяется по такому пути, для прохождения которого ему требуется минимальное время. Следовательно, если подобрать оптически неоднородную среду, в которой свет ведет себя подобно материальной точке, двигающейся в поле тяжести, то траектория распространения света и окажется кривой наискорейшего спуска, то есть брахистохроной.

Рассмотрим прозрачную среду, состоящую из плоскопараллельных слоев одинаковой толщины d с показателями преломления $n' > n'' > n''' > \dots$ (рис. 8.1). Согласно закону преломления

$$\frac{\sin \varphi'}{\sin \varphi''} = \frac{n''}{n'}, \quad \frac{\sin \varphi''}{\sin \varphi'''} = \frac{n'''}{n''}, \dots$$

Отсюда следует, что

$$n' \sin \varphi' = n'' \sin \varphi'' = n''' \sin \varphi''' = \dots$$

Устремив толщины слоев к нулю $d \rightarrow 0$, получим оптически неоднородную среду с плавным изменением показателя преломления

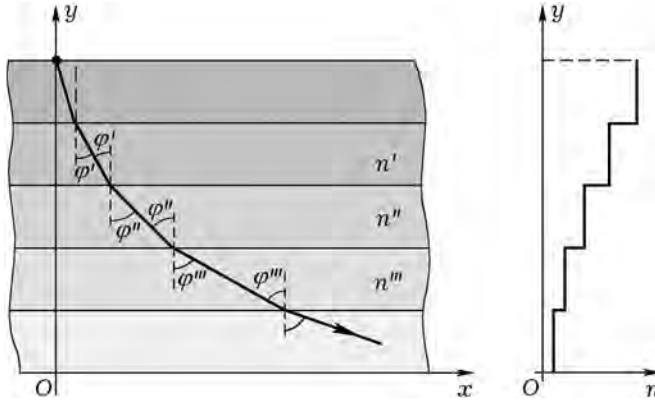


Рис. 8.1. Распространение света в среде, состоящей из плоскопараллельных слоев одинаковой толщины с постепенно уменьшающимся показателем преломления

ления (рис. 8.2), в которой свет распространяется не по ломаной линии, а по кривой. Поскольку в точках с одинаковыми значениями координаты y показатели преломления одинаковы, такая оптически неоднородная среда, как вы знаете, получила название плоскослоистой (см. с. 94).

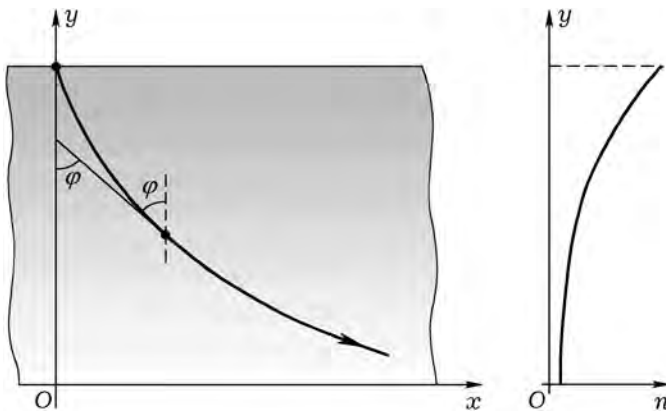


Рис. 8.2. Распространение света в среде, показатель преломления которой непрерывно уменьшается

Очевидно, если $n(y)$ — показатель преломления среды в точках с координатами y , а φ — угол между касательной к лучу в некоторой точке и осью Oy , то

$$n(y) \sin \varphi = k' = \text{const.} \quad (8.1)$$

Вернемся теперь к механике. Пусть тело массы m движется по лучу из точки $S(0, y_1)$ в точку B (рис. 8.3). Начальная

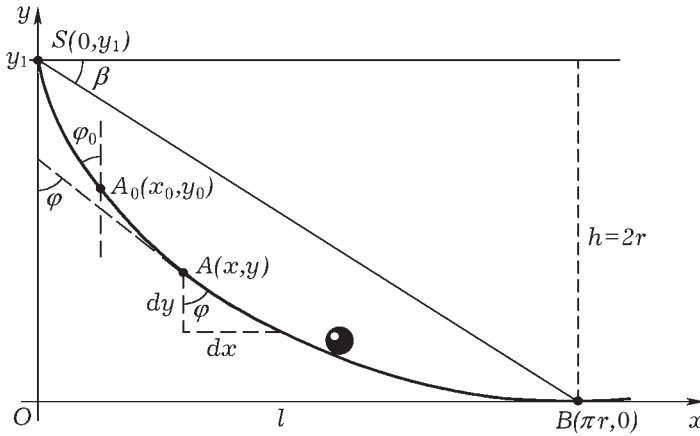


Рис. 8.3. К решению задачи о брахистохроне

скорость тела равна нулю, поэтому его кинетическая энергия в произвольной точке A с ординатой y составляет

$$\frac{mv^2}{2} = mg(y_1 - y),$$

где g — ускорение свободного падения. Отсюда скорость тела как функция координаты

$$v(y) = \sqrt{2g(y_1 - y)}. \quad (8.2)$$

Так как абсолютный показатель преломления среды n равен отношению скорости света в вакууме c к скорости света в среде v , то в искомой слоисто-неоднородной среде показатель преломления должен быть обратно пропорционален корню квадратному из координаты

$$n(y) = \frac{c}{v(y)} = \frac{c}{\sqrt{2g}} \frac{1}{\sqrt{y_1 - y}} = \frac{k''}{\sqrt{y_1 - y}}, \quad (8.3)$$

где $k'' = c/\sqrt{2g}$ — коэффициент пропорциональности. С учетом (8.1) имеем

$$\sin \varphi = \frac{k'}{n(y)} = \frac{k'}{k''} \sqrt{y_1 - y} = k\sqrt{y_1 - y},$$

где коэффициент пропорциональности $k = k'/k''$. Выражая отсюда координату y , получаем

$$y = y_1 - \frac{1}{k^2} \sin^2 \varphi. \quad (8.4)$$

Докажите, что уравнение (8.4) описывает циклоидальную кривую.

• *Циклоида* — кривая, описываемая точкой окружности, без проскальзывания катящейся по прямой.

Рассмотрим окружность радиуса r с центром в точке C , равномерно катящуюся со скоростью \mathbf{u} по прямой SD в положительном направлении оси Ox декартовой системы координат (см. рис. 8.4). Получим уравнения кривой, описываемой некоторой точкой A этой окружности.

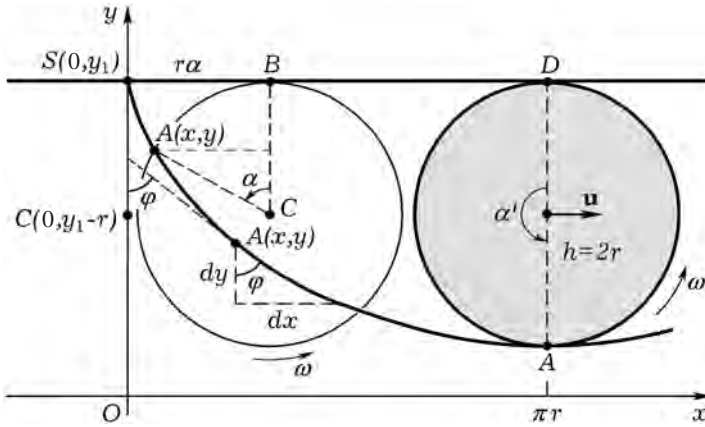


Рис. 8.4. К выводу уравнения циклоиды

Пусть в начальный момент времени точка A совпадает с точкой $S(0, y_1)$, то есть центр окружности находится в точке $C(0, y_1 - r)$. При качении за некоторое время радиус круга повернется на угол α , круг по горизонтали пройдет путь $r\alpha$, и точка $A(0, y_1)$ займет положение $A(x, y)$. Из геометрических соображений координаты этой точки

$$x = r(\alpha - \sin \alpha), \quad y = y_1 - r(1 - \cos \alpha), \quad (8.5)$$

где $r = h/2$ — радиус образующей окружности или половина высоты h арки циклоиды (рис. 8.4).

Так как точка $A(x, y)$ на циклоидальной кривой выбрана произвольно, то полученные выражения есть уравнения циклоиды в параметрической форме.

Выясним физический смысл параметра α в понятиях, независимых от данного выше кинематического определения циклоиды. На рис. 8.3 изображена циклоида в декартовой системе координат. Обозначим через φ угол между касательной к циклоиде и осью Oy . Очевидно, $\operatorname{tg} \varphi = -dx/dy$.

Дифференцируя выражения (8.5) и подставляя результаты в предыдущую формулу, получаем

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{dx}{dy} = \frac{r(1 - \cos \alpha)}{r \sin \alpha} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (8.6)$$

Следовательно, параметр α — это удвоенный угол φ между касательной к циклоиде и осью Oy . Поэтому вместо общепринятой записи циклоиды в виде системы двух параметрических уравнений (8.5) достаточно использовать какое-то одно уравнение

$$x = r(2\varphi - \sin 2\varphi) \quad (8.7)$$

или

$$y = y_1 - r(1 - \cos 2\varphi), \quad (8.8)$$

если в параметр φ вкладывается указанный выше смысл угла между касательной в точке кривой и осью ординат. Последнее уравнение можно переписать в виде

$$y = y_1 - 2r \sin^2 \varphi, \quad (8.9)$$

а это и подтверждает, что выражение (8.4) есть уравнение циклоиды.

Для самостоятельной проработки

1. Гиндикин С. Г. Звездный век циклоиды // Квант. — 1985. — № 6. — С. 8–15.

Рассмотрена история изучения циклоиды, открытия ее интересных свойств.

2. Бельский И. М. Введение в аналитическую механику. — М.: Высшая школа, 1964. — 324 с. (С. 88–91).

Сформулирована и решена задача о брахистохроне.

3. Берман Г. Н. Циклоида. — М.: Наука, 1980. — 112 с. (С. 97–111).

Здесь популярно изложено решение задачи о брахистохроне, как кривой, время спуска тела по которой минимально; связь этой задачи с принципом Ферма для света; решение задачи о брахистохроне, предложенное Бернулли на основе вариационного исчисления.

4. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. — М.: Наука, 1986. — 544 с. (С. 125–128).

Рассмотрены уравнения циклоидальных кривых.

5. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. — М.: Наука, 1965. — 616 с. (С. 468–470).

Рассмотрена задача о нахождении линии наибыстрейшего спуска, при решении которой получается уравнение циклоиды в параметрической форме.

8.2. Движение по брахистохроне

● В предыдущем параграфе теоретически исследовано движение тел в поле тяжести и показано, что кривой наибыстрейшего спуска является циклоида. Разработайте и поставьте простые опыты, подтверждающие это заключение. Для этого, очевидно, нужно из одной точки в другую одновременно пускать одинаковые тела так, чтобы они двигались в поле тяжести по разным траекториям. То тело, которое движется по циклоидальной горке, должно оказаться в нижней точке раньше другого тела, по какой бы траектории оно не двигалось. В качестве тел проще всего использовать одинаковые шарики, пренебрегая их вращением при движении по горкам.

● Основная сложность непосредственного наблюдения брахистохронных свойств циклоиды состоит в том, что время движения по циклоидальной горке разумных размеров слишком мало. Увеличить время движения шариков, не увеличивая размеров траектории, можно, «уменьшив ускорение свободного падения». Для этого достаточно повернуть плоскость циклоиды вокруг горизонтальной оси так, чтобы она составила небольшой угол с горизонталью. В этом случае сущность явления не изменится, однако роль ускорения свободного падения будет играть его проекция на плоскость циклоиды.

Самый простой способ построения циклоиды заключается в непосредственном использовании определения этой кривой. Из картона или иного материала вырезают круг, диаметр которого равен высоте арки будущей циклоиды, и на краю его ставят метку. На лист бумаги кладут линейку и придвигают к ней круг так, чтобы метка касалась линейки. Карандашом на бумаге ставят точку рядом с меткой, затем без проскальзывания катят круг по линейке и примерно через равные расстояния отмечают на листе последовательные положения метки. Если построенные таким образом точки соединить плавной кривой, то получится циклоида.

На рис. 8.5 изображен эскиз прибора, позволяющего убедиться в брахистохронности циклоиды. На поверхности стола с помощью подставки *б* под углом $5 - 15^\circ$ установлена прямоугольная пластина *1* размером $2 \times 200 \times 280$ мм, вырезанная из пластика или дюралья. На ней через прокладки *5* посредством винтов *4* закреплена пластина *2*, верхняя кромка которой представляет собой арку циклоиды, вырезанную лобзиком по изготовленному,

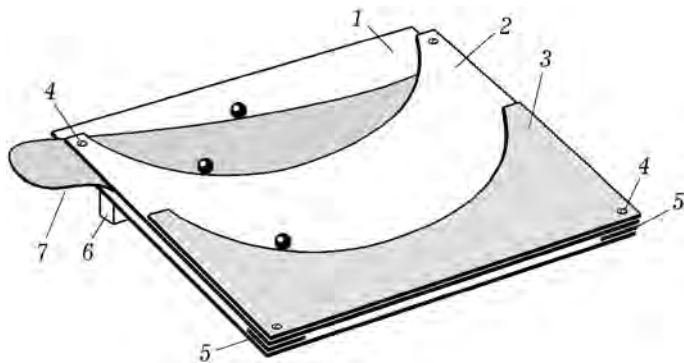


Рис. 8.5. Эскиз прибора для доказательства брахистохронности циклоиды

как описано выше, шаблону. К пластине *2* прикреплена циклоидальная пластина *3*, верхняя кромка которой идентична верхней кромке пластины *2*, то есть имеет форму арки циклоиды тех же размеров. Верхние кромки пластин *2* и *3* расположены точно друг под другом. В зазоре между пластинами *1* и *2*, с возможностью поворота вокруг винта *4* в левом верхнем углу прибора, установлена пластина *7*, верхняя кромка которой имеет вид произвольной кривой или просто прямолинейна. Выступающая за габариты прибора часть направляющей пластины *7* играет роль рукоятки для установки этой пластины в требуемое положение.

Для проведения опытов подберите два одинаковых стальных шарика диаметром $7-9$ мм. Первый шарик установите на нециклоидальную, а второй — на циклоидальную направляющие (верхние кромки пластин *7* и *2*) в левом верхнем углу прибора и одновременно отпустите. Скатываясь, второй шарик опережает первый и раньше достигает нижней точки пересечения двух направляющих, где и проваливается на пластину *1*. После остановки шариков видна последовательность их расположения на правой по рисунку части нециклоидальной траектории, совпадающая с последовательностью их прихода в указанное место. Если повернуть нециклоидальную направляющую или заменить ее на другую, то результат опыта не изменится.

