

535.39

## ПРОХОЖДЕНИЕ СВЕТОВЫХ ВОЛН ЗА ПОЛНОСТЬЮ ОТРАЖАЮЩУЮ ПОВЕРХНОСТЬ \*)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Когда электромагнитная волна испытывает полное внутреннее отражение на поверхности, где показатель преломления меняется от величины  $n_1$  до значения  $n_2$ , амплитуда проходящей волны не падает резко до нуля. Решения уравнения Максвелла

\*) W. J. McDonald, S. N. Udey, P. Hickson, The Penetration of Light Waves beyond a Totally Reflecting Surface. Amer. J. Phys. 39, 74 (1971). Перевод И. М. Дрёмина.

Под полностью отражающей поверхностью понимается граница раздела двух сред, на которой по законам геометрической оптики происходит полное внутреннее отражение света. (Прим. перев.)

вблизи такой поверхности приведены во многих учебниках<sup>1\*</sup>). Например, в книге<sup>1</sup> показано, что зависимость амплитуды прошедшей волны от координаты  $x$  дается формулой

$$E_{\text{прох}} = E_0 \exp(-k_I x), \quad (1)$$

где

$$k_I^2 = (\omega^2/c^2)(n^2 \sin^2 \theta - 1). \quad (2)$$

В этих формулах  $E_0$  — амплитуда волны на границе двух сред,  $x$  — расстояние по нормали от этой границы до некоторой точки в среде 2,  $\omega$  — угловая частота волны,  $c$  — скорость света,  $n = n_1/n_2$  и  $\theta$  — угол падения.

Условие полного внутреннего отражения записывается в виде

$$n \sin \theta > 1, \quad (3)$$

откуда видно, что  $k_I$  является положительным или отрицательным вещественным числом, а амплитуда волны уменьшается или возрастает с расстоянием  $x$ . Физически приемлемым решением, конечно, является экспоненциально убывающее ( $k_I$  положительна).

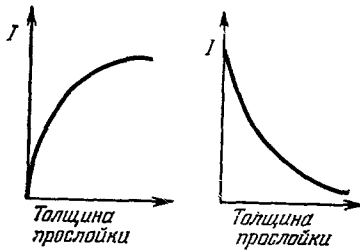
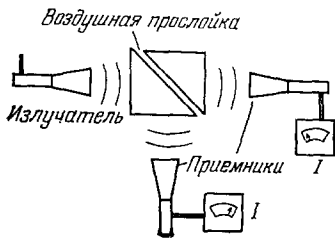


Рис. 1. Прохождение электромагнитного излучения за границу раздела двух сред в условиях полного внутреннего отражения по законам геометрической оптики.

Заметим, что величина  $E_{\text{прох}}$  уменьшается при возрастании  $x$  обычно весьма резко. Например, при  $n = 1,5$  и  $\theta = 45^\circ$  уравнения (1) и (2) приводят к решению для  $E_{\text{прох}}$ , которое спадает примерно в 10 раз на расстоянии, равном одной длине волны. Интенсивность волны пропорциональна квадрату модуля амплитуды и, следовательно, падает приблизительно в 100 раз на этом расстоянии. Это явление часто изучалось с использованием микроволновой техники и установки, изображенной на рис. 1. По мере того как щель между призмами увеличивается, интенсивность прошедшей волны падает экспоненциально от 100%-ной начальной интенсивности (без щели) до нуля, тогда как отраженный поток соответственно возрастает от нуля до максимального значения, отвечающего полному отражению. Очевидно, преимущество микроволновой техники состоит в том, что большая длина волны (порядка сантиметров) позволяет легко проводить измерения в обычной лаборатории. Однако с педагогической точки зрения этот эксперимент лучше проводить со светом, чтобы все эффекты можно было действительно «увидеть». Холл<sup>2</sup> поставил аналогичный микроволновому эксперимент на оптических частотах еще в 1902 г. Он использовал две стеклянные призмы, одна из которых имела выпуклую грань, что позволяло получить необходимые для опыта вариации толщины воздушного слоя, начиная от участка плотного соприкосновения граней призм. Цель этой статьи состоит в том, чтобы показать, что оптический эксперимент может быть сравнительно легко проведен с использованием лазера и довольно простой аппаратуры, обычно имеющейся в студенческих лабораториях. Этот метод позволяет ставить простые и эффективные демонстрации во время лекций и, кроме того, может быть применен при лабораторных занятиях студентов для получения точных количественных результатов.

