



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.А.Степанова

ФИЗИКА

ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Учебно-методическое пособие

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Национальный исследовательский технологический университет

МИСиС

Кафедра Физики

В.А. СТЕПАНОВА

ФИЗИКА

ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

Учебно-методическое пособие для выполнения расчетно-графических работ

Под редакцией профессора Д.Е. Капуткина

Рекомендовано редакционно-издательским советом университета

Москва Издательский дом МИСиС 2012

УДК 535

С79

Р е ц е н з е н т

кандидат физ. - мат. наук Осипов Ю.В.

В.А.Степанова. Физика. Волновая и квантовая оптика.: Учебно-методическое пособие для выполнения расчетно-графических работ.: Под ред. Д.Е. Капуткина– М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – с.

Пособие содержит теоретический материал и руководство к выполнению четырех расчетно-графических работ, моделирующих фундаментальные эксперименты по курсу "Физика" раздел "Оптика" по темам: геометрическая оптика, интерференция света, дифракция света и внешний фотоэффект. В каждой работе дана методика виртуального эксперимента, содержащая теоретическое введение и описание компьютерной модели, обработка результатов и вопросы для самоконтроля. Содержание работ соответствует учебной программе курса «Физика».

Программное обеспечение для расчетно-графических работ разработано фирмой "ФИЗИКОН" под руководством проф. С.М.Козеля.

Предназначено для студентов бакалавриата.

© В.А.Степанова, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....
Введение
Расчетно-графическая работа № 2- 1. Моделирование оптических приборов.....
Расчетно-графическая работа № 2- 2. Кольца Ньютона.....
Расчетно-графическая работа № 2- 3. Дифракционная решетка.....
Расчетно-графическая работа № 2- 4. Внешний фотоэффект

ПРЕДИСЛОВИЕ

Преподавание курса общей физики в техническом вузе, наряду с усвоением фундаментальных знаний и законов, подкрепленных решением задач, ставит также цель привить студентам навыки и умение моделировать физические процессы и явления. Не заменяя традиционные формы обучения, применение компьютерных моделей в процессе освоения курса "Физика", дает новые технологии для процесса обучения. Компьютерные модели являются наглядным представлением экспериментов, достоверно отражают физические законы, а диапазон регулируемых параметров позволяет получать достаточное количество исследуемых состояний.

В настоящее пособие вошли описания семи расчетно-графических работ с использованием компьютерных моделей (разработанных фирмой "ФИЗИКОН"), выполняемых студентами 2-ого курса НИТУ "МИСиС" в соответствии с учебным планом по курсу "Физика" по разделу "Оптика".

Описание каждой работы включает в себя разделы: 1.Цель работы. 2.Методика виртуального эксперимента (с краткой теорией и описанием компьютерных моделей). 3.Порядок выполнения работы. 4.Обработка результатов измерений. 5.Контрольные вопросы для самопроверки. 6.Список литературы.

ВВЕДЕНИЕ

Для подготовки и выполнения расчетно-графических работ, в которых используются компьютерные модели, разработанные фирмой «ФИЗИКОН», необходимо на рабочем столе компьютера дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, когда её маркер расположен на ярлыке «зелёное дерево» с надписью **ФИЗИКА**. В открывшемся окне находятся папки с описанием расчетно-графических работ и сборник компьютерных моделей **«ОТКРЫТАЯ ФИЗИКА 1.1»**.

Открытие папки **«ФИЗИКА. ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА»**, в которой есть описание расчетно-графических работ, позволяет подготовиться к лабораторным работам.

Для выполнения расчетно-графической работы необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши, когда её маркер расположен над эмблемой сборника компьютерных моделей «Открытая физика 1.1.» на рабочем столе. После этого на экране появится начальная картинка этого сборника, окно которой изображено на рис. В1.

Далее необходимо выбрать раздел, указанный в расчетно-графической работе; для этого дважды щелкнете левой кнопкой мыши, установив её маркер над названием раздела, в котором расположена данная модель. В разделе «Электричество и магнетизм» вы увидите картинку, изображенную на рис. В2.