Для самостоятельной проработки

1. Таутохронность циклоиды. Циклоидальная кривая помимо брахистохронности обладает еще одним замечательным свойством. Если два одинаковых тела одновременно отпустить без начальной скорости из разных точек циклоидальной горки, то они достигнут ее нижней точки также одновременно. Это дает основание называть циклоиду *таутохроной*: *tauto* — тот же самый + *chronos* — время, то есть равновременной кривой, время движения по которой не зависит от точки запуска.

Чтобы убедиться в таутохронности циклоиды, установите шарики в произвольных точках верхних кромок циклоидальных направляющих прибора (рис. 8.5) и одновременно отпустите. Вы увидите, что скатываясь по направляющим, шарики независимо от точек запуска достигают нижних точек циклоидальных траекторий одновременно, затем, проскочив их по инерции, одновременно останавливаются в верхних точках своих траекторий, возвращаются назад и т. д. Иными словами, шарики совершают синфазные колебания с разными амплитудами, но равными периодами, что и доказывает таутохронность циклоиды.

2. Простейший вариант прибора. Прибор, схематически изображенный на рис. 8.5, можно значительно упростить, удалив вторую циклоидальную направляющую. В этом случае прибор можно быстро собрать из трех листов картона. Такой упрощенный вариант прибора позволяет убедиться не только в брахистохронности, но и в таутохронности циклоиды (как именно?).

3. Демонстрационный вариант прибора. Для демонстрационных опытов прибор можно увеличить до размеров порядка метра, изготовив его из пластика толщиной 4–5 мм. Наконец, однажды мы сделали из картона циклоидальную траекторию длиной около 2 м. Опыты с этим прибором весьма эффектно и убедительно.

8.3. Модель явления Ломоносова

● М. В. Ломоносов, наблюдая 6 июня 1761 года редчайшее астрономическое явление — прохождение Венеры по солнечному диску — заметил, что при частичном вступлении Венеры на диск Солнца вокруг выступающей за диск части планеты на мгновение появился яркий светлый ободок. Когда Венера подошла к противоположному краю солнечного диска на расстояние около $1/10$ видимого диаметра планеты, на этом крае образовался светлый выступ, который затем превратился в ободок и при дальнейшем движении Венеры исчез. М. В. Ломоносов первым правильно объяснил обнаруженные эффекты наличием атмосферы у Венеры и преломлением солнечных лучей в ее атмосфере, поэтому они справедливо названы *явлением Ломоносова*.

После М. В. Ломоносова прохождение Венеры по диску Солнца наблюдалось в 1769, 1874, 1882 годах, и вы имели возможность увидеть его 8 июня 2004 года. Те, кому не удалось это сделать, могут выполнить модельный эксперимент и пронаблюдать дома или в школьной лаборатории явление, аналогичное явлению Ломоносова.

Для этого нужно сделать физические модели Солнца и Венеры с ее атмосферой, собрать соответствующую экспериментальную установку и провести сами наблюдения. Подскажем, что основной деталью установки может служить кусок оргстекла. А теперь, прежде чем читать дальше, попытайтесь самостоятельно придумать и поставить опыт.

- Модель солнечного диска может представлять собой освещенный круг из белой бумаги, наклеенный на черную бумагу. Лучше, однако, в покрашенном в черный цвет листе картона вырезать круглое отверстие, заклеить его матовой калькой и осветить сзади лампой или школьным осветителем для теневых проекций. Диаметр модели Солнца может быть произвольным; для фотографирования мы использовали модель диаметром 100 мм, а для наблюдений этот диаметр имеет смысл увеличить в 1,5–2 раза.

Венера движется в вакууме, который является оптически однородной средой. С точки зрения земного наблюдателя атмосфера Венеры — это оптическая неоднородность вокруг планеты. В качестве модели вакуума можно использовать плоскопараллельный лист оргстекла толщиной 3–5 мм. Оптическую неоднородность требуемой формы получить в этом листе очень просто: просверлите в нем отверстие тупым сверлом — тогда в результате разогрева и деформации оргстекло вблизи отверстия несколько вспучится. Понятно, что сверлить нужно достаточно аккуратно, чтобы на оргстекле не образовались сколы. Резиновая пробка, вставленная в отверстие, будет моделировать Венеру, а вспученность оргстекла вокруг пробки — атмосферу Венеры. Диаметр отверстия может быть любым, но лучше, если он составляет 8–10 мм. Портить сверлением большой лист оргстекла вовсе не обязательно: можно использовать кусок размером примерно 50 × 80 мм, но в этом случае, разумеется, на фоне модели Солнца будут видны края этого куска.

Оптическая схема установки изображена на рис. 8.6: 1 — источник света, 2 — черный экран с круглым отверстием, 3 — матовая калька, перекрывающая отверстие, 4 — лист оргстекла с оптической неоднородностью круглой формы (на рисунке

ее размеры значительно преувеличены), 5 — резиновая пробка, 6 — глаз наблюдателя. Расположите модель Венеры на расстоянии 10–30 см от модели Солнца и смотрите на нее с расстояния 1–2 м. Перемещаясь в направлении, перпендикулярном

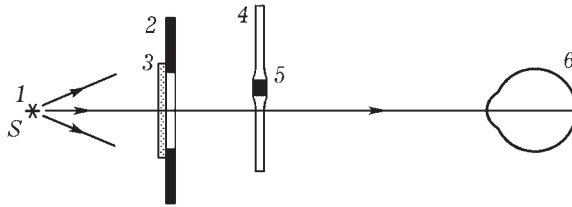


Рис. 8.6. Оптическая схема установки для моделирования прохождения Венеры по диску Солнца

лучу зрения, вы сможете наблюдать появление светлого ободка вокруг модели Венеры, когда она частично вступает на освещенный диск (рис. 8.7 а), исчезновение ободка, когда модель Венеры полностью оказывается на фоне модели Солнца (рис. 8.7 б), образование выпуклости на краю модели солнечного диска при приближении модели Венеры к этому краю (рис. 8.7 в) и т. д. — одним словом, те же самые оптические явления, которые М. В. Ломоносов обнаружил в реальных условиях.

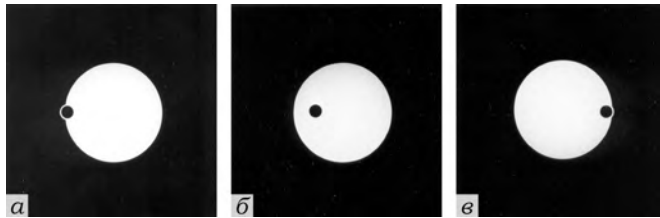


Рис. 8.7. К наблюдению прохождения Венеры по диску Солнца

Чтобы прочувствовать наблюдательность М. В. Ломоносова, можно провести такой эксперимент над своими товарищами. Разместите их перед установкой и попросите смотреть на модель Солнца. Затем равномерно передвигайте перед нею модель Венеры с таким расчетом, чтобы светлый ободок появлялся примерно на 1 с, то есть на то время, в течение которого М. В. Ломоносов в действительности его видел. Выясните, смогли ли они заметить в опыте что-либо достойное внимания. Если кто-нибудь из ваших товарищей увидит ободок, да еще сумеет правильно объяснить его появление — значит вам очень повезло, так как рядом с вами живет и учится потенциальный исследователь.

Для самостоятельном проработки

1. Распространение света через атмосферу Венеры. Начертите ход световых лучей, при котором вокруг части диска Венеры появляется светлый ободок. Объясните, почему ободок не наблюдается, когда Венера полностью заходит на солнечный диск.

2. Условия наблюдения в модельном эксперименте. Расстояния между моделями Солнца, Венеры и глазом наблюдателя будут оптимальными, если ободок появляется при частичном вступлении модели планеты на освещенный диск и совершенно не заметен, когда эта модель не касается диска. Экспериментально подберите указанные расстояния так, чтобы условия наблюдения явления действительно стали наилучшими.

3. Контрольный эксперимент. Для повышения убедительности модельного эксперимента следует повторить опыт с пластинкой оптически однородного оргстекла, на которую наклеен черный кружок, то есть с моделью планеты без атмосферы. В этом случае описанные выше эффекты не наблюдаются.

4. Ломоносов М. В. Полное собрание сочинений. Т.4. — М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1955. — С. 353–370.

Бронштэн В. А. Планеты и их наблюдение. — М.: Наука, 1979. — С. 18–20.

Куликовский П. Г. М. В. Ломоносов — астроном и астрофизик. — М.: Наука, 1986. — С. 42–49.

Мельников О. А. Астрофизические исследования М. В. Ломоносова / Ломоносов: Сборник статей и материалов. Т.VII.— Л.: Наука, 1977.— 204 с. (С. 63–102).

Пользуясь перечисленными книгами, вы сможете более подробно познакомиться с явлением Ломоносова.

8.4. Модель гравитационной линзы

● В 1979 году научный мир был взбудоражен сообщением о наблюдении астрономического объекта, состоящего из двух одинаковых квазаров. Необычный объект получил наименование *QSO 0957 + 561 A, B*, а астрофизики — новую загадку, которую до конца еще предстоит разгадать [1]. Удивительность этого открытия станет совершенно очевидной, если мы вспомним, что на каждом объекте природы лежит печать индивидуальности: нет вокруг нас двух совершенно одинаковых вещей, нет и во Вселенной одинаковых планет, звезд или квазаров. О космических объектах судят в первую очередь по спектрам испускаемого ими излучения, поэтому слово «одинаковость» двух разных объектов означает лишь идентичность спектров этих объектов. Кроме того, «одинаковость» всегда относительна и об одинаковости обна-

руженных в 1979 году квазаров можно говорить лишь с известной степенью точности. Тем не менее одинаковость компонент A и B квазара $QSO\ 0957 + 561$ настолько поразительна, что сразу возникло предположение о том, что на самом деле объекты A и B являются изображениями S' и S'' одного и того же квазара S (рис. 8.8), созданными *гравитационной линзой* — гравитационным полем галактики, находящейся между квазаром и земным наблюдателем!

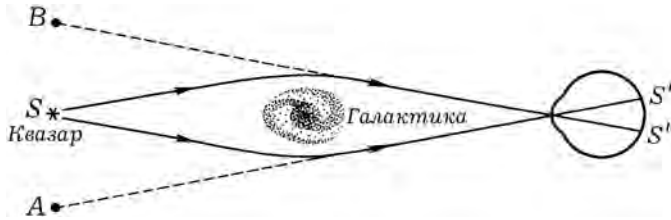


Рис. 8.8. Гравитационное поле галактики может искривлять световые лучи

Эффект искривления световых лучей в гравитационном поле является следствием общей теории относительности. Возможность существования гравитационных линз показал основоположник этой теории А. Эйнштейн в работе «Линзоподобное действие звезды при отклонении света в гравитационном поле» [2], опубликованной еще в 1936 году. Вряд ли мы с вами сможем сейчас разобраться в теории Эйнштейна, но на интуитивном уровне, наверное, в состоянии представить себе, что может происходить со светом, идущим мимо галактики или иного объекта, создающего мощное гравитационное поле. Свет обладает двойственной корпускулярно-волновой природой. В рамках фотонных представлений о природе света упрощенно можно рассуждать так: если испущенные квазаром фотоны летят мимо галактики, то на них действует сила притяжения (фотоны обладают массой!), искривляющая траекторию движения в сторону галактики (это искривление, конечно, чрезвычайно мало). С точки зрения волновой теории света гравитационное поле галактики несколько увеличивает показатель преломления вакуума, создавая оптически неоднородную среду, в которой свет распространяется криволинейно, отклоняясь в сторону более высоких значений показателя преломления, то есть к галактике.

Серьезный читатель, конечно, сознает несерьезность приведенных выше рассуждений. Но он простит автора, которому не терпится рассказать о модели галактики, умещающейся на ладони, и которого вовсе не прельщает задача популяризации

теории, сколь бы интересной и важной эта теория ни была. Поэтому я настоятельно рекомендую серьезному читателю познакомиться хотя бы с той литературой, на которую даны ссылки в конце этого параграфа, и поработать самостоятельно над теорией гравитационной линзы — это захватывающе интересно и действительно очень важно. Я же перейду к описанию приборов, моделирующих гравитационную линзу, в надежде на то, что опыты, скорее чем призывы, привлекут внимание читателя и к гравитационным линзам, и к проблемам гравитации вообще.

Итак, мы исходим из того, что гравитационные линзы, в принципе, могут существовать, искривляя идущие сквозь них световые пучки и давая изображения расположенных за ними объектов. Каков бы ни был механизм действия гравитационных линз мы можем моделировать их оптическими «линзами», а именно созданием оптически неоднородных сред с нужным градиентом показателя преломления. Представим себе кусок оргстекла, внутри которого создана область пониженной температуры. Такое оргстекло является оптически неоднородным, причем показатель преломления его возрастает в направлении к области пониженной температуры. Очевидно, как раз это и необходимо для моделирования гравитационной линзы.

● Схема экспериментальной установки, которую мы использовали, показана на рис. 8.9. Точечный источник света 1 является моделью квазара. Свет от него проходит через брусок оргстекла 2 , в отверстие которого помещен цилиндрический сосуд 3 ,

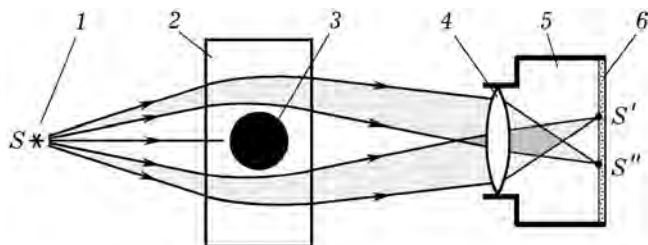


Рис. 8.9. Оптическая схема опыта, в котором моделируется гравитационная линза

охлаждаемый тем или иным способом. Этот сосуд выполняет роль модели галактики. За бруском оргстекла расположена модель глаза (см. § 7.11), состоящая из объектива 4 , непрозрачной камеры 5 и матового стекла 6 .

В качестве источника света вы можете использовать лампочку накаливания автомобильного типа, рассчитанную на напря-

жение 6,3 В. Брусек оргстекла может иметь примерные размеры $60 \times 60 \times 120$ мм. Цилиндрический сосуд диаметром 25 мм и длиной около 100 мм удобно изготовить из медной или дюралевой трубки, закрыв ее нижнее отверстие резиновой пробкой. Важно сделать сосуд так, чтобы в отверстие бруска из оргстекла он входил с небольшим усилием. Внешний вид модели галактики представлен на рис. 8.10. Модель глаза может иметь произвольные размеры, но при изготовлении ее вы должны обеспечить

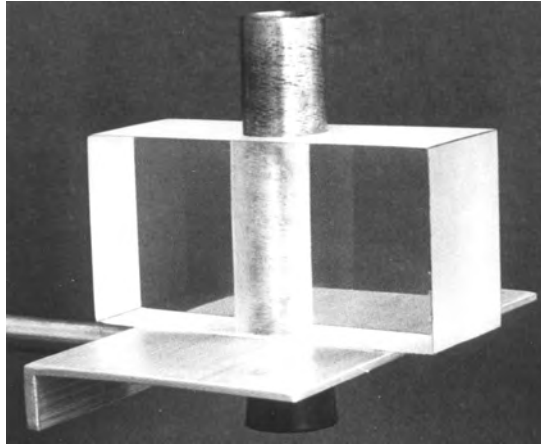


Рис. 8.10. Кусок оргстекла, отрезок водопроводной трубы, резиновая пробка и немного жидкого азота или охлаждающей смеси — вот и все необходимое для изготовления модели галактики

возможность регулировки положения объектива относительно матового стекла для соответствующей «аккомодации» глаза при постановке опытов.

