

ОБЩАЯ ФИЗИКА И МЕХАНИКА

СВЕТ В ОПТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

УЧЕБНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В.В. Мойер



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. Варакиной, которой принадлежит 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,

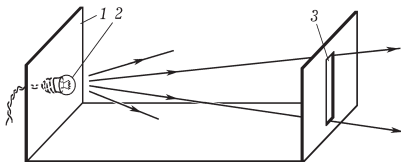


Рис. 1.2. Конструкция простейшего осветителя

например, щель 3. 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

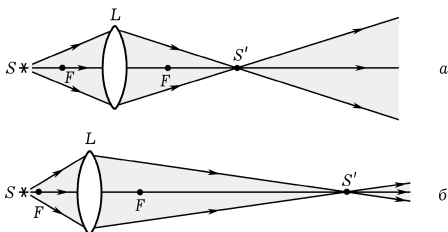


Рис. 1.3. Собирающая линза позволяет получить узкий пучок света

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

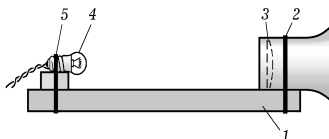


Рис. 1.4. Схема самодельного осветителя с собирающей линзой

(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 осве-

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 потребуются 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 резакром 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.

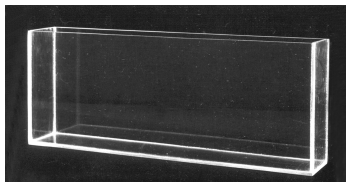


Рис. 1.5. Плоскопараллельная кювета из оргстекла

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 стык два куска стекла. После выполнения предварительных этапов работы из стекла вырезают боковые стенки и дно будущей кюветы. Если резы 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

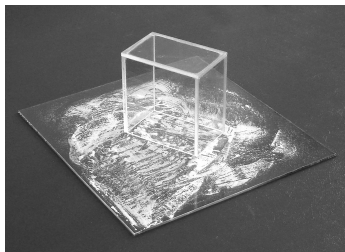


Рис. 1.6. Обработка краев кюветы на стекле абразивом, смоченным водой

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 посмотреть 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 $50 \times 120 \times 350$ 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, большим 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,

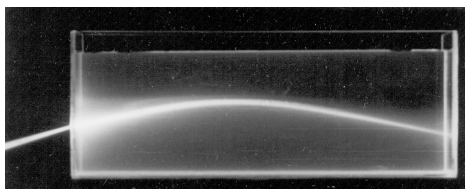


Рис. 1.7. Распространение света в оптически неоднородной среде: в кювете сверху находится вода, внизу — насыщенный раствор поваренной соли; падающий на кювету слева световой пучок был сделан видимым благодаря табачному дыму

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 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.

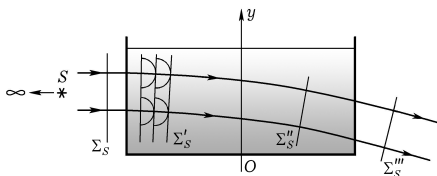


Рис. 1.8. К объяснению криволинейного распространения света в оптически неоднородной среде

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

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

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*.

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 поленились 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.

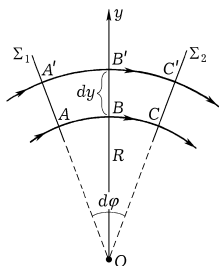


Рис. 1.9. К выводу формулы для радиуса кривизны светового пучка

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. Калашников 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 быстрого увеличения φ . Модуль же этого вектора равен изменению φ при перемещении на единицу длины в направлении быстрого 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 стеклянным 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,

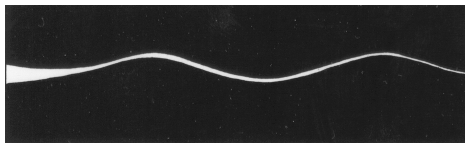


Рис. 1.10. Волнообразный ход светового пучка: рисунок сделан по фотографии Р. Вуда

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.

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.

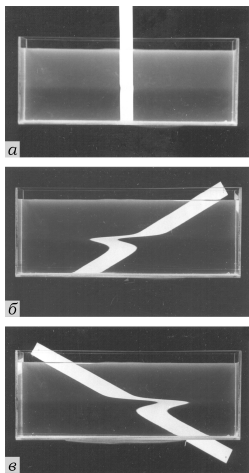


Рис. 1.11. Так искривляется прямая бумажная полоска, если наблюдать ее через оптически неоднородную среду

● 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-