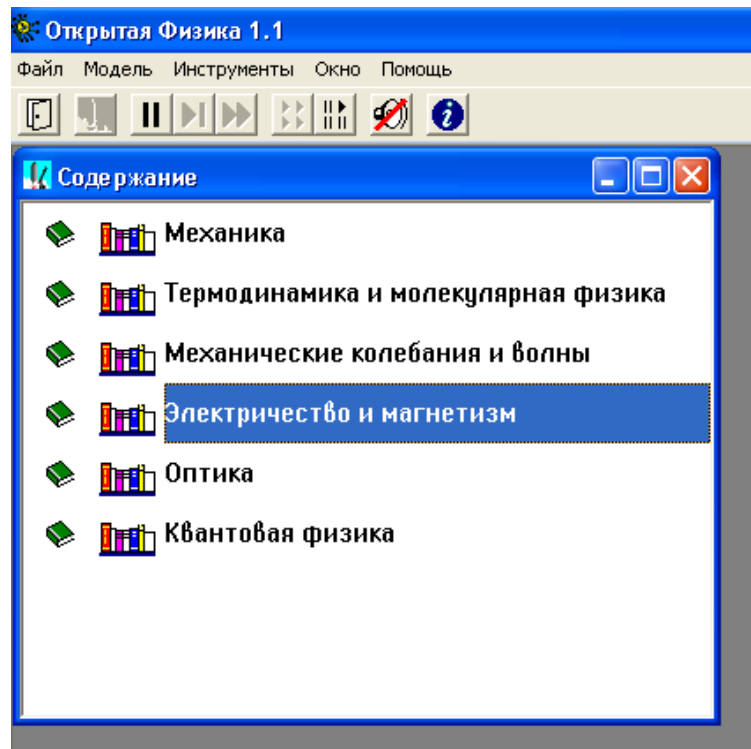


Рис. В1. Содержание "Сборника компьютерных моделей «Открытая физика 1.1.»".

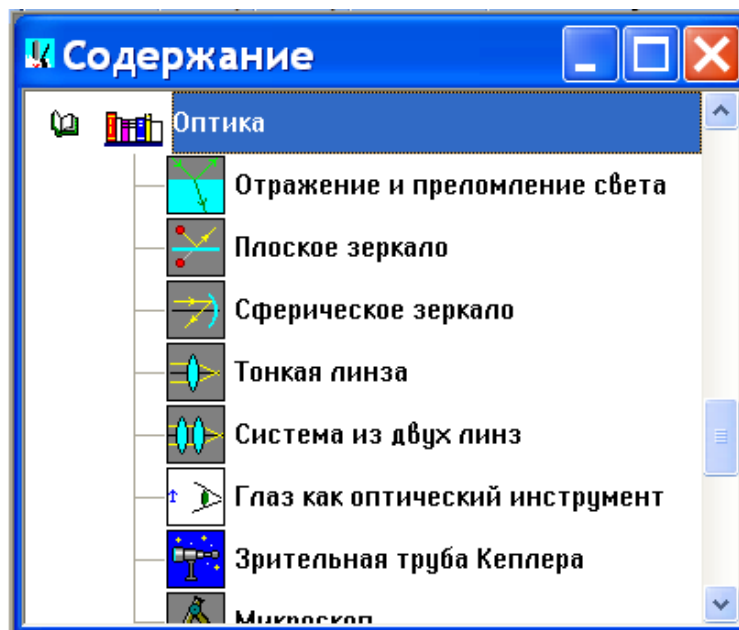


Рис.В2. Диалоговое окно раздела "Оптика" в "Сборнике компьютерных моделей «Открытая физика 1.1.»".

Чтобы увидеть дальнейшие пункты содержания данного раздела, надо щелкнуть левой кнопкой мыши, установив ее маркер на кнопку со стрелкой вниз, расположенную в правом нижнем углу внутреннего окна.

Прочитав надписи во внутреннем окне, установите маркер мыши над надписью требуемой компьютерной модели и дважды коротко нажмите

левую кнопку мыши. Например, для компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в разделе "Электричество и магнетизм" окно будет выглядеть так (рис. В3):