Опыт мы проводили следующим образом. Включали источник света и на расстоянии 4 м от него располагали брусок оргстекла с цилиндрическим сосудом. На расстоянии порядка 4 м от бруска помещали модель глаза так, чтобы тень от сосуда полностью перекрывала ее объектив. На «сетчатке глаза» при этом ничего не было видно. Далее мы наливали в сосуд жидкий азот и наблюдали, как постепенно на «сетчатке глаза» появлялись два изображения S' и S'' одного и того же «квара» S (см. рис. 8.9)!

Опыт производит неизгладимое впечатление. Чтобы показать его большой аудитории, мы вместо модели глаза использовали передающую телекамеру замкнутой телевизионной установки. В этом случае оказалось возможным поставить опыт без за-

темнения: регулировкой яркостью «квазара» с помощью автотрансформатора можно добиться контрастной картины явления на экране телевизора при обычном дневном освещении.

Вы можете упрекнуть автора за то, что он осмеливается описывать опыт, в котором для охлаждения применяется жидкий азот. Но жидкий азот действительно очень удобен в обращении и его нетрудно достать. Можно обойтись и без жидкого азота, применяя вместо него твердую углекислоту (если она более доступна) или подходящую охлаждающую смесь. В этом случае целесообразно изменить конструкцию модели галактики, сделав

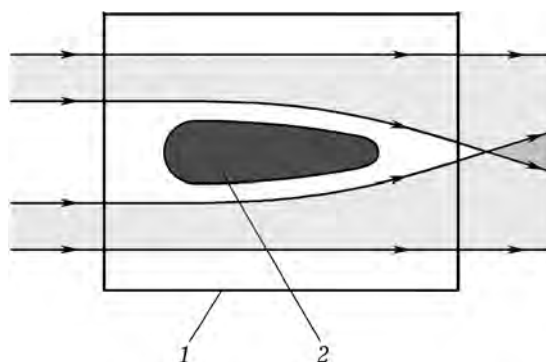


Рис. 8.11. Схема модели галактики

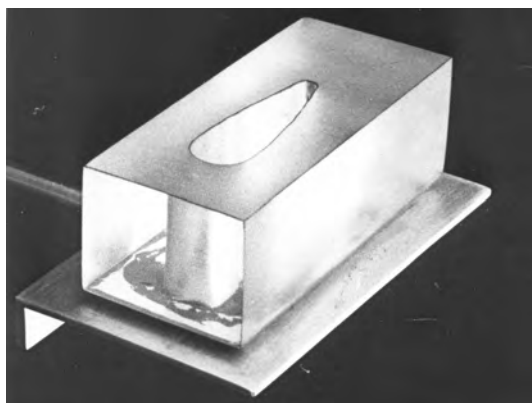


Рис. 8.12. Внешний вид модели галактики

ее такой, как показано на рис. 8.11 (1 — брусок из оргстекла, 2 — охлаждаемая полость в бруске); см. также рис. 8.12. Чем длиннее охлаждаемая полость в бруске оргстекла, тем меньший градиент

температуры нужно создать для получения заметного эффекта. Кроме того, с увеличением продольного размера полости снижаются общие размеры экспериментальной установки (нетрудно довести их до 1–2 м).

В одном из наших опытов мы использовали брусок оргстекла с полостью, наибольшая ширина которой составляла 20 мм, а длина — 70 мм; радиус кривизны боковых стенок полости был выбран равным 200 мм. При изготовлении полости проще всего

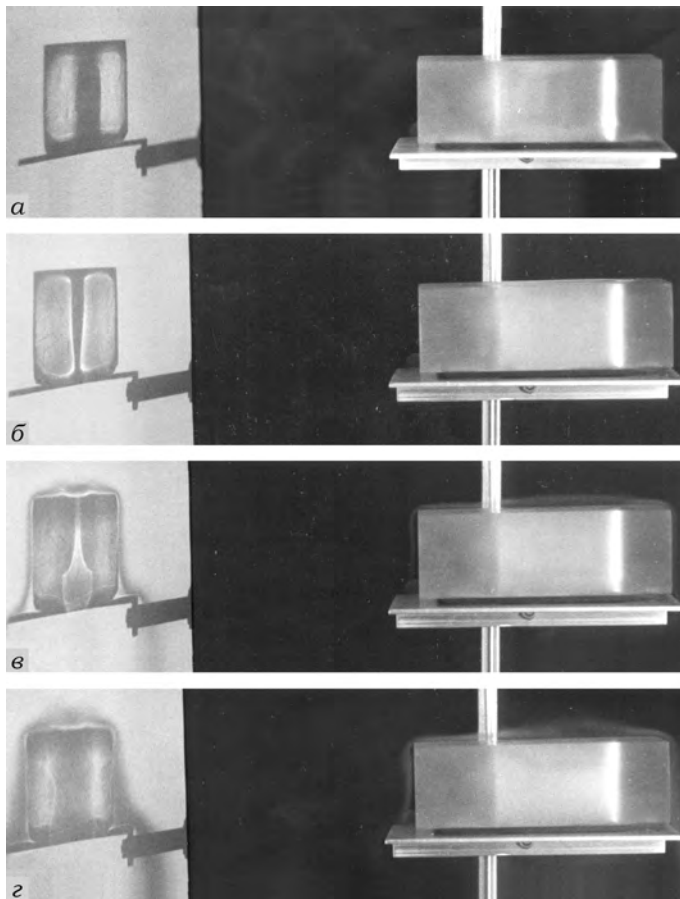


Рис. 8.13. Исчезающая тень: *а* — полость в бруске из оргстекла дает на экране четкую тень; *б* — охлаждение полости приводит к тому, что тень сужается; *в* — тень исчезает совсем (обратите внимание на пары жидкого азота над полостью); *г* — из-за неравномерного охлаждения возможно появление оптических неоднородностей в оргстекле

сделать вначале в бруске оргстекла соответствующее отверстие, а затем к нижней грани бруска пластилином приклеить пластинку из оргстекла, которая будет выполнять роль дна. В такую полость можно спокойно наливать жидкий азот или заполнять ее охлаждающей смесью.

Закончим этот параграф описанием опыта, который на начинающих производит даже большее впечатление, чем опыт по моделированию гравитационной линзы.

За бруском оргстекла с полостью расположите не модель глаза, а белый экран так, чтобы на нем получилась тень от полости (рис. 8.13а). Быстро заполните полость охлаждающей смесью, и вы будете наблюдать, что тень на экране начинает сужаться, причем наиболее быстро в нижней части бруска (рис. 8.13б). Сужение это происходит до тех пор, пока тень не исчезает совсем так, что экран оказывается освещенным практически равномерно (рис. 8.13в)! Предоставляем вам возможность объяснить явление самостоятельно.

Напомним только, что вы уже имели дело с такими явлениями, при которых прозрачный объект давал на экране четкую тень от имеющейся в нем оптической неоднородности (§ 2.3). В последнем опыте наблюдалось обратное явление исчезновения тени за счет криволинейного распространения света в оптически неоднородной среде.

Для самостоятельной проработки

1. Муханов В. Ф. Двойной квазар $QSO\ 0957 + 561\ A, B$ — гравитационная линза? // Успехи физических наук.— 1981.— Т. 133.— Вып. 4.— С. 729–732.

2. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Том 2. — М.: Наука, 1966. — 880 с. (С. 436–437).

3. Королев Ф. А. Теоретическая оптика. — М.: Высшая школа, 1966. — 556 с. (С. 356–359).

На доступном уровне рассмотрено искривление световых лучей в гравитационном поле.

4. Искривление лучей вблизи галактики. Придумайте и поставьте опыт, в котором можно непосредственно наблюдать искривление светового луча, проходящего вблизи модели галактики.

5. Сравнение гравитационной и оптической линз. Построив приближенный ход световых лучей на различных расстояниях от центра гравитационной линзы и выполнив аналогичное построение для обычной оптической линзы, сравните между собой действия обеих линз. Выясните, есть ли у гравитационной линзы фокус и способна ли она давать изображение точечного источника в виде точки. Уточните,

что следует понимать под «изображением», которое создает гравитационная линза. Оцените сам термин «гравитационная линза» с точки зрения соответствия его реальному явлению.

6. Блюх П. В., Минаков А. А. Гравитационные линзы // Природа. — 1982. — № 11. — С. 59–69.

Популярная статья, которая более подробно познакомит вас с гравитационными линзами и поможет получить ответы на поставленные выше вопросы.

7. Егоров Г. С., Степанов Н. С. Моделирование «гравитационной линзы» в лекционной демонстрации // Успехи физических наук. — 1982. — Т. 138. — Вып. 1. — С. 147–149.

В предлагаемой вашему вниманию работе описана модель гравитационной линзы, выполненная из оптически однородного диэлектрика. Полезно сравнить ее с моделью из оптически неоднородного диэлектрика, которая рассмотрена в этом параграфе.

8. Чернин А. Д. Космические иллюзии и миражи // Квант. — 1988. — № 7. — С. 15–22.

В статье изложены объяснения некоторых интересных астрономических явлений, таких как квазары-близнецы, движение космических объектов со сверхсветовой скоростью.

9. Блюх П. Космический мираж (рассказ о гравитационных линзах) // Квант. — 1992. — № 12. — С. 15–21.

Здесь рассказывается о гравитационных линзах в природе, о важности их изучения для решения многих проблем астрофизики.

10. Кожинин С. Отклонение частиц и световых лучей полем тяготения // Квант. — 2001. — № 4. — С. 39–41, 43.

Рассмотрены несколько задач на нахождение угла отклонения частицы и светового луча гравитационной линзой, а также на определение ее фокусного расстояния.

8.5. Оптические модели электронно-оптических систем

• Вы еще не забыли о законах Фика и Фурье (§ 3.5)? Теперь перед вами формула из совсем другой области физики, которая тем не менее очень похожа на аналитическое выражение упомянутых законов:

$$j = -g \frac{dU}{dy}, \quad (8.10)$$

где j — плотность электрического тока в направлении оси y (плотность потока заряда через поперечное сечение проводника), g — удельная проводимость, dU/dy — градиент разности потенциалов в направлении оси y [1]. Это наводит на мысль, что электрическое поле в проводнике (а значит, и в вакууме, и

в диэлектрике) может быть смоделировано... соответствующими распределением температуры или диффузионным распределением вещества! Сама по себе такая возможность очень интересна. Ее реализация становится особенно заманчивой, если вспомнить, как движется заряженная частица в электрическом поле.

Рассмотрим несложный пример. Пусть в однородное электрическое поле плоского конденсатора со скоростью v влетает электрон, как показано на рис. 8.14. Электрон под действием поля будет отклоняться к положительному электроду конденсатора, двигаясь, как нетрудно показать, по параболе. Найдем радиус кривизны траектории движения электрона.

За небольшое время τ электрон пройдет в горизонтальном направлении путь $l = v\tau$. В электрическом поле конденсатора напряженностью E на электрон, заряд которого e , действует сила $f = eE$. Под действием этой силы электрон, имеющий массу m , движется с ускорением $a = f/m = eE/m$. За то же время τ электрон приблизится к положительной обкладке конденсатора на расстояние

$$h = \frac{a\tau^2}{2} = \frac{eE}{2m} \tau^2.$$

Из треугольника ABO по теореме Пифагора:

$$R^2 = (R - h)^2 + l^2,$$

где R — искомый радиус кривизны траектории движения электрона. Пренебрегая малой величиной h^2 , из этой формулы получаем

$$R = \frac{l^2}{2h}.$$

Подставляя в последнюю формулу вместо l и h их значения, имеем

$$R = \frac{m v^2}{e E}. \quad (8.11)$$

Мы нашли значение радиуса кривизны траектории движения электрона в однородном электрическом поле. Теперь попробуем

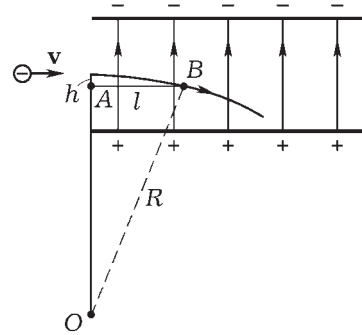


Рис. 8.14. К вычислению радиуса кривизны траектории движения электрона в однородном электрическом поле

придать формуле (8.11) вид, похожий на формулу радиуса кривизны искривленного светового пучка (§ 1.4):

$$R = \frac{n}{dn/dy}. \quad (8.12)$$

Прежде всего напомним, что напряженность электрического поля E в направлении некоторой оси y есть градиент потенциала φ :

$$E = \frac{d\varphi}{dy}. \quad (8.13)$$

Кинетическая энергия электрона, движущегося в электрическом поле от точки с нулевым потенциалом до точки с потенциалом φ , изменяется на величину

$$\frac{mv^2}{2} = e\varphi. \quad (8.14)$$

Из формул (8.13) и (8.14) имеем

$$E = \frac{m}{2e} \frac{d}{dy}(v^2) = \frac{m}{e} v \frac{dv}{dy}.$$

Подставляя последнее выражение для напряженности в формулу (8.11), получаем

$$R = \frac{v}{dv/dy}. \quad (8.15)$$

Эта формула совпадает с формулой (8.12), и мы должны сделать вывод, что электрон в электрическом поле движется так же, как свет в оптически неоднородной среде! Формула (8.15) кроме того показывает, что показателю преломления среды соответствует скорость электрона. Ничего необычного в этом нет: показатель преломления среды определяется скоростью света в ней. Однако все же хотелось бы сопоставить показатель преломления среды не со скоростью электрона, а с какой-нибудь характеристикой электрического поля. Сделать это можно так.