## 2. МЕТОД

Прибор, использованный нами, показан на рис. 2. Плоско-выпуклая линза, взятая из легко доступной аппаратуры для изучения ньютоновских колец<sup>3</sup>, была приведена в оптический контакт с призмой 45—45—90° (призма 2 на рис. 2) с помощью силиконовой смазки. Другая призма 45—45—90° (призма 1) легким давлением прижималась к линзе, так что при этом образовывалась воздушная щель, изменявшаяся постепенно от нуля до многих длин волн. Важно, чтобы давление было невелико, так чтобы поверхности стекол не деформировались. Толщина зазора на различных расстояниях от точки контакта может быть измерена при помощи интерференционной

\* ) Задача о распространении света сквозь границу раздела двух сред в условиях его полного внутреннего отражения по законам геометрической оптики была впервые решена А. А. Эйхенвальдом (ЖРФХО 41, 131 (1909)). (Прим. ред.)

картины колец Ньютона. Для этого можно использовать обычный белый свет. Однако, если надо провести точные измерения, более пригоден монохроматический источник света, например натриевая лампа.

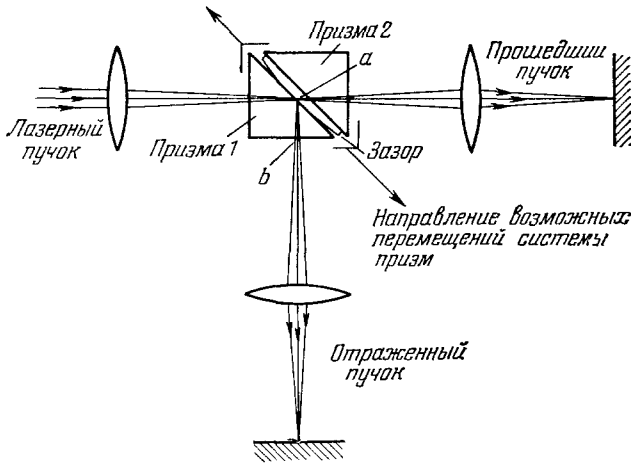


Рис. 2. Установка для оптического эксперимента.

Для демонстрации чисто качественного эффекта удобно поставить два экрана для прошедшего и отраженного лучей. Все устройство с призмами слегка сдвигается параллельно направлению зазора, так что картина из колец Ньютона сканируется лучом лазера. Легко наблюдать постепенное затухание отраженного луча и соответствующее возрастание интенсивности прошедшего луча по мере сканирования интерференционной картины. Размер пятна от луча лазера может оказаться большим по сравнению с шириной интерференционных полос. В этом случае целесообразно поставить фокусирующие линзы (как показано на рис. 2), для того чтобы уменьшить поперечные размеры пучка в этой области.

Количественные измерения можно проводить, заменив экраны приемниками оптического излучения. Например, результаты, приведенные на рис. 3, мы получили, используя обычные фоточувствительные полупроводниковые диоды<sup>5</sup>. Для уменьшения интенсивности прошедшего пучка до уровня, при котором исключалось насыщение измерительного устройства, был использован фильтр. Величина воздушного зазора приведена на рис. 3 в единицах длины волны  $D$ -линии натрия, так как для получения колец Ньютона была использована натриевая лампа. Экспоненциальная зависимость интенсивности прошедшего света от толщины воздушного зазора очевидна из рис. 3. С целью проверки нашего результата был вычислен теоретически наклон кривой интенсивности прошедшего света (уравнения (1) и (2)). Результат приведен на рис. 3 в виде сплошной линии. Отметим, что предсказываемый наклон очень чувствителен к показателю преломления призмы  $I$  и к углу падения на поверхность между призмой и целью. Угол был точно равен  $45^\circ$ . Это достигалось путем использования отраженного луча, который распространялся назад в сторону лазера после трех отражений в первой призме (в точках  $a$ ,  $b$  и снова в  $a$  (см. рис. 3)). Показатель преломления призмы был измерен с помощью лазера, применяя метод минимального отклонения, описываемый в обычных учебниках по геометрической оптике (см. например, книгу<sup>6</sup>).