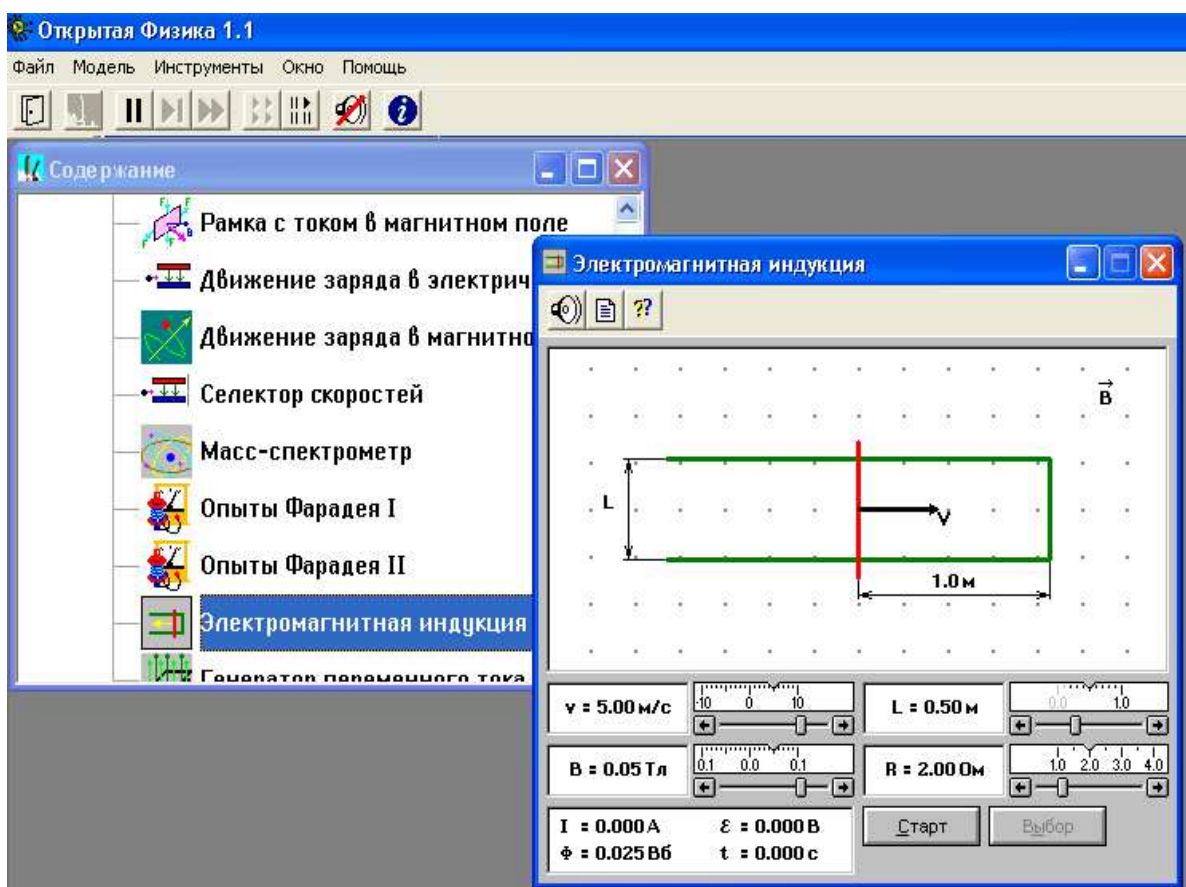


Рис.В3. Диалоговое окно компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в разделе "Электричество и магнетизм".

Кнопки вверх картинки (под параметрами панели инструментов) являются служебными. Предназначение каждой кнопки проявляется, когда маркер мыши располагается над ней в течение 1-2 секунд (без нажатия кнопок мыши). Очень важными являются следующие кнопки: кнопка с двумя вертикальными чертами «||», которая служит для остановки эксперимента, и рядом расположенные кнопки – для шага «▶|» и для продолжения «▶▶» работы.

В появившемся внутреннем окне компьютерной модели (рис. В4) сверху также расположены служебные кнопки. Кнопка с изображением страницы служит для вызова кратких теоретических сведений из соответствующего раздела курса «Общая физика», которому соответствует компьютерная модель. Перемещать окна можно, зацепив мышью заголовок окна (имеющий синий фон).