Из формул (8.11), (8.13) и (8.14) следует, что радиус кривизны траектории движения электрона

$$R = \frac{2\varphi}{E} = \frac{2\varphi}{d\varphi/dy}.$$

Чтобы в этой формуле избавиться от портящей все дело двойки в числителе, воспользуемся тем, что

$$\frac{d}{dy}(\sqrt{\varphi}) = \frac{1}{2\sqrt{\varphi}} \frac{d\varphi}{dy}.$$

Тогда получаем

$$R = \frac{\sqrt{\varphi}}{d\sqrt{\varphi}/dy}. \quad (8.16)$$

Сравнивая формулы (8.16) и (8.12), делаем вывод, что показатель преломления среды для света соответствует корень квадратный из потенциала электрического поля для электрона.

Таким образом, во всех опытах по криволинейному распространению света в оптически неоднородных средах вы, сами не подозревая о том, одновременно наблюдали, как двигался бы электронный пучок в соответствующем электрическом поле!

Значит, используя оргстекло и нагреватели, можно построить оптические модели электронно-оптических систем. Вы сможете смоделировать, например, отклоняющую и фокусирующую системы электронно-лучевой трубки осциллографа, различные электронные линзы и т. д. В этих оптических моделях, как нетрудно сообразить, нагреватель будет соответствовать отрицательному, а охладитель — положительному электроду электронно-оптической системы (от нагревателя «отталкивается» свет, от отрицательного электрода отталкиваются электроны).

• Кратко рассмотрим простейшую электронную линзу-диафрагму с круглым отверстием [2]. С обеих сторон к такой линзе примыкают однородные электрические поля так, что система эквипотенциальных линий имеет вид, показанный на рис. 8.15. Пусть потенциал диафрагмы меньше, чем потенциалы удаленных от нее точек однородных электрических полей.

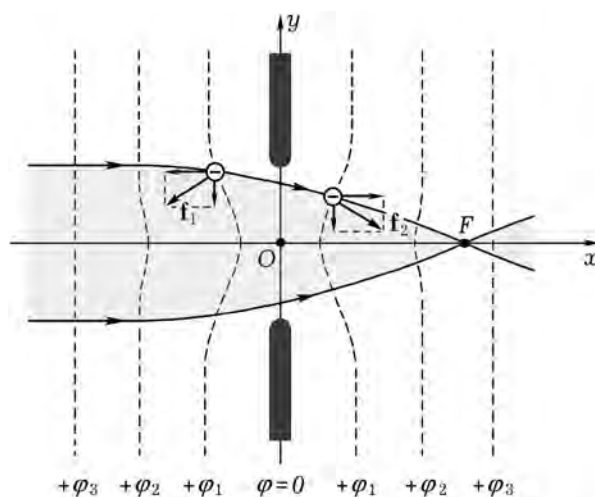


Рис. 8.15. Простейшая из электронных линз: штриховыми линиями обозначены эквипотенциальные линии

Такая диафрагма фокусирует поток электронов. Действительно, на движущиеся параллельно оси диафрагмы электроны дей-

ствуют силы (две из них f_1 и f_2 показаны на рисунке), которые имеют составляющие, направленные к оси. Иными словами, отрицательно заряженные электроны отталкиваются от отрицательно заряженной диафрагмы. Это приводит к тому, что после прохождения через отверстие диафрагмы параллельный пучок электронов собирается в одной точке F . Следовательно, диафрагма работает как собирающая электронная линза с фокусом в точке F .

Теперь представьте себе, что изображенная на рис. 8.15 диафрагма находится не в вакууме, а в оргстекле, и она не заряжена, а нагрета до определенной температуры. Нагретая диафрагма вызывает нагревание расположенного вокруг нее оргстекла. Спустя определенное время установится стационарный режим процесса, то есть каждая точка оргстекла будет иметь свою неизменную во времени температуру. Можно сказать, что нагретая диафрагма создает в оргстекле поле температуры.

Линии равных температур («эквitemпературные» линии) будут в точности такими же, как эквипотенциальные линии. Значит, такими же будут и линии равных показателей преломления оргстекла. Поэтому нагретая диафрагма будет действовать на распространяющийся в оргстекле световой пучок точно так же, как отрицательно заряженная диафрагма действует на пучок электронов в вакууме.

На рис. 8.16 показан прибор, моделирующий действие системы из двух электронных линз-диафрагм. Его вы сможете сделать из полоски оргстекла сечением 10×30 мм и длиной 300 мм.

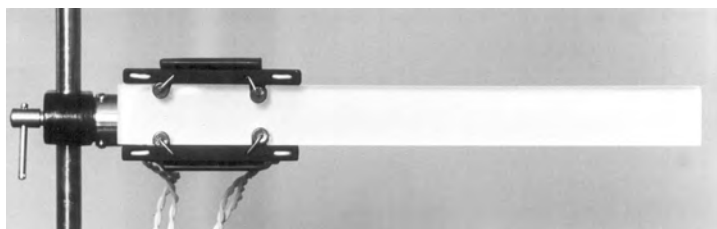


Рис. 8.16. Прибор, моделирующий систему двух электронных линз

В качестве нагревателей можно использовать две пары одинаковых резисторов типа МЛТ-2 мощностью 2 Вт и сопротивлением 10–16 кОм. Подавая на резисторы различные напряжения, вы будете нагревать их до разной температуры и сможете наблюдать за соответствующими изменениями светового пучка.

Надеюсь, что суть метода вы уловили и при необходимости построите те модели электронно-оптических систем, которые представят для вас интерес.

Для самостоятельной проработки

1. Калашников С. Г. Электричество. — М.: Физматлит, 2004. — 624 с. (С. 128–130 и 132–133).

Рассмотрены закон Ома в дифференциальной форме и метод моделирования электростатических полей стационарными электрическими полями.

2. Кельман В. М. Электронная оптика. — М.: Наука, 1968. — С. 31–79.

По этой научно-популярной книге вы сможете получить первоначальные сведения об электронно-оптических системах.

3. Арцимович Л. А., Лукьянов С. Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. — М.: Наука, 1978. — 224 с. (С. 7–54).

Рассмотрены простейшие электронно-оптические приборы. Настоятельно рекомендую почитать эту прекрасно написанную и оформленную книгу.

4. Кельман В. М., Явор С. Я. Электронная оптика. — М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1963. — 364 с. (С. 52–57).

Это серьезная книга, которая будет вам полезна, если вы решите основательно вникнуть в проблемы электронной оптики. Хотелось бы обратить ваше внимание на следующее. Мы занимались только оптическими экспериментами, но все же были вынуждены коснуться и молекулярной физики, и электростатики, и теории гравитации. Это совсем не случайно потому, что физика едина. Мы нередко забываем об этом, поскольку фактически изучаем не физику, а разделы курса физики. Поэтому, познакомившись с новым для себя физическим явлением, отыскивайте для него место в той совокупности явлений, которой вы уже владеете, так, чтобы постепенно формировалась единая картина физического восприятия природы. Вот и в рекомендованной книге, в частности, рассматривается метод моделирования электростатического поля гравитационным, для которого нужно найти подходящее место в своей системе знаний.

8.6. Моделирование распространения звука

● В отсутствие ветра скорость звука в атмосфере определяется ее температурой. Обычно с ростом высоты до 10–15 км температура воздуха снижается, и скорость звука в нем уменьшается. Поэтому звуковые лучи от источника, расположенного на некоторой высоте вблизи поверхности Земли, изгибаются вверх. Ночью в атмосфере нередко возникает *температурная инверсия*, при которой температура воздуха с ростом высоты не

только не уменьшается, но напротив, увеличивается. В таком случае звуковые лучи от источника, изгибаясь вниз, многократно отражаются от земной поверхности и в итоге представляют собой ряд следующих друг за другом дугообразных кривых. В этих условиях приземный слой представляет собой *природный акустический волновод*.

Аналогичное явление наблюдается при распространении звука в океане. Раздел акустики, в котором изучаются упругие волны (инфразвук, звук и ультразвук) в реальной водной среде, получил название *гидроакустики*. Важное значение этого раздела определяется тем, что упругие волны являются единственным видом излучения, которое может распространяться в морях и океанах на значительные расстояния, обеспечивая подводную связь и локацию. Скорость звука в морской воде зависит от ее температуры, солености и давления, которое определяется глубиной. Понятно поэтому, что звуковые лучи в морской воде криволинейны. Если скорость звука с увеличением глубины растет, то звуковые лучи, изгибаясь к поверхности воды, будут многократно отражаться от нее. Возникает приповерхностный *звуковой канал*, в котором звук может проходить большие расстояния.

Конечно, явления атмосферной акустики и гидроакустики гораздо более многообразны и интересны, чем здесь о них сказано. Но ваша задача заключается в другом: разработайте и поставьте эксперимент, в котором световой пучок, распространяясь криволинейно, несколько раз отражается от плоской поверхности. Такой эксперимент, очевидно, может моделировать распространение звука в атмосфере и океане, поэтому он не просто занимателен и предположительно красив, а еще и весьма важен в познавательном смысле.

- Для эксперимента выберем жидкую оптически неоднородную среду. В ней свет должен, распространяясь по дугам, отражаться от некоторой плоскости. В качестве такой плоскости можно использовать границу раздела между двумя жидкостями, на которой происходит полное внутреннее отражение света. Выше этой границы должна находиться оптически неоднородная среда, в которой показатель преломления сравнительно быстро уменьшается.

Для решения проблемы в принципе можно использовать разные жидкости. Мы выбрали воду ($n_1 = 1,33$), керосин ($n_2 = 1,44$) и бензин ($n_3 = 1,38$). Плотность воды больше плотности керосина, а керосина больше плотности бензина, поэтому указанные жидкости в сосуде располагаются одна над другой.

Вода и керосин не смешиваются, причем оптическая плотность керосина больше, чем воды. Следовательно, на границе раздела между керосином и водой световой пучок, идущий из керосина под углом, превышающим предельный, испытает полное внутреннее отражение. Керосин и бензин смешиваются, поэтому за счет диффузии граница раздела между ними представляет собой переходный слой с градиентом показателя преломления, направленным вниз.

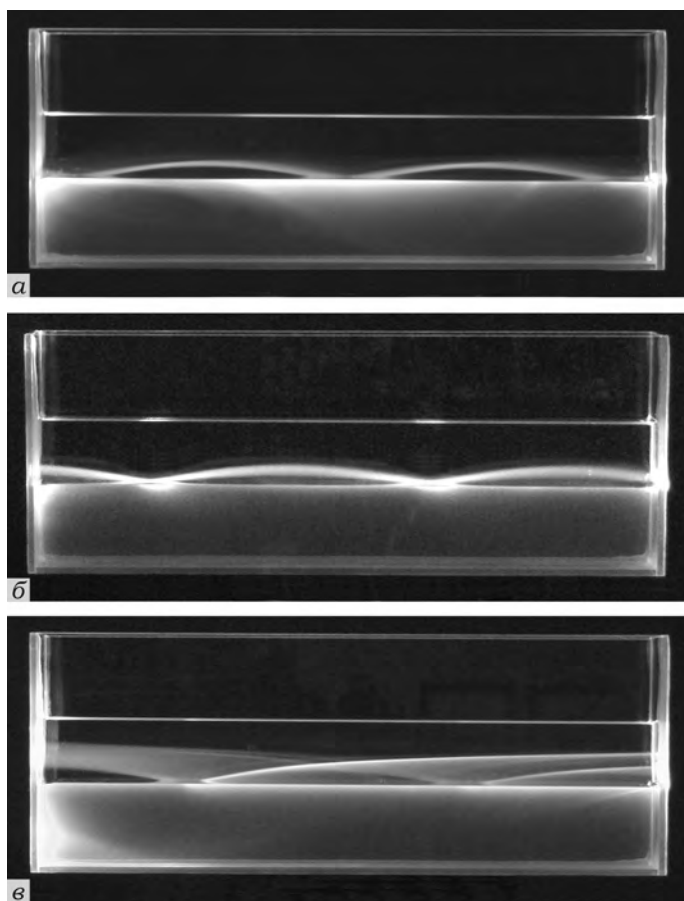


Рис. 8.17. Волноводное распространение света: *a*, *б* — узкие световые пучки, *в* — широкий пучок света

Теперь понятно, как подготовить и выполнить эксперимент. В склеенную из стекла плоскопараллельную кювету размером $50 \times 150 \times 400$ мм налейте до трети ее высоты подкрашенную

флюоресцеином воду (см. § 1.3). Поверх воды аккуратно залейте бензин так, чтобы образовался слой примерно такой же толщины, что и слой воды. Из хлорвиниловой трубки внутренним диаметром не более 3 мм изготовьте шланг длиной около 200 мм и конец его соедините с подходящей воронкой (представляющей собой, например, баллон одноразового шприца емкостью 40 мл). Пережмите шланг и налейте в воронку керосин. Слегка ослабляя зажим, добейтесь, чтобы керосин дошел до нижнего конца шланга. Вновь пережмите шланг и аккуратно отпустите его конец в кювету до границы раздела между водой и бензином. Ослабьте зажим так, чтобы керосин растекался по поверхности воды, вытесняя бензин вверх. По мере вытекания подливайте керосин в воронку, следя за тем, чтобы вместе с керосином в жидкость не вошли воздушные пузырьки. Так, не спеша, получите между водой и бензином слой керосина толщиной около 15 мм. После этого аккуратно удалите из жидкостей шланг.

Теперь осталось только должным образом направить в кювету узкий пучок света от школьного осветителя (см. § 1.1). Подберите угол падения и вы увидите восхитительную картину волнового распространения света (рис. 8.17)! Обратите внимание на люминесценцию водного раствора флюоресцеина в местах полного внутреннего отражения света. Исследуйте распространение широкого светового пучка. Пронаблюдайте одновременное распространение двух световых пучков, входящих в переходный слой под разными углами. Посмотрите, как меняется картина распространения света с течением времени.

Для самостоятельной проработки

1. Варламов А. А., Маляровский А. И. Переговорная трубка длиной в экватор? // Квант. — 1985. — № 2. — С. 13–18.

2. Бреховских Л. М. Акустика в океане // Квант. — 1987. — № 3. — С. 9–13.

В этих статьях подробно рассмотрено явление криволинейного распространения звука в подводных акустических каналах.

3. Физика океана / Под ред. Ю. П. Доронина. — Л.: Гидрометеоздат, 1978. — 296 с. (С.271–281).

Изложена лучевая теория распространения звука в слоисто-неоднородных средах. Рассмотрены отрицательная и положительная рефракция звука в море, распространение звука в подводном звуковом канале и волноводное распространение звука.

Глава 9

УЧИТЕЛЮ ФИЗИКИ О ГРАДИЕНТНОЙ ОПТИКЕ

Эта глава предназначена в основном для будущих и начинающих учителей физики. Мы поговорим о том, нужно ли вообще знакомить школьников с криволинейным распространением света, кратко обсудим современное состояние методики изучения оптических явлений, рассмотрим содержание, структуру учебного материала и методику изучения основ градиентной оптики, разберемся с возможной методикой введения фундаментальных понятий физической оптики. Основная задача главы — побудить читателя к критическому восприятию учебной литературы с целью разработки оптимальной методики формирования фундаментальных физических понятий в процессе учебного познания физических явлений. Здесь вполне уместно вспомнить рассуждение Мандельштама.