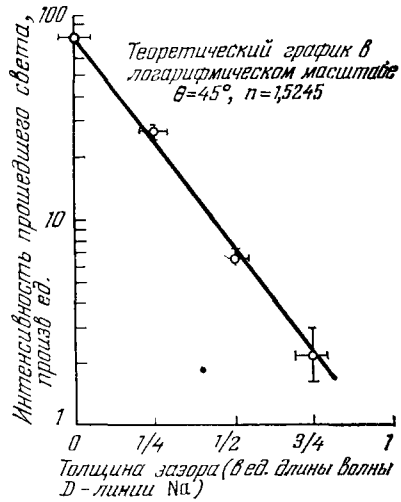


Рис. 3. Интенсивность прошедшего света как функция толщины воздушного зазора между двумя стеклянными поверхностями.

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Незначительная величина ошибок в измерении значений интенсивности прошедшего света, приведенных на рис. 2, подтверждает воспроизводимость полученных результатов. При желании можно было бы добиться большей точности, проведя измерения в большем интервале значений толщин воздушного зазора. Однако это потребовало бы использования нескольких калиброванных фильтров, для того чтобы работать во всех областях величин интенсивности прошедшего света. С педагогической точки зрения представляется желательным свести все такие усложнения к минимуму.

Следует отметить, что чувствительность  $k_I$  к  $n$  (уравнение (2)) может быть сделана произвольно большой, если задать угол  $\theta$  очень близким к критическому углу полного внутреннего отражения. Отсюда следует, что предлагаемый метод может быть использован как очень чувствительный способ измерения показателя преломления. Итак, мы видим, что прохождение света за полностью отражающую (по законам геометрической оптики) поверхность можно наблюдать с помощью довольно простой аппаратуры. Эта методика полезна как для лекционных демонстраций, так и для количественных лабораторных измерений. При свободном выборе темы работы в лаборатории студенты могут изучить влияние изменения угла падения света или же толщины воздушного зазора на получаемые результаты и сравнить экспериментальные данные с теорией. Мы также отметим, что студенты могут получить дополнительные сведения, если в лаборатории есть как микроволновая, так и оптическая аппаратура, поскольку они смогут наблюдать один и тот же эффект при совершенно различных длинах волн используемого в опытах излучения.

*У. Мак-Дональд, С. Удей, П. Хиксон*

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, The Feynman Lectures on Physics, Vol. 2, Sec. 33—6, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1964 (см. перевод: Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс, Фейнмановские лекции по физике, М., «Мир», 1966, т. 7, гл. 33, § 6).
2. E. E. Hall, Phys. Rev. 15, 73 (1902).
3. Cenco Scientific Company, 2600 S. Konster Ave., Chicago, Ill.
4. Dow Corning. 20-057 Optical Coupling Compound, Dow Corning, Midland, Mich.
5. Texas Instruments LS400 Silicon Planar Photo Device. Texas Instruments, Box 5012, Dallas, 22, Tex.
6. F. A. Jenkins, H. E. White, Fundamentals of Optics, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1957, p. 21.
- 7\*. А. А. Эйнвальд, Теоретическая физика, ч. VI, М.—Л., ГНТИ, 1931\*).
- 8\*. М. Борн, Э. Вольф, Основы оптики, М., «Наука», 1970.

\*) Литература, отмеченная звездочкой, добавлена при переводе.