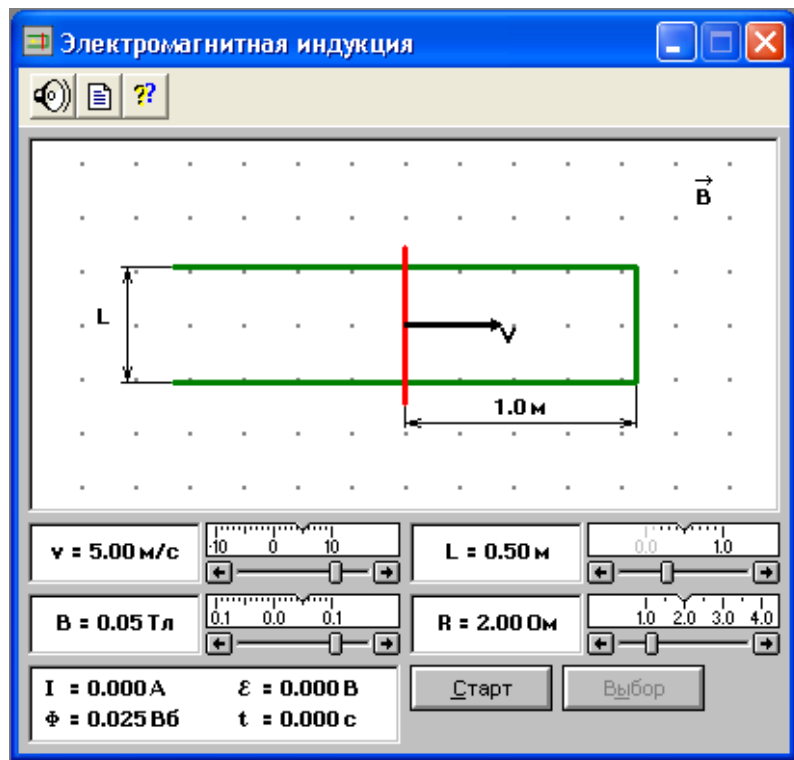


Рис.В4. Окно компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в режиме "Выбор".

Перед выполнением расчетно-графической работы внимательно рассмотрите окно модели, найдите все регуляторы и другие элементы, которые позволяют изменять задаваемые параметры величин для виртуального эксперимента.

Например, компьютерная модель «Электромагнитная индукция» (рис.В4) позволяет устанавливать величину длины перемычки L и её сопротивление R , величину и направление скорости движения перемычки V и индукции магнитного поля B , в котором расположен замкнутый контур. В модели есть две кнопки - "Старт" и "Выбор". При нажатой кнопке "Выбор" задают параметры величин для виртуального эксперимента и при этом в левом нижнем углу окна модели (рис. В4) регистрируется величина магнитного потока Φ , пронизывающего замкнутый контур. Нажатие кнопки "Старт" запускает виртуальный эксперимент, в процессе которого в левом нижнем углу окна модели появляются значения тока I , ЭДС и времени t . По окончании эксперимента магнитный поток равен нулю (рис. В5).

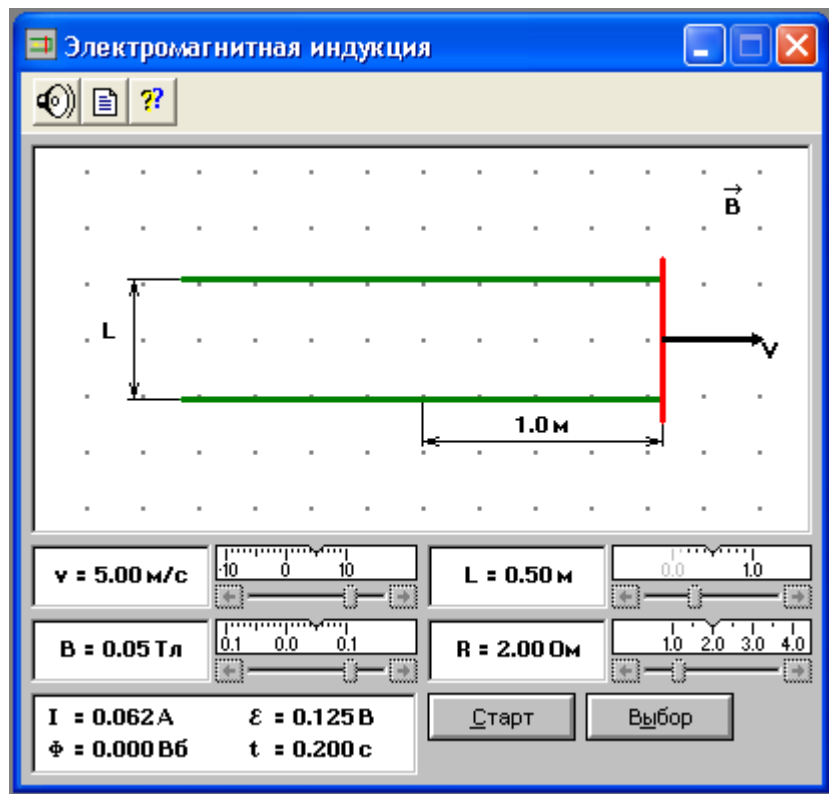


Рис.В5. Окно компьютерной модели «Электромагнитная индукция» в режиме "Старт".