«В образовании понятий состоит первый шаг по пути познания природы. Они являются той базой, на которой строится дальнейшее. Но образованные таким образом первоначальные понятия обладают, как мне кажется, следующим свойством. Они не поддаются строгому определению. [...] Итак, одними словами первоначальным физическим понятиям научить нельзя. Вот почему, позвольте мне это здесь подчеркнуть, ни учебник, ни учитель недостаточны, чтобы научить физике. Учащийся должен хоть немного работать опытно сам. Он должен хоть поверхностно, но сам видеть, сам слышать, сам осязать те явления, о которых ему говорят» [2, с. 246].

9.1. Нужна ли градиентная оптика в курсе физики?

Хотя некоторые явления *градиентной оптики* исследуются с момента возникновения оптической науки [44, 52], а первые учебные эксперименты появились более века назад [9], этот раздел оптики, безусловно, относится к современным, поскольку в настоящее время интенсивно развивается. Он имеет важное значение для практической оптики: граданы и сельфоки нашли самое широкое применение в современной технике [7, 51].

Градиенты показателя преломления возникают при распространении в среде мощного лазерного излучения, так что градиентная оптика в определенной области смыкается с нелинейной [37]. Распространение света в атмосфере Земли, других планет, звезд, межгалактическом пространстве изучается методами градиентной оптики [22]. Исследование распространения электромагнитного излучения инфракрасного и радио-диапазонов не может быть осуществлено без учета градиента показателя преломления среды [24]. В технике сверхвысоких частот используются градиентные линзы [18], теория первой из которых (так называемого «рыбьего глаза») дана Максвеллом еще в 1860 году. Изготовление градиентных линз для радиоволн значительно проще, чем оптических, поэтому такие линзы давно применяются в радиолокационных устройствах. Методами градиентной оптики исследуются явления распространения звука и ультразвука в акустически неоднородных средах, сейсмических волн в земной коре [23], электромагнитных волн в лабораторной, ионосферной и космической плазме, электронных и ионных пучков в электрических и магнитных полях [22]. Исторически одна из первых физических задач, для решения которой применялись методы градиентной оптики, связана с нахождением брахистохроны — траектории быстрого спуска в поле тяжести Земли. Проблемы градиентной оптики стимулировали возникновение вариационного исчисления [19]. Создавая квантовую механику, Шредингер прямо использовал оптико-механическую аналогию [54], которая полностью сохранила значение в современной теоретической физике. Градиентная оптика может быть изучена на базе фундаментальных принципов Гюйгенса и Ферма, а с другой стороны она обеспечивает учебное применение этих принципов. Наконец, концепция личностно-ориентированного образования требует включения в содержание учебной физики элементов градиентной оптики, которые представляют значительный интерес для учащихся, нацеленных на углубленное изучение физики и техники.

Однако в современных курсах оптики и волновой физики Е. И. Бутикова [6], Н. М. Годжаева [12], Р. Дитчберна [15], Г. С. Горелика [13], Н. И. Калитеевского [20], Ф. А. Королева [21], Ф. Крауфорда [25], Г. С. Ландсберга [26], И. В. Савельева [41] и др., в курсе общей физики для педагогических институтов Е. М. Гершензона, Н. Н. Малова и А. Н. Мансурова [10], а также в школьных учебниках Г. Я. Мякишева и Б. Б. Буховцева [36], Н. М. Шахмаева, С. Н. Шахмаева и Д. Ш. Шодиева [53], А. Т. Глазунова, О. Ф. Кабардина, А. Н. Малинина, В. А. Орлова и

А. А. Пинского [47] распространение света в оптически неоднородных средах только упоминается, а учебный эксперимент ограничен лишь одним опытом [14], который в силу ряда причин ставится крайне редко. Несколько подробнее градиентная оптика рассматривается в курсах М. Борна и Э. Вольфа [3], М. Планка [38], Р. В. Поля [39], Д. В. Сивухина [43], Р. Фейнмана [46], О. Д. Хвольсона [52], но они являются университетскими и мало соответствуют требованиям дидактики физики. Поэтому налицо *противоречие* между значением градиентной оптики для современной физической науки и техники, для формирования физического мышления и мировоззрения учащихся и той ролью, которая отводится изучению явлений градиентной оптики в курсах физики. Помимо общего можно указать также конкретные противоречия: 1) между сложной, громоздкой физической теорией явлений градиентной оптики и возможностями учебного процесса для ее усвоения учащимися; 2) между оптическими явлениями распространения света в неоднородных средах и учебным физическим экспериментом, предназначенным для изучения этих явлений; 3) между содержанием, объемом, структурой учебного материала по градиентной оптике и учебным временем, которое реально может быть затрачено на его освоение.

Предпринятые нами попытки преодоления перечисленных противоречий привели к пониманию необходимости разработки учебной модели градиентной оптики, включающей учебную теорию, учебный эксперимент и методику их применения в системе обучения физике.

9.2. Современное состояние методики изучения основ физической оптики

1. Общие положения. Если иметь в виду формирование в сознании учащихся физической картины мира [33, 34, 35], то оптику следует изучать с целью экспериментального обоснования квантовой теории, специальной и общей теории относительности. Поэтому логика школьного курса должна быть такой. Вначале следует показать, что свет представляет собой электромагнитную волну. Затем нужно доказать, что свет — это поток фотонов, обосновав двойственную корпускулярно-волновую природу света. Кроме того, необходимо экспериментально подтвердить конечность и инвариантность скорости света, а также равноправность всех инерциальных систем отсчета. Наконец, рассмотрением оптических явлений в неинерциальных системах отсчета доказать влияние тяготения на распространение света. Таким образом,

экспериментальное и теоретическое изучение оптических явлений в значительной мере обосновывает современную физическую картину мира, поэтому именно эти явления должны занимать определяющее место в школьном курсе физики.

В рамках электромагнитной теории света логика изучения оптических явлений такова. Закономерности электродинамики приводят к необходимости введения гипотезы об электромагнитной волне. Экспериментами доказываются существование и основные свойства электромагнитной волны, измеряется ее скорость. Экспериментальное изучение света показывает, что он также представляет собой волну, причем скорость света равна скорости электромагнитной волны. Прямыми опытами доказывается, что электрическое и магнитное поля действуют на свет, а свет создает электрическое и магнитное поля. Отсюда делают вывод, что свет представляет собой электромагнитную волну.

Таким образом, этот раздел оптики относится к волновой физике, которая изучает общие закономерности, присущие волнам любой природы. В исследованиях [1] и [28] показано, что в современных условиях явления волновой физики наиболее полно могут быть изучены на примере звуковых волн, распространяющихся в воздухе. Эти исследования базируются на концепции *основных явлений* волновой физики [27, с. 68–69]. Идея ее такова.

Вслед за Л. И. Мандельштамом [29, 30, 31] мы считаем, что невозможно дать формально-логическое определение волны. Но понятие волны должно быть сформировано, поэтому необходимо выделение некоторых признаков, по которым определяется волна. Например, принято говорить, что если физический процесс характеризуется интерференцией, то он волновой. На самом деле можно предложить примеры, при которых интерференция есть, а волны нет. Таким образом, мы приходим к заключению, что определить волновое движение может только достаточно полная совокупность относящихся к нему физических явлений. Эту совокупность явлений, характерных для реальных волн любой природы, мы называем *основными волновыми явлениями*.

Изучение научной и учебной литературы позволяет в качестве основных явлений волновой оптики выделить следующие: *волна в свободной среде* (излучение и распространение света, затухание и поглощение света, явление Доплера), *группа волн в свободной среде* (интерференция световых волн, перенос энергии световым импульсом, дисперсия световых волн), *волна при наличии препятствий* (радиационное давление света, отражение и прохождение света, дифракция световой волны).

2. Школьные учебники. Рассмотрим вначале наиболее распространенные учебники и учебные пособия для 11 класса средней школы.

В учебнике Г. Я. Мякишева и Б. Б. Буховцева [36] изучение оптики включает основные теории света, методы измерения скорости света, принцип Гюйгенса, законы отражения и преломления, явление полного внутреннего отражения, элементы теории оптических приборов, дисперсию, интерференцию, дифракцию света, дифракционную решетку, поляризацию света, источники света, спектры, спектральные аппараты и спектральный анализ, инфракрасное, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения. Таким образом, изучаются почти все основные явления волновой физики (в явном виде не рассматриваются явления излучения, распространения, перенос энергии и явление Доплера; радиационное давление изучается в квантовой физике). Для нас наибольший интерес представляют понятия, связанные с градиентной оптикой.

Принцип Гюйгенса вводится в формулировке: «Каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн». Далее повествовательно дается алгоритм нахождения положения фронта волны. Утверждается, что «с помощью принципа Гюйгенса можно *вывести закон*, которому подчиняются волны при отражении от границы раздела сред». Затем дается *вывод закона преломления* и говорится, что «убедиться в справедливости закона преломления можно экспериментально, измеряя углы падения и преломления света и вычисляя отношение их синусов при различных углах падения». В учебнике пишется буквально следующее: «Сформулирован общий принцип распространения волн любой природы — принцип Гюйгенса. Этот принцип позволяет с помощью простых геометрических построений находить волновую поверхность в любой момент времени по известной волновой поверхности в предшествующий момент» [36, с. 160–163].

Таким образом, в одном из самых распространенных школьных учебников физики [36] проводится идея, что в физике можно *выдвинуть* принцип, основанный на геометрических соображениях, с помощью этого принципа *вывести* физические законы, а затем *убедиться* в справедливости этих законов экспериментально. Такой подход, бесспорно, вполне правомерен. Однако, учитывая требования современного образовательного стандарта о необходимости овладения школьниками основами метода научного познания, следует считать целесообразным более четкое выделение этапов учебного познания: лучше говорить

не о выводе физических законов, а о получении *следствий* из теоретической модели явления, а саму эту модель строить на основе экспериментальных и теоретических *фактов*.

Сходная логика познавательного процесса представлена в учебном пособии для углубленного изучения физики А. Т. Глазунова, О. Ф. Кабардина, А. Н. Малинина, В. А. Орлова и А. А. Пинского [47, с. 62–68], но в нем принцип Гюйгенса вводится для волн любой природы уже после того, как обоснована волновая сущность электромагнитного излучения.

Иной подход реализован в учебнике Н. М. Шахмаева, С. Н. Шахмаева и Д. Ш. Шодиева [53]. В нем последовательно рассмотрены практически все явления волновой физики для механических, электромагнитных и световых волн. Отсюда сразу следует, что поскольку для света характерны такие же явления, как для звука или волн на поверхности воды, то свет — это волна. Аналогично, так как электромагнитное излучение обладает такими же свойствами, что и механические волны, то это тоже волна. Но скорость света равна скорости электромагнитной волны, значит, с большой долей вероятности следует считать, что свет и есть электромагнитная волна. Логика этого рассуждения вполне физична и не допускает произвольных толкований. Особенно отчетливо разница подходов видна на примере принципа Гюйгенса.

В обсуждаемом учебнике принцип Гюйгенса формулируется в повествовательной форме, причем опять речь идет не о физике, а о геометрии: «Гюйгенс нашел простой геометрический способ нахождения фронта волны» [53, с. 86]. Но законы отражения и преломления вводятся как экспериментальные факты и говорится, например, что «законы преломления легко *объяснить* с помощью принципа Гюйгенса» [53, с. 95–96]. Таким образом, вначале изучаются фундаментальные эксперименты (феноменологические, функциональные, константные), затем на основе выдвинутых гипотез (принципов) дается их теоретическое объяснение и выводятся следствия, которые проверяются экспериментом.

Во всех трех рассмотренных учебниках принцип Гюйгенса формулируется и применяется для объяснения только явлений отражения и преломления света. Но фактически он ничего не объясняет, поскольку волновая сущность света еще не обоснована, а в то, что свет — это волна, учащиеся должны просто верить. Поэтому ситуация прямо противоположна: явления отражения и преломления света не объясняются принципом Гюйгенса, а сами подтверждают возможность применения принципа Гюйген-

са в оптике, что является основанием для введения гипотезы о волновой природе света. В школьном курсе физики отсутствует такое применение принципа Гюйгенса, которое оправдывало бы его введение, поскольку он используется для объяснения лишь уже известных явлений. Значит, учащиеся в значительной мере лишаются мотивации в изучении принципа Гюйгенса («а зачем он нужен, если нигде не используется, да еще и носит геометрический характер?»).

3. Учебники для высшей школы. В практике работы высших педагогических учебных заведений широко используются учебники и учебные пособия, предназначенные не только специально для будущих учителей физики, но и университетские курсы общей физики. Подробный анализ этой учебной литературы далеко выходит за рамки настоящей работы, поэтому здесь мы ограничиваемся краткой констатацией уровня рассмотрения принципов Гюйгенса и Ферма.

В учебнике Г. С. Ландсберга [26] принцип Гюйгенса рассматривается в традиционной геометрической интерпретации [26, с. 18–19] (прямо говорится: «Этот недостаток восполнил Френель, который вложил в принцип Гюйгенса физический смысл, дополнив его идеей интерференции волн» [26, с. 139]), но вместе с тем четко указываются границы его применимости. Принципом Гюйгенса обосновывается принцип Ферма [26, с. 250–253]. Исходя из принципов Гюйгенса и Ферма, выводятся законы отражения и преломления света, однако явления геометрической оптики неоднородных сред в явном виде не рассматриваются. Важное значение имеет подробный анализ принципов Гюйгенса и Гюйгенса–Френеля [26, с. 154–158]. Аналогичные подходы к принципу Гюйгенса реализованы в учебниках Е. И. Бутикова [6], Н. М. Годжаева [12], Г. С. Горелика [13], Р. Дитчберна [15], Н. И. Калитеевского [20], И. В. Савельева [41] и др. Хотя во всех этих учебниках принцип Ферма также рассматривается, но связь его с принципом Гюйгенса не прослеживается.

Гораздо более основательно геометрическая оптика неоднородных сред рассматривается в учебнике Д. В. Сивухина [43]. Автор указывает, что принцип Гюйгенса в его формулировке есть «приближенный *геометрический рецепт*», «рассуждение Гюйгенса лишено доказательной силы» [43, с. 23]. Как обычно, принцип Гюйгенса применяется для объяснения преломления света. Подробно рассматривается распространение света в оптически неоднородных средах, проводится аналогия между светом и частицей в потенциальном поле, выводится формула

для радиуса кривизны луча, рассматриваются некоторые явления атмосферной оптики, подробно обосновывается предельный переход от волновой оптики к геометрической, излагается принцип Ферма и анализируются конкретные примеры. Главным недостатком этого курса с точки зрения дидактики физики является непомерная сложность теоретических рассуждений и математических выкладок (сказанное относится также к задачам [11]); она оправдывается тем, что курс является университетским, и учащимся нужны не столько давно установленные истины, сколько быстрое изучение на их основе современного языка физики.