После выполнения расчетно-графической работы необходимо поочередно (начиная с компьютерной модели) закрыть все окна на рабочем столе. Для закрытия окна надо нажать мышью кнопку с крестом в верхнем правом углу данного окна.

Основы теории обработки результатов измерений физических величин

Результаты любых измерений, в том числе физических, как бы тщательно они не выполнялись, подвержены определенным погрешностям. Поэтому при проведении измерений встает задача не только получить значение измеряемой величины, но и оценить погрешность ее определения, а также, в случае необходимости, видеть пути уменьшения этой погрешности.

В данном разделе излагаются основные представления теории погрешностей (ошибок) измерений, знание которых необходимо для грамотного проведения любого эксперимента, в частности, виртуального. Более подробно теория ошибок изложена в литературе, список которой приведен в каждой расчетно-графической работе.

Физика – наука экспериментальная. Физические законы и закономерности рассматриваемых явлений устанавливаются и проверяются опытным путем. Целью физического эксперимента является: 1) определение тех или иных констант - фундаментальных (например, скорости света, заряда электрона, постоянной Планка и т. п.) и материальных (например, плотности вещества, удельного сопротивления, теплоемкости и т. п.) и 2) установление физических зависимостей (например, зависимостей от температуры линейных размеров тела, удельного сопротивления, теплоемкости и т. п.; давления газа от им занимаемого объема, силы тока в проводнике от падения напряжения на нем и т. д.).

Результатом физического эксперимента является, как правило, измерение какой-либо физической величины. *Измерить данную физическую величину означает сравнить ее с величиной того же рода, принятой за единицу, и установить их отношение.*

Процесс измерения осуществляется с помощью того или иного измерительного прибора, у которого величина, принятая за единицу (сантиметр, миллиметр или его доля; грамм, миллиграмм или его доля; ампер или миллиампер и т. д.) устанавливается и проверяется путем сравнения с эталонным прибором.

Прямые и косвенные измерения. В случае прямых измерений значение измеряемой величины непосредственно отсчитывается по шкале прибора (измерение линейных размеров тела микрометром или штангенциркулем; взвешиванием тел на весах и т. п.).

В большинстве случаев производят косвенные измерения, когда измеряемая величина определяется аналитической формулой, в которую входят величины, измеряемые путем прямых измерений. В формулу могут также входить табличные значения, а также точные числа (натуральные, рациональные и иррациональные числа; величины, известные с очень высокой степенью точности, например, число π).

Так, косвенное измерение сопротивления проволоки можно произвести в соответствии с формулой $R = \rho \frac{l}{\pi \frac{D^2}{4}}$ путем прямых измерений ее длины l и

диаметра D , используя табличное значение удельного сопротивления ρ материала проволоки. Числа π и 4 в формуле являются точными.

Систематические и случайные погрешности измерений. При измерении любой физической величины всегда определяется, как отмечалось, лишь приближенное ее значение, что обусловлено неизбежными для любого эксперимента ошибками.

Погрешности, возникающие при измерениях, делятся на *систематические, случайные и грубые (промахи)*. Поясним различия между ними на примерах. Так, производя взвешивание, принято взвешиваемое тело помещать на левую чашку весов, а разновес – на правую. Поскольку плечи весов невозможно сделать в точности одинаковыми, то разница в длине плеч искажает результаты измерений, завышая или занижая измеряемый вес, причем всегда одинаковым образом. Другой пример – измерение длины тела в условиях, пусть незначительно, но непрерывно изменяющейся (возрастающей или уменьшающейся) температуры, не учитываемых экспериментатором. Погрешности в этих измерениях по указанным причинам относятся к числу систематических.

Систематическими погрешностями называются такие погрешности, которые сохраняют величину и знак от опыта к опыту, или изменяются по определенному закону.

Однако указанные погрешности при взвешивании или измерении длины тела не являются единственными. Качания коромысла весов происходят с трением. Поэтому не только сама измеряемая величина, но и ошибки ее измерения оказываются несколько различными как по величине, так и по знаку. В случае измерения длины тела случайные перекосы тела или разная сила нажима на измерительный инструмент (микрометр или штангенциркуль) также приводят к немного различающимся результатам. Рассматриваемые погрешности относятся к числу случайных.

Случайные погрешности – это погрешности, величина и знак которых изменяются случайным, непредсказуемым образом от одного измерения к другому, выполняемых одинаковым образом и в одинаковых условиях.

Третий вид погрешностей – *грубые погрешности или промахи*. Их источником является недостаточное внимание выполняющего измерения: неверная запись показаний прибора, неправильное определение цены деления прибора, грубое нарушение методики измерений.

Таким образом, при проведении физических измерений важно не только получить усредненное значение измеряемой величины, но и оценить погрешность ее определения. Измерения должны проводиться таким образом, чтобы погрешности измерений соответствовали поставленной задаче.

Предположим, что нужно измерить ускорение свободного падения g на широте Москвы с относительной точностью 5%. Пусть в ряде измерений каким-либо методом получено усредненное значение $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. Ответить на вопрос, хорошо ли (точно ли) проведены измерения, хотя это значение совпадает с табличным, нельзя, пока не будет оценена погрешность этих измерений. Если абсолютная ошибка этих измерений оказалась равной $\Delta g = 3 \text{ м/с}^2$, то это означает, что измеряемая величина g находится где-то в интервале $6,8 \leq g \leq 12,8 \text{ м/с}^2$, что соответствует относительной погрешности $\frac{\Delta g}{g} 100\% = 30\%$. Такое измерение, очевидно, признать хорошим (точным, в соответствии с поставленной задачей) нельзя. Если же абсолютная ошибка будет равна $\Delta g = 0,3 \text{ м/с}^2$, то есть величина g находится в интервале от 9,5 до 10,1 м/с^2 и $\frac{\Delta g}{g} 100\% = 3\%$, то следует сделать вывод, что измерения соответствуют поставленной выше задаче.

Не следует требовать от измерений большей точности, чем это необходимо для решения поставленной задачи, так как это ведет, как правило, к неоправданному значительному усложнению эксперимента.

Так, например, при изготовлении доски для книжной полки не требуется точность выше, чем $(0,5 \div 1) \text{ см}$, что составляет примерно 1% от длины доски; при изготовлении деталей шарикоподшипников не нужна точность больше, чем 0,001 мм, так как это уже примерно 0,01% от размера детали; при определении положения спектральной линии в ходе

спектрального анализа на легирующую добавку конструкционной стали необходимая точность значительно выше 10^{-11} см, что составляет уже около 10^{-5} % от длины волны этой линии, но и большая точность тоже не нужна.

Итак, точность измерений должна соответствовать поставленной задаче. Вместе с тем, следует иметь в виду, что в определенных случаях (например, при научных исследованиях) неоправданное, на первый взгляд, повышение точности измерений может привести к обнаружению нового факта или явления. Так, повышение точности измерения плотности воды, величина которой, казалось бы, была хорошо известна, привело в 1932 г. к открытию дейтерия – тяжелого изотопа водорода, ничтожное содержание которого в обычной воде немного увеличивало ее плотность.

Вычисление погрешностей прямых измерений

В случае прямых измерений значение измеряемой величины a непосредственно отсчитывается по шкале прибора (взвешивание тела на весах; измерение размеров тела микрометром, штангенциркулем или линейкой и т.п.). Обработку результатов прямых измерений можно проводить в следующем порядке:

1) Результаты каждого из n прямых измерений величины a записывают в таблицу экспериментальных данных.

2) Вычисляют среднее арифметическое \bar{a} из n измерений:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (B1)$$

3) Находят ошибки отдельных измерений

$$\Delta a_i = \bar{a} - a_i \quad (B2)$$

и вычисляют их квадраты.

4) Вычисляют среднеквадратичную погрешность прямого измерения величины:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_i^2}{n(n-1)}}. \quad (B3)$$

5) Определяют приборную погрешность измерительного прибора, которая принимается равной половине минимальной цены деления шкалы прибора

$$(\Delta a)_{\text{приб}} = 0,5C_{\text{min}}, \quad (\text{B4})$$

где C_{min} – значение одного деления. В случае, если используется электроизмерительный прибор, то его погрешность вычисляется по классу точности и предельному значению шкалы прибора $A_{\text{пр}}$.

$$(\Delta a)_{\text{приб}} = \frac{\text{класс точности}}{100} A_{\text{пр}}. \quad (\text{B5})$$

6) Результирующую (абсолютную) погрешность прямого измерения величины a с учетом погрешности прибора находят по формуле:

$$\Delta a = \sigma_a + (\Delta a)_{\text{приб}}. \quad (\text{B6})$$

Примечание: если определяемая величина измеряется только один раз, то абсолютная погрешность прямого измерения принимается равной приборной погрешности.