В учебнике для педвузов Е. М. Гершензона, Н. Н. Малова и А. Н. Мансурова [10] формулируются принципы Гюйгенса и Ферма, последний подробно анализируется с точки зрения фазовых соотношений, устанавливаются границы применимости геометрической оптики, в нескольких словах рассматривается явление миража. В задачнике для педвузов [16] отсутствуют задачи по градиентной оптике.

Таким образом, изучение и анализ учебной литературы показывает, что основы физической оптики, как правило, излагаются без строгого экспериментального обоснования. В учебной литературе редко встречается ясное разграничение гипотез, следствий, экспериментальных фактов и их теоретического объяснения. Многословные описания не слишком способствуют формированию доказательности физического мышления. В учебниках обычно излагаются теории, *проиллюстрированные* экспериментом, что мало способствует усвоению сути метода научного познания.

Что касается основ градиентной оптики, то в современной учебной литературе они фактически не рассматриваются. Отсутствуют разработанные учебная теория, учебный эксперимент и методика изучения оптических явлений, происходящих при распространении света в неоднородных средах. Введение принципа Гюйгенса не обосновывается, а напротив, настойчиво утверждается его нефизичность, геометричность, говорится, что физический смысл в него вводится только принципом интерференции. Однако этот нефизичный принцип нелогично применяется для «вывода» законов отражения, преломления, двойного лучепреломления. Если принцип Гюйгенса так уж лишен физического смысла, то вряд ли рационально тратить время на его изучение: надо сразу изучать «более физичный» принцип Гюйгенса–Френеля и изначально использовать именно его.

9.3. Основное содержание и структура учебного материала

Понятно, что градиентная оптика не может быть самостоятельным разделом учебной физики. Конечно, допустимы факультативы, спецкурсы и элективные курсы, целиком посвященные градиентной оптике. Но в элементарном и общем курсах физики материал, относящийся к градиентной оптике, должен органически сочетаться с традиционным, развивая и дополняя его. Поэтому здесь обсуждаются проблемы отбора содержания и последующего структурирования учебного материала, имеющего отношение к градиентной оптике.

1. Терминология. Оптически однородной называется такая среда, во всех точках которой показатель преломления имеет одно и то же значение. Оптика неоднородных сред — раздел физической оптики, охватывающий явления, происходящие в средах, показатель преломления которых от точки к точке изменяется. К таким явлениям относятся отражение, преломление, криволинейное распространение, рассеяние в мутных средах и т. д. Если ограничиваются рассмотрением явлений распространения света в оптически неоднородной среде с непрерывно изменяющимся показателем преломления, то соответствующий раздел оптики называют *геометрической оптикой неоднородных сред*. Указанные среды характеризуются градиентом показателя преломления. В отечественной научной литературе устоялись термины: градиентная линза, градиентный световод, градан и т. д. Вместе с тем общеприняты термины: нелинейная оптика, физическая оптика, атмосферная оптика, волоконная оптика. В иностранной литературе широко используется термин, который в дословном переводе на русский язык означает «градиентная оптика» [55, 56, 57]. Именно этот термин, четко обозначающий круг явлений геометрической оптики неоднородных сред, целесообразно использовать и в учебной литературе.

2. Возникновение градиентной оптики. Появление градиентной оптики связано с изучением рефракции земной атмосферы и явлений атмосферной оптики [4, 5, 17, 32]. Мы нашли прекрасное описание градиентной линзы, данное Фарадеем в его «Экспериментальных исследованиях по электричеству», который пишет о ней, как о помехе основному эксперименту. «При работе с катушками следует принимать во внимание одно обстоятельство, которое иначе может произвести путаницу и вызвать смущение. Вначале проволока длинной катушки была навита прямо

на тонкую стеклянную трубку, которая служила для наполнения жидкостью. Когда электрический ток проходил по катушке, он повышал температуру металла, а вследствие этого постепенно повышалась температура стекла и слоя прилегающей к нему воды, в результате чего водяной цилиндр, будучи теплее на своей поверхности, чем по оси, действовал как линза, собирая световые лучи и направляя их в глаз, причем он продолжал действовать указанным образом в течение и некоторого времени после прекращения тока. Этот источник путаницы может быть легко устранен, если отделить водяной столб от катушки и принять другие меры предосторожности» [45, с. 32]. Первые демонстрационные опыты градиентной оптики разработаны Р. Вудом [9]. Теория акустически неоднородных сред создавалась Релеем [40, с. 132–135], который ссылается на более ранние исследования Рэйнольдса и Томсона. Рэлей решил задачу о распространении звука в слоисто-неоднородной среде с постоянным градиентом показателя преломления и пришел к выводу, что траекторией луча является цепная линия. Таким образом, градиентная оптика возникла и развивается по крайней мере два столетия.

3. Основные явления градиентной оптики. Изучение литературы [8, 22] показало, что к фундаментальным для этого раздела следует отнести явление криволинейного распространения света в оптически неоднородной среде. Совершенно очевидно, что необходим феноменологический учебный эксперимент, доказывающий существование этого явления. Далее надо выделить природные явления: распространение света в земной атмосфере, зеленый луч, различного рода миражи. Особое внимание должно быть уделено явлению полного внутреннего отражения в оптически неоднородной среде. Важное значение имеет волноводное распространение света. К основным явлениям следует также отнести фокусировку и дефокусировку света градиентными линзами.

4. Практическое применение явлений градиентной оптики. В настоящее время в оптоэлектронике, фокусирующей оптике, лазерной технике, системах связи, видеозаписи и т. д. широко используются градиентные световоды (сельфоки) [51, с. 424–425] и градиентные линзы — четвертьшаговые, полушаговые и иные градины [7, с. 93–97; 50, с. 532].

5. Связь с явлениями нелинейной оптики. При распространении в среде лазерного пучка большой интенсивности изменяется показатель преломления среды, поэтому среда становится

градиентной, что приводит, в частности, к самофокусировке и дефокусировке света [26, 37]. Таким образом, оптические явления, сопровождающие распространение в среде света большой интенсивности, могут моделироваться градиентными системами.

6. Распространение звука в акустически неоднородных средах. Скорость звука в воздухе зависит от температуры и ветра, поэтому атмосфера для звука представляет собой акустически неоднородную среду, в которой звук распространяется криволинейно. В морской воде скорость звука зависит от температуры, солености и гидростатического давления. Таким образом, морская среда для звука также является акустически неоднородной. В ней звук распространяется криволинейно, причем особый интерес представляет волноводное распространение [48, с. 271–277].

7. Дифракция света на ультразвуковой стоячей волне. Стоячая ультразвуковая волна в жидкости приводит к периодическому изменению ее плотности. Возникает фазовая дифракционная решетка, которую сравнительно нетрудно получить и исследовать в учебном эксперименте [27, с. 139–144]. Сквозь такую решетку свет распространяется по криволинейным траекториям.

8. Применение принципа Гюйгенса. Как уже отмечалось, в традиционном курсе оптики этот принцип всегда формулируется, но в полной мере редко используется. Проблема заключается в разработке методики, которая позволит учащимся овладеть принципом Гюйгенса в такой степени, чтобы стало возможным его применение в конкретных ситуациях. Как минимум, используя принцип Гюйгенса, учащиеся должны уметь качественно объяснять криволинейное распространение света в оптически неоднородной среде, фокусировку и дефокусировку света.

Принцип Гюйгенса в теории дифракции переходит в принцип Гюйгенса–Френеля. При этом постулируется необходимость учета интерференции вторичных волн и просто отбрасывается метод построения огибающих вторичных волн. У учащихся оказывается сформированным убеждение, что для каждой новой группы явлений придумывается новая модификация принципа Гюйгенса, что не способствует выявлению общих закономерностей в физической оптике.

9. Принцип Ферма — свет распространяется по такому пути, для прохождения которого требуется экстремальное (минимальное, максимальное или стационарное) время. Здесь уместно ввести понятие оптической длины пути — произведения показателя преломления на геометрическую длину пути или, что то же

самое, произведения скорости света в вакууме на время прохождения светом пути.

Принцип Ферма непосредственно связан с принципом Гюйгенса. Действительно, построив в соответствии с принципом Гюйгенса две волновые поверхности для света в оптически неоднородной среде, нетрудно показать, что между ними свет распространяется по лучам, требующим минимального времени [26, с. 250–253].

В волновой оптике принцип Ферма подтверждается следующими рассуждениями. Если оптическая длина пути света стационарна, то есть бесконечно малые изменения траектории распространения света приводят к изменениям времени распространения на бесконечно малые более высокого порядка малости, то разность фаз между волнами, идущими по этому и близлежащему пути, будет бесконечно малой. Волны придут в конечную точку в фазе и поэтому усилят друг друга, то есть энергия будет распространяться вдоль линии, определяемой принципом Ферма и называемой лучом.

Имея такую волновую интерпретацию, принцип Ферма остается чисто геометрическим принципом, применяемым для расчета траектории распространения волны в среде, размеры неоднородностей которой много больше ее длины.

Как и принцип Гюйгенса, принцип Ферма используется в школьном курсе физики только в известных учащимся ситуациях, которые без труда разрешаются и без него. Необходимо такое применение этого принципа, при котором он приводил бы к новым, не очевидным для школьников результатам, тогда его введение будет оправдано. Существенно, что принцип Ферма привел к созданию вариационного исчисления [19, с. 450–518]: при бесконечно малых изменениях пути распространения света, изменение времени распространения имеет более высокий порядок малости.

10. Принцип Гамильтона или наименьшего действия — механический аналог принципа Ферма, который вообще не упоминается в школьном курсе, редко рассматривается в курсе общей физики и излагается только в курсе теоретической физики [42, с. 33–35].

11. Теория явлений градиентной оптики. Качественное изучение явлений градиентной оптики недостаточно, поэтому необходима простая и доступная теория, которая на основе принципов Гюйгенса и Ферма позволяла бы получать количественные результаты. Нужно, например, уметь рассчитывать радиус кривизны

искривленного пучка, угол отклонения пучка от первоначального направления, фокусное расстояние градиентной линзы и т. д. Учебная теория должна быть такой, чтобы при минимуме новых понятий она полностью объясняла результаты учебных экспериментов.

12. Среда с постоянным градиентом показателя преломления. На более высоком уровне изучения необходима теория, в явном виде дающая уравнение траектории света в оптически неоднородной среде. Такие среды могут характеризоваться различными зависимостями показателя преломления от координаты. Чаще всего рассматривают слоистые среды со сферической и плоской симметриями. Первый случай особое практическое значение имеет при изучении распространения света в атмосфере [4, 8].

13. Моделирование светового пучка. Реальный физический эксперимент, доказывая существование явлений и функциональных зависимостей, не в состоянии обеспечить детальное изучение отдельных особенностей, так как требует значительных временных и материальных затрат. Поэтому целесообразно применение моделей реальных явлений. Необходимо использовать простые и доступные физические модели световых пучков в оптически неоднородных средах, а также разработать компьютерные модели. Кроме того, возможна пропедевтика понятий градиентной оптики путем использования доступных механических моделей.

14. Моделирование физических явлений методами градиентной оптики. Любое физическое явление можно использовать в качестве физической модели другого физического явления. Поэтому явления градиентной оптики могут служить моделями других физических явлений. Задача заключается в выявлении таких физических явлений, которые могут быть смоделированы методами градиентной оптики и изучены на моделях.

15. Демонстрационные опыты. Необходима группа простых и эффектных демонстрационных опытов, раскрывающих физическую сущность основных явлений градиентной оптики. Эти эксперименты должны обеспечиваться стандартными демонстрационными приборами учебной лаборатории, использовать как лазерные, так и тепловые источники света.

16. Лабораторные эксперименты. Для физического практикума необходимы несколько количественных экспериментов, подтверждающих выводы элементарной теории градиентной оптики.

В распространенной учебной литературе, насколько нам известно, описан только один эксперимент по градиентной оптике: определение коэффициента диффузии на границе раздела жидкостей [49, с. 733–739]. Этот опыт поставлен в традиционном плане, поэтому вряд ли вызовет сколько-нибудь значительный интерес у учащихся. Гораздо более интересны для них опыты, например, с градиентными линзами, моделированием миража и т. д. Количественное исследование подобных явлений, бесспорно, обогатит содержание практикума.

17. Индивидуальные и самостоятельные опыты. Чтобы сформировать устойчивый интерес учащихся, необходимы серии индивидуальных и самостоятельных опытов, для постановки которых достаточно использование имеющихся у каждого под рукой материалов и иного оборудования. В идеале учащиеся должны иметь возможность в самостоятельном эксперименте у себя дома пронаблюдать все основные явления градиентной оптики. Это отдельная большая исследовательская работа, требующая тщательного анализа условий экспериментов с целью нахождения их простейшего и наиболее доступного варианта.

18. Структура учебного материала. Анализ научной, учебной и методической литературы приводит к заключению, что учебный материал физических основ градиентной оптики целесообразно структурировать по явлениям и моделям следующим образом:

- 1) световой пучок в оптически неоднородных средах,
- 2) волноводное распространение света,
- 3) полное внутреннее отражение света в оптически неоднородной среде,
- 4) тень от оптической неоднородности,
- 5) фокусировка света градиентной линзой,
- 6) изображения через оптически неоднородную среду,
- 7) моделирование светового пучка,
- 8) моделирование явлений атмосферной оптики,
- 9) градиентные оптические модели.

Такая структура предполагает использование однотипных экспериментальных установок и обеспечивает проведение серий экспериментов. При этом теоретическое изучение явлений градиентной оптики используется в той мере, в какой оно необходимо для объяснения результатов экспериментов. В подавляющем большинстве случаев допустимо качественное и полуква­ли­тативное объяснение явлений градиентной оптики, основанное на непосредственном применении принципа Гюйгенса.

9.4. Очерк методики изучения градиентной оптики

1. Изучение основных представлений градиентной оптики в школе. Приступать к изучению основ градиентной оптики можно, если у учащихся сформированы следующие понятия: точечный источник света, световой луч, световой пучок, параллельный световой пучок, расходящийся световой пучок, сходящийся световой пучок, фронт волны, волновая поверхность, плоская волна, сферическая волна, абсолютный показатель преломления, оптически однородная среда, оптически неоднородная среда. Изучение распространения света в оптически однородной среде приводит к формулировке принципа Гюйгенса для оптических явлений. Экспериментальное исследование явлений отражения и преломления обобщается в законах отражения и преломления света на плоской границе раздела двух оптически однородных сред. Законы отражения и преломления теоретически выводятся из принципа Гюйгенса; делается заключение, что эксперимент подтверждает справедливость принципа Гюйгенса в явлениях отражения и преломления света. Проводят экспериментальное и теоретическое изучение явления полного внутреннего отражения. Ставят демонстрационный опыт по криволинейному распространению света в оптически неоднородной среде, анализируют его результат и приходят к выводу о возможности криволинейного распространения света. Обращают внимание учащихся на связь этого явления с явлением полного внутреннего отражения света. Дают качественное объяснение криволинейному распространению света, пользуясь принципом Гюйгенса. Демонстрируют градиентную линзу. В принципе в школе возможна постановка фронтальных экспериментов и лабораторных работ физического практикума по изучению явлений градиентной оптики. Однако, учитывая современное состояние школьных физических кабинетов, мы воздерживаемся от соответствующих рекомендаций. На факультативных занятиях целесообразно в первую очередь экспериментальное изучение явлений атмосферной оптики и практического применения явлений градиентной оптики. Помимо перечисленного необходимы пакеты теоретических задач и экспериментальных заданий для учащихся, интересующихся физикой. Качественные задачи должны предусматривать применение принципа Гюйгенса для объяснения характерных явлений градиентной оптики. Количественные задачи разумно ограничить вычислением угла отклонения пучка от первоначального направления. Экспериментальные задания должны включать опыты по наблюдению градиентных явлений в жидкостях в домашних

условиях. Наблюдения природных явлений (миража над разогретым асфальтом, искажений солнечного диска на закате и восходе, теней от оптических неоднородностей воздуха и т. д.) рекомендуют проводить учащимся во время летних каникул.

Таким образом, на традиционных уроках по физике в базовой школе достаточно экспериментальное доказательство существования явления криволинейного распространения света в оптически неоднородной среде, элементарное объяснение этого явления на основе принципа Гюйгенса и демонстрация практического применения указанного явления в градиентной линзе.

2. Изучение основ градиентной оптики в курсе общей физики педвуза. В курсе общей физики педагогического института завершают формирование перечисленных выше понятий, формулируют принципы Гюйгенса и Ферма, выявляют связь между ними, используют их для объяснения основных явлений градиентной оптики. Ставят лекционные демонстрации криволинейного распространения света в оптически неоднородной жидкости или оргстекле, фокусировки света градиентной линзой, образования тени при криволинейном распространении света, моделирования светового пучка цепной линией. Решают качественные задачи на применение принципа Гюйгенса, количественные задачи по вычислению радиуса кривизны пучка, определению угла отклонения, определению закона распределения показателя преломления в градиентной линзе, вычислению фокусного расстояния градиентной линзы, определению положения изображения, характерных параметров градиентов, вычислению условий полного внутреннего отражения, определению характерных размеров миража и т. д. В физическом практикуме возможна постановка лабораторных работ по измерению градиента показателя преломления, измерению угла отклонения светового пучка, измерению фокусного расстояния градиентной линзы и т. д.

Таким образом, курс общей физики обогащается большой группой теоретических задач в разделе, не очень богатом физическими идеями (геометрическая оптика), двумя–тремя кратковременными и эффектными демонстрационными опытами, одной–двумя лабораторными работами физического практикума и нетрадиционным введением принципа Гюйгенса. Учащиеся при этом оказываются ознакомленными с физическими основами градиентной оптики.

3. Изучение основ градиентной оптики на спецкурсах. Различные спецкурсы по оптике и методике преподавания физики могут включать теорию и эксперимент градиентной оптики в разных

соотношениях. Например, спецкурс, посвященный формированию основных понятий физической оптики, ориентируется на углубленное изучение принципов Гюйгенса, Ферма, Гамильтона, применение их для объяснения конкретных явлений градиентной оптики, расчета параметров градиентных систем. Спецкурс, посвященный изучению физических явлений окружающей нас природы, в качестве одной из своих частей может включать явления атмосферной оптики. Спецкурс по моделированию физических явлений найдет богатый материал в градиентной оптике. Даже спецкурс по механике, если он затрагивает проблемы брахистохронных и таутохронных траекторий в поле тяжести, соприкоснется с материалом градиентной оптики.

Таким образом, в условиях педвуза в рамках спецкурсов, спецсеминаров, спецпрактикумов, а также при выполнении курсовых и дипломных работ возможно достаточно подробное теоретическое, экспериментальное и практическое изучение проблем градиентной оптики, использование результатов градиентной оптики для решения проблем других разделов физики (механики, термодинамики, электродинамики, электронной оптики, квантовой механики и т. д.). При этом студенты получают разработанные программы школьных факультативных и внеурочных занятий, лично для себя изготавливают оборудование для учебных физических опытов, отрабатывают технику постановки демонстрационных и индивидуальных экспериментов, осваивают методику проведения соответствующих занятий в школе.

9.5. Введение и формирование фундаментальных понятий физической оптики

К фундаментальным понятиям физической оптики следует отнести те, которые используются при изучении буквально всех оптических явлений. Введение этих понятий целесообразно осуществлять при рассмотрении основных законов оптики: прямолинейного распространения света, независимости световых пучков, отражения и преломления света. Выше было показано, что в современной учебной литературе это введение производится таким образом, что у учащихся не остается ясности в том, на каких фактах базируются гипотезы, какие допущения сделаны при их выдвижении, в чем суть теоретической модели явления, каковы следствия модели, в чем состоит экспериментальное обоснование справедливости модели и т. д. Школьные учебники вольно или невольно учат принимать на веру положения, выдвинутые признанными авторитетами, не оставляют места сомнениям, не

показывают, каким образом к тем или иным идеям можно прийти самостоятельно.

Ниже кратко рассмотрена возможная методика введения и формирования фундаментальных понятий физической оптики. Основная идея этой методики заключается в воссоздании пути, близкого к реальному научному познанию. Исторический путь развития науки сохранен в той степени, в какой он соответствует логике научного познания. При этом отнюдь не умаляется роль ученых, оставивших заметный след в истории физики: каждый раз указывается, кем именно получены изучаемые факты.

1. Источник, лучи и фронт волны. К поверхности воды в плоской кювете прикоснемся концом стеклянной палочки. При этом от места касания по поверхности воды побежит круговая волна (рис. 9.1). Место возбуждения волны S называется *источником*. От источника волна распространяется по прямым линиям, которые называются *лучами*. Геометрическое место точек Σ_S , до которых в данный момент времени t дошла волна, называется *фронтом волны*. К поверхности воды прикоснемся прямым краем пластинки. Увидим, что от пластинки распространяется волна с прямым фронтом.

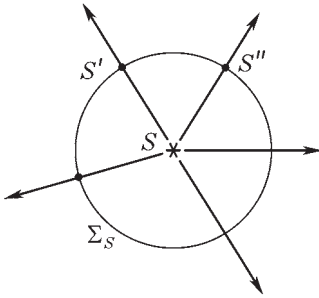


Рис. 9.1. Источник волны, лучи и волновой фронт

Наблюдения показывают, что лучи перпендикулярны фронтам волн на поверхности воды.

2. Скорость распространения волны. Наблюдаемый в опытах круглый фронт волны с центром в точечном источнике, свидетельствует о том, что по поверхности воды во всех направлениях волна распространяется с одинаковой скоростью. Среду, в каждой точке и во всех направлениях которой скорость волны одинакова, называют *однородной* и *изотропной*.

3. Волновая поверхность. Обобщим результаты наблюдений на произвольные волны, распространяющиеся в однородном и изотропном пространстве. Фронт волны теперь является поверхностью, поэтому его называют *волновой поверхностью*. В пространстве от точечного источника распространяется не круговая, а *сферическая волна*. Если радиус кривизны сферической волны велик, то небольшую часть ее волновой поверхности можно считать *плоской волной*. Очевидно, и в пространстве *лучи перпендикулярны фронтам волн или волновым поверхностям*.

4. Вторичные источники. Почему происходит распространение волны? Точки поверхности воды, до которых дошла волна, сами начинают совершать колебания. В этом смысле они не отличаются от точки S , из которой начала распространяться волна, то есть от источника волны (рис. 9.1). Поэтому мы должны допустить, что каждая точка среды S', S'', \dots , до которой дошла волна, сама становится источником вторичной круговой волны. Если волна распространяется в пространстве, то *вторичные источники* должны испускать сферические волны.

5. Фронт волны. Изобразим два фронта Σ_S и Σ'_S волны, бегущей по поверхности воды, для следующих друг за другом моментов времени t и t' (рис. 9.2). Они представляют собой концентрические окружности. Расположим на первом фронте Σ_S вторичные источники и нарисуем для них волновые поверхности, соответствующие тому моменту времени t' , для которого изображен второй фронт Σ'_S волны. Поскольку вторичные источники ничем не отличаются от первичного, а вторичные волны от первичной, скорости распространения вторичных волн совпадают со скоростью первичной. Поэтому вторичные волны наложатся друг на друга на втором волновом фронте, а во всех других точках они будут пересекаться под более или менее значительными углами. Отсюда следует *предположение*, что фронт волны в следующий момент времени есть линия наложения или *огibaющая* всех вторичных волн.

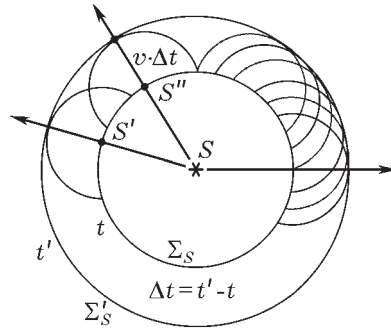


Рис. 9.2. Распространение сферической волны

6. Волна не распространяется назад. Опыт показывает, что в свободной среде волна распространяется от источника возбуждения, но никогда к источнику. Поэтому вторичные волны не должны давать идущую обратно к источнику волну. Можно *допустить*, что вторичные источники испускают сферические волны только в направлении распространения первичной волны.

7. Принцип Гюйгенса. Обобщая изложенное на случай любых волн, распространяющихся в пространстве, приходим к следующему положению: *каждая точка поверхности, до которой в некоторый момент времени дошла волна, сама стано-*

вится источником вторичной сферической волны; положение фронта волны в следующий момент времени есть огибающая всех вторичных волн, построенная для этого момента времени в направлении распространения волны. Подобный принцип впервые сформулировал Х. Гюйгенс (1678 г.), возможно, как обобщение элементарных наблюдений за волнами на поверхности воды. Пользуясь этим принципом, он сумел объяснить целый ряд явлений физической оптики. Основная идея принципа Гюйгенса о замене первичной волны волнами от вторичных источников, расположенных на некоторой поверхности, полностью сохранила свое значение до наших дней. На рис. 9.3 показано применение принципа Гюйгенса для плоской волны.

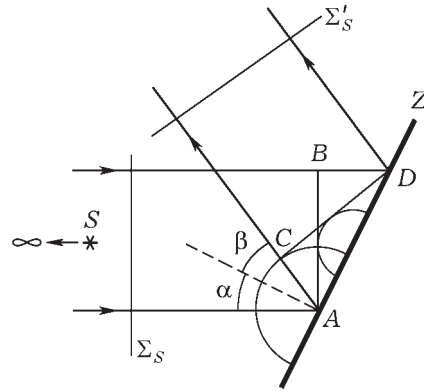
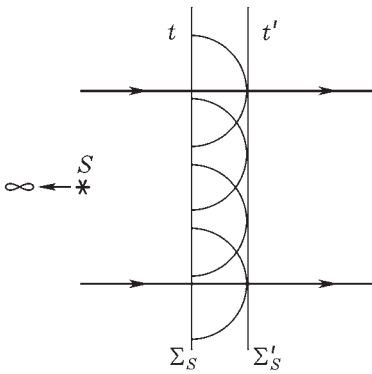


Рис. 9.3. Распространение плоской волны

Рис. 9.4. Отражение волны от плоского препятствия

8. Отражение волн. Опустив в спокойную воду плоскую пластину, получим волну на поверхности воды с прямым фронтом. Дойдя до плоского препятствия, эта волна отразится. Изобразим луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр в точке падения к препятствию (рис. 9.4). Измерив от перпендикуляра до соответствующих лучей угол падения α и угол отражения β , обнаружим, что они одинаковы.

9. Объяснение отражения на основе принципа Гюйгенса. Выполним построение падающей и отраженной волн в соответствии с принципом Гюйгенса. Для этого построим вторичную круговую волну с центром в точке A касания волной отражающей плоскости для того момента времени, когда фронт волны AB дойдет до точки D этой плоскости (рис. 9.4). Огибающая всех вторичных волн для этого момента времени дает фронт CD отраженной волны. Поскольку лучи перпендикулярны фронту

волны, то угол отражения равен углу падения. Таким образом, принцип Гюйгенса объясняет, почему для волн на поверхности воды справедлив закон отражения.

10. Отражение света. В задымленном воздухе на плоское зеркало направим луч света. При этом обнаруживаем, что падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр, восстановленный в точке падения к зеркалу, лежат в одной плоскости, причем угол отражения равен углу падения. Но тот же результат, очевидно, дает применение принципа Гюйгенса к этому явлению (рис. 9.4), если учесть, что вторичные волны в пространстве представляют собой не круги, а сферы. Отсюда следует, что *принцип Гюйгенса применим к отражению не только волн на поверхности воды, но и световых пучков*. Поэтому естественно предположение: а не является ли свет волной?

11. Преломление света. Направим узкий световой пучок на плоскую границу раздела двух оптически однородных сред (рис. 9.5). При этом помимо падающего и отраженного обнаруживаем преломленный пучок, причем все три пучка лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восстановленным к границе раздела сред в точке падения. Будем менять угол падения, при этом видим, что каждому углу падения соответствует вполне определенное значение угла преломления, то есть углы падения и преломления связаны функциональной зависимостью. В эксперименте получим табличное представление этой зависимости (табл. 1).



Рис. 9.5. Световой пучок, падающий из одной среды в другую, частично преломляется и частично отражается

Таблица 1

$\alpha, ^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\beta, ^\circ$	0	7	13	19	25	31	35	39	41	42

12. Зависимость угла преломления от угла падения. Построим график найденной экспериментально зависимости угла преломления от угла падения (рис. 9.6).

Видим, что при малых углах падения искомая зависимость практически линейна, но по мере роста углов падения эта линейность нарушается. Поэтому найти аналитическое выражение

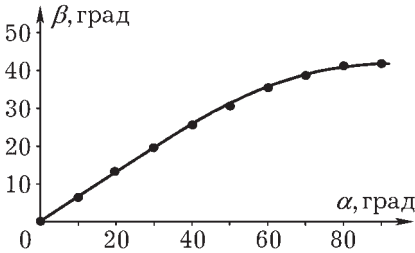


Рис. 9.6. График зависимости угла преломления от угла падения

зависимости угла преломления от угла падения совсем не просто. Один из способов такого поиска заключается в переборе всех мыслимых функций. Насколько неэффективен этот способ, подтверждает исторический факт: человечество искало эту зависимость около 2000 лет, и только в 17 веке Снеллиус и Декарт нашли ее.