7) Результат расчета измерений величины a записывают в виде:

$$a = \bar{a} \pm \Delta a; \text{ единица измерений} \quad (\text{B7})$$

8) Для характеристики точности измерений находят относительную погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta a}{\bar{a}} 100\% \quad (\text{B8})$$

Вычисление погрешностей косвенных измерений

В большинстве случаев, производят косвенные измерения, когда измеряемая величина Z определяется аналитически по формуле:

$$Z = f(a, b, c, \dots), \quad (\text{B9})$$

в которую входят величины (a, b, c, \dots) , определяемые путем прямых измерений. В формулу могут также входить табличные значения и точные числа (натуральные, рациональные и иррациональные), величины, известные с очень высокой степенью точности, например, число π .

Обработку результатов косвенных измерений проводят в следующем порядке:

- 1) Результаты прямых измерений величин a, b, c, \dots записывают в таблицу экспериментальных данных.
- 2) Вычисляют средние арифметические значения этих величин

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i,$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i,$$

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, \dots \quad (\text{B10})$$

3) Находят наиболее вероятное значение искомой величины Z , подставляя в формулу (B9) значения из расчетов (B10)

$$\bar{Z} = f(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots). \quad (\text{B11})$$

4) Вычисляют абсолютные ошибки прямых измерений каждой из величин a, b, c, \dots (см. (B1) – (B6))

$$\Delta a, \Delta b, \Delta c, \dots \quad (\text{B12})$$

5) Находят частные производные искомой величины Z при средних значениях $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots$

$$Z'_a = \left. \frac{df}{da} \right|_{\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots}$$

$$Z'_b = \left. \frac{df}{db} \right|_{\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots}$$

$$Z'_c = \left. \frac{df}{dc} \right|_{\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots} \quad (\text{B13})$$

6) Вычисляют абсолютную погрешность косвенного измерения величины Z по формуле

$$\Delta Z = Z'_a \cdot \Delta a + Z'_b \cdot \Delta b + Z'_c \cdot \Delta c + \dots \quad (\text{B14})$$

Результат расчета измерений величины Z записывают в виде

$$Z = \bar{Z} \pm \Delta Z; \text{ единица измерений} \quad (\text{B15})$$

7) Для характеристики точности измерений находят относительную погрешность

$$\delta = \frac{\Delta Z}{\bar{Z}} 100\%. \quad (\text{B16})$$

Графический метод обработки результатов измерений

При обработке результатов эксперимента используют метод определения постоянной величины из графика линейной функции $y = f(x)$

(рис. В6) в случае, если постоянная величина k является коэффициентом пропорциональности, т.е. когда

$$y = kx \quad (\text{В17})$$

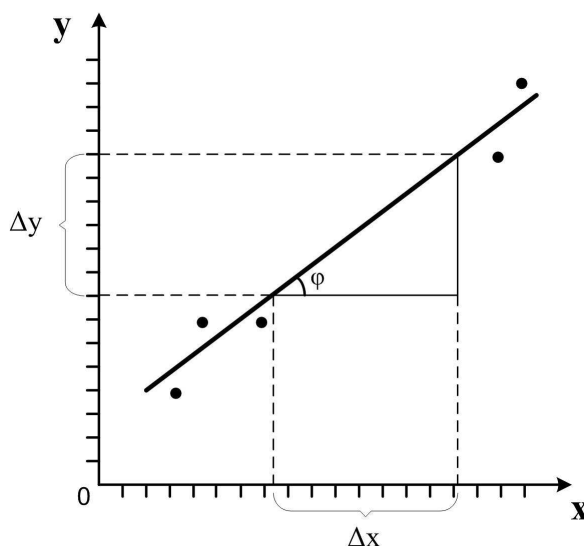


Рис. В6. График линейной функции $y = f(x)$.

Используя экспериментальные данные, отмечают их точками (при однократных измерениях, или отмечают область возможных значений при многократных измерениях) в системе координат YOX и проводят прямую с некоторой достоверностью, если точки не лежат точно по прямой, или прямо по экспериментальным точкам, если они укладываются в прямую. Далее *отмечают в средней части этой прямой область*, граничные точки которой дают в проекции на оси абсцисс и ординат численные значения интервалов Δx и Δy , по которым вычисляют постоянную величину k по формуле

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (\text{В18})$$

где $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ — это *отношение приращения функции к соответствующему приращению аргумента*.

Иногда в литературе такой метод определения постоянной величины k излагают как *метод определения постоянной величины по тангенсу угла наклона линейной функции к оси абсцисс*. Действительно, из рис. В6 видно, что отношение $\frac{\Delta y}{\Delta x}$ — это отношение противолежащего катета угла φ к прилежащему катету этого угла, что является тангенсом угла φ , т.е.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (\text{B19})$$

При такой методике определения постоянной величины угол φ также необходимо отмечать в средней части прямой линии.

Для примера рассмотрим расчетно-графическую работу № 2–4, в которой по экспериментальным данным строят график зависимости модуля напряжения запирающего ($U_{\text{зап}}$) от обратной величины длины волны ($1/\lambda$), т.е. $(U_{\text{зап}}) = f(1/\lambda)$. Из графика определяют численное значение постоянной

Планка h , используя формулу $h = \frac{e}{c} \cdot \frac{\Delta(U_{\text{зап}})}{\Delta(\frac{1}{\lambda})}$, в которой e – заряд электрона, c

– скорость света в вакууме, $\frac{\Delta(U_{\text{зап}})}{\Delta(\frac{1}{\lambda})}$ – отношение приращения модуля

напряжения запирающего к приращению обратной величины длины волны.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Компьютерные модели «Зрительная труба Кеплера» и «Микроскоп» в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика» раздел «Оптика»

Цель работы

Компьютерное моделирование оптических приборов зрительной трубы Кеплера и микроскопа; подтверждение законов геометрической оптики.

Методика виртуального эксперимента

В данной работе используются компьютерные модели, основанные на фундаментальных законах геометрической оптики и принципах получения оптических изображений.

Геометрические принципы получения оптических изображений основываются только на законах отражения и преломления света, полностью отвлекаясь от его физической природы. Прямолинейное распространение света реализуется в обычно наблюдаемой ситуации, когда длина световой волны мала по сравнению с размерами какого-либо рассматриваемого участка волнового фронта и световые лучи распространяются в однородных прозрачных средах. При этих условиях волновой характер света практически не проявляется, и можно рассматривать только лучи света.

Световым лучом называют линию, вдоль которой распространяется энергия, переносимая световой волной. При этом оптическую длину светового луча следует считать положительной, когда он проходит в направлении распространения света, и отрицательной в противоположном случае.

В оптических системах «Зрительная труба Кеплера» и «Микроскоп» применяют линзы. *Линзой* называют прозрачное тело, ограниченное сферическими поверхностями, радиус, по крайней мере, одной из которых не

С помощью линзы можно получить увеличенное или уменьшенное изображение предмета. *Линейное увеличение линзы* (β) – это величина, равная отношению линейного размера изображения Y' к линейному размеру предмета Y (см. рис.1.1):

$$\beta = \frac{Y'}{Y} \quad (1.2)$$

В геометрии в подобных треугольниках против равных углов лежат пропорциональные стороны; поэтому из рис.1.1 следует, что $\frac{b}{a} = \frac{Y'}{Y}$ и тогда линейное увеличение

$$\beta = \frac{b}{a}, \quad (1.3)$$

где a – расстояние от предмета до линзы; b – расстояние от линзы до изображения.

1. Зрительная труба Кеплера представляет собой оптическую систему, предназначенную для наблюдения удалённых предметов. Если лучи от предмета приходят в трубу в виде параллельных пучков, то оптическая система трубы называется телескопической.

На рис. 1.2 представлена оптическая схема зрительной трубы Кеплера. Она состоит из длиннофокусного объектива 1 и окуляра 2 – линзы с меньшим фокусным расстоянием. Второй главный фокус F_1 объектива совпадает с первым главным фокусом F_2 окуляра, благодаря чему падающий на объектив параллельный пучок лучей выходя из окуляра также параллельным пучком. Как показано на рис. 1.2, объектив 1 зрительной трубы образует обратное действительное изображение G бесконечно удалённого предмета, которое рассматривается в