13. Гипотеза о природе света. Гораздо быстрее можно прийти к цели, если высказать *обоснованные предположения* о природе света, а затем пытаться найти искомую зависимость, опираясь на эти предположения. Так мы и поступим. Будем считать, что свет — это волна (природа которой нам пока неизвестна), распространяющаяся в однородной среде с постоянной скоростью. Так как при переходе света из одной среды в другую происходит преломление, *допустим*, что скорость света в разных средах различна.

14. Объяснение преломления света. Изобразим падающий и преломленный пучки при переходе света, например, из воздуха в стекло (рис. 9.7). Нарисуем плоские фронты падающей AB и преломленной CD волн для тех моментов времени, когда падающая волна начала вход во вторую среду и когда закончила его. Для последнего момента изобразим вторичные волны во второй среде так, чтобы они касались волновой поверхности. Видно, что отрезки AC и BD световая волна в разных средах проходит за одно и то же время Δt . Если скорости света в первой и второй средах равны v_1 и v_2 , то время

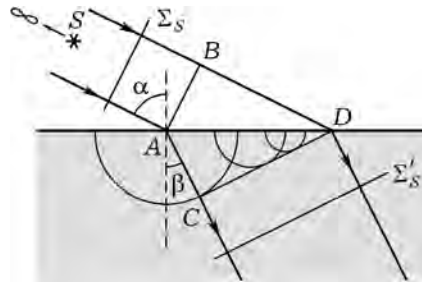


Рис. 9.7. Преломление света на плоской границе

$$\Delta t = \frac{BD}{v_1} = \frac{AC}{v_2}.$$

Отсюда следует постоянство отношения отрезков:

$$\frac{BD}{AC} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const.}$$

Но указанные отрезки однозначно связаны с углами: $BD = AD \sin \alpha$ и $AC = AD \sin \beta$. Таким образом, из предположения о том, что свет представляет собой волновой процесс, к которому применим принцип Гюйгенса, следует, что при преломлении света отношение синуса угла падения к синусу угла преломления должно оставаться величиной постоянной. Иными словами: синус угла преломления должен быть пропорционален синусу угла падения.

15. Закон преломления. Проверим следствие волновой модели и принципа Гюйгенса экспериментом. Для этого найдем синусы углов падения и преломления, измеренных в эксперименте (табл. 2), и построим график зависимости синуса угла падения

Таблица 2

$\sin \alpha$	0	0,17	0,34	0,50	0,64	0,77	0,87	0,94	0,98	1,00
$\sin \beta$	0	0,12	0,22	0,33	0,42	0,52	0,57	0,63	0,66	0,67

от синуса угла преломления (рис. 9.8). Видим, что искомая зависимость получилась линейной. Таким образом, эксперимент подтвердил *справедливость следствия теоретической модели*, в итоге получен еще один аргумент в пользу этой модели.

Теперь можно сформулировать закон преломления света: *луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения к границе раздела сред, лежат в одной плоскости; отношение синуса*

угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, которая называется относительным показателем преломления второй среды относительно первой:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{12} = \frac{v_1}{v_2}.$$

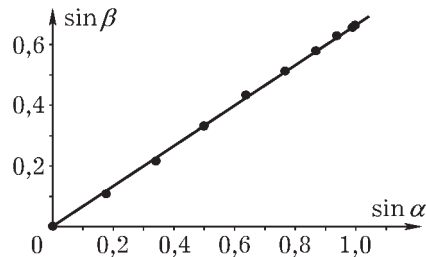


Рис. 9.8. График зависимости синуса угла преломления от синуса угла падения

Этот закон полностью обоснован экспериментом. В то же время он является следствием волновой гипотезы о природе света и принципа Гюйгенса. Поэтому закон преломления подтверждает справедливость представления о том, что свет есть волна, и принцип Гюйгенса применим к явлению преломления света.

16. Закон независимости световых пучков. Световые пучки от нескольких источников направим так, чтобы они пересекались в некоторой области. При этом обнаружим, что выполняется закон независимости световых пучков: *световые пучки, пересекаясь, не оказывают друг на друга никакого влияния; каждый из пучков распространяется так, как если бы других не было.* Справедливость этого закона непосредственно следует из волновой гипотезы о природе света, так как наблюдения показывают, что волны на поверхности воды проходят одна сквозь другую, не взаимодействуя между собой.

17. Закон прямолинейного распространения света. Отверстием в непрозрачном экране выделим узкий пучок света и направим его в задымленную область. Видим, что свет распространяется прямолинейно. Это и аналогичные ему наблюдения позволяют сформулировать закон прямолинейного распространения

света: *в однородной среде свет распространяется прямолинейно.*

Попытка объяснить этот закон в рамках волновой гипотезы о природе света наталкивается на трудности.

Действительно, если фронт световой волны, входящей в отверстие, плоский, то построение фронта волны для следующего момента времени в соответствии с принципом Гюйгенса дает картину, показанную на рис. 9.9. Из нее следует, что свет должен распространяться не только прямолинейно,

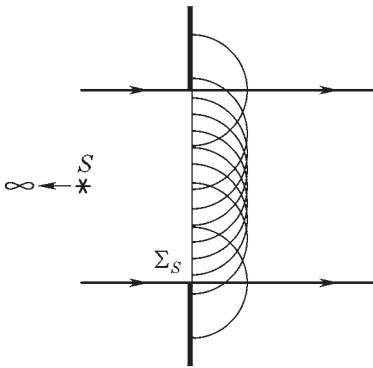


Рис. 9.9. К объяснению прямолинейного распространения света

но и заходя в область геометрической тени от экрана. На самом деле при сравнительно больших отверстиях этого не наблюдается, свет распространяется прямолинейно.

Таким образом, если свет действительно представляет собой волновой процесс, то принцип Гюйгенса нуждается в уточнениях.

Для самостоятельной проработки

1. *Агафонова Е.С.* Формирование обобщенных понятий волнового движения на основе учебного эксперимента: Дис. ... канд. пед. наук. — М.: НИИ СИМО, 1994. — 255 с.
2. *Академик Л.И. Мандельштам.* К 100-летию со дня рождения. — М.: Наука, 1979. — 312 с.
3. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики / Пер. с англ. С.Н. Бреуса, А.И. Головашкина, А.А. Шубина. — М.: Наука, 1970. — 855 с.
4. *Броунов П.И.* Атмосферная оптика. — М.: Гостехиздат, 1924.
5. *Брэгг У.* Мир света. Мир звука. — М.: Наука, 1967. — 335 с.
6. *Бутиков Е.И.* Оптика: Учеб. пособие для вузов / Под ред. *Н.И. Калитеевского.* — М.: Высшая школа, 1986. — 512 с.
7. *Василевский А.М., Кропоткин М.А., Тихонов В.В.* Оптическая электроника. — Л.: Энергоатомиздат, 1990. — 176 с.
8. *Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.* Теория волн. — М.: Наука, 1990. — 432 с.
9. *Вуд Р.* Физическая оптика. — М.-Л.: ОНТИ, 1936. — 896 с.
10. *Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Мансуров А.Н.* Оптика и атомная физика. — М.: Академия, 2000. — 408 с.
11. *Гинзбург В.Л., Левин Л.М., Сивухин Д.В., Четверикова Е.С., Яковлев И.А.* Сборник задач по общему курсу физики. Оптика. — М.: Наука, 2006. — 320 с.
12. *Годжаев Н.М.* Оптика. — М.: Высшая школа, 1977. — 432 с.
13. *Горелик Г.С.* Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. — М.: Физматгиз, 1959. — 572 с.
14. *Грабовский М.А.* Лекционные демонстрации по физике: Вып.7. Колебания и волны / Под ред. *А.Б. Млодзеевского.* — М.: Гостехиздат, 1952. — 232 с.
15. *Дитчберн Р.* Физическая оптика. — М.: Наука, 1965. — 631 с.
16. *Загуста Г.А, Макеева Г.П., Микулич А.С. и др.* Сборник задач по курсу общей физики. — М.: Просвещение, 1989. — 271 с.
17. *Зверева С.В.* В мире солнечного света. — Л.: Гидрометеоздат, 1988. — 160 с.
18. *Зелкин Е.Г., Петрова Р.А.* Линзовые антенны. — М.: Советское радио, 1974. — 280 с.
19. *Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д.* Элементы прикладной математики. — М.: Наука, 1965. — 616 с.
20. *Калитеевский Н.И.* Волновая оптика. — М.: Высшая школа, 1978. — 384 с.
21. *Королев Ф.А.* Теоретическая оптика. — М.: Высшая школа, 1966. — 556 с.
22. *Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.* Геометрическая оптика неоднородных сред. — М.: Наука, 1980. — 304 с.

23. *Красильников В. А.* Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. — М.: Физматгиз, 1960. — 560 с.
24. *Красюк Н. П., Дымович Н. Д.* Электродинамика и распространение радиоволн. — М.: Высшая школа, 1974. — 536 с.
25. *Крауфорд Ф.* Волны. — М.: Наука, 1976. — 528 с.
26. *Ландсберг Г. С.* Оптика. — М.: Физматлит, 2003. — 848 с.
27. *Майер В. В.* Простые опыты с ультразвуком. — М.: Наука, 1978. — 161 с.
28. *Майер Р. В.* Методика учебного фундаментального эксперимента по волновой физике: Дис. ... канд. пед. наук. — М.: НИИ СИМО, 1995. — 258 с.
29. *Мандельштам Л. И.* Полное собрание трудов. Т.1. — М.: Изд-во АН СССР, 1948. — 352 с.
30. *Мандельштам Л. И.* Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. — М.: Наука, 1972. — 437 с.
31. *Мандельштам Л. И.* Лекции по теории колебаний. — М.: Наука, 1972. — 470 с.
32. *Миннарт М.* Свет и цвет в природе. — М.: Наука, 1969. — 360 с.
33. *Мощанский В. Н.* Формирование мировоззрения учащихся при изучении физики. — М.: Просвещение, 1989. — 192 с.
34. *Мултановский В. В.* Формирование мышления учащихся при изучении физических теорий // Физика в школе. — 1976. — № 4. — С. 22–30.
35. *Мултановский В. В.* Физические взаимодействия и картина мира в школьном курсе. — М.: Просвещение, 1977. — 167 с.
36. *Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б.* Физика: Учеб. для 11 кл. общеобразоват. учреждений. — М.: Просвещение, 2004. — 336 с.
37. *Пекара А.* Новый облик оптики. — М.: Советское радио, 1973. — 264 с.
38. *Планк М.* Введение в теоретическую физику. Оптика. — М.–Л.: ОНТИ, 1934. — 164 с.
39. *Поль Р. В.* Оптика и атомная физика. — М.: Наука, 1966. — 552 с.
40. *Рэлей Дж. В.* Теория звука. В 2 т. Т.2. — М.: Гостехиздат, 1955. — 475 с.
41. *Савельев И. В.* Курс общей физики. В 3-х т. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. — М.: Наука, 1988. — 496 с.
42. *Савельев И. В.* Основы теоретической физики. В 2 т. Т.1. Механика и электродинамика. — М.: Наука, 1991. — 496 с.
43. *Сивухин Д. В.* Общий курс физики. В 5-ти т. Т.4. Оптика. — М.: Наука, 1985. — 752 с.
44. *Тарасов Л. В., Тарасова А. Н.* Беседы о преломлении света. — М.: Наука, 1982. — 176 с.
45. *Фарадей М.* Экспериментальные исследования по электричеству. Т.3. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 832 с.

46. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Т.3. Излучение. Волны. Кванты. — М.: Мир, 1967. — 237 с.
47. Физика: Учеб. для 11 класса школ и классов с углубленным изучением физики / *А.Т.Глазунов, О.Ф.Кабардин, А.Н.Малинин* и др. / Под ред. *А.А.Пинского*. — М.: Просвещение, 1999. — 432 с.
48. Физика океана / Под ред. *Ю.П.Доронина*. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 296 с.
49. Физический практикум. Электричество и оптика / Под ред. *В.И.Ивероной*. — М.: Наука, 1968. — 816 с.
50. Физическая энциклопедия. Т. 1. — М.: Сов. энциклопедия, 1988. — 704 с.
51. Физическая энциклопедия. Т. 3. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1992. — 672 с.
52. *Хвольсон О.Д.* Курс физики. В 5-и т. Т.2. Учение о звуке (акустика). Учение о лучистой энергии. — Берлин: Гос. изд-во РСФСР, 1925. — 775 с.
53. *Шахмаев Н.М., Шахмаев С.Н., Шодиев Д.Ш.* Физика: Учеб. для 11 кл. сред. шк. — М.: Просвещение, 1993. — 239 с.
54. *Шредингер Э.* Избранные труды по квантовой механике. — М.: Наука, 1976. — 424 с.
55. *Marchand E.W.* Gradient index optics. — N.Y., 1978.
56. *Moore D.* GRIN-4: gradeint index optica limaging systems // *Appl. Opt.* 1984. V. 23. P. 1699.
57. *Morton N.* Gradient refractive index lenses // *Phys. Educ.* 1984. V. 19, № 2. P. 86–90.

Заключение

Многочисленную армию читателей можно условно разбить на две категории: к первой мы относим тех, кто начинает книгу с начала, ко второй — тех, кто предпочитает знакомиться с ней с конца. Поэтому автор немного шукавил, разделив предисловие на две части и вторую поместив здесь.

Распределение содержания книги по параграфам достаточно произвольно и отражает личные вкусы автора. Существенно, однако, то, что такое распределение позволяет поставить перед вами задачу по систематизации экспериментальных результатов. Выполнив экспериментальные исследования, попробуйте привести их в систему, выявив по возможности все связи между ними. Почти наверняка в вашей системе окажутся и такие эксперименты, которым не нашлось места в этой книге; поставьте их, если они доступны. Это — последнее для первой и первое задание для второй категории читателей.

В книге имеется немало и других заданий для самостоятельной проработки. Некоторые из них предельно просты. Другие требуют определенных усилий для их выполнения. Третьи могут оказаться вообще не под силу некоторым из вас. Часть заданий представляет собой просто перечень литературных источников, причем для ознакомления рекомендуются как доступные, так и малодоступные издания. Все это нужно для того, чтобы у вас, читатель, сложилось верное представление о том, что уже сделано, и что еще предстоит впереди. В юности важно выработать правильную самооценку, а для этого нужно иметь перед глазами масштаб, позволяющий самому оценить себя. Грубый масштаб, который образуют учебные исследования и задания этой книги, все же лучше, чем полное его отсутствие.

Наконец, пожелание, в равной степени пригодное для той и другой категории читателей: от всей души автор желает вам успехов в работе и той же радости, какую она доставляла ему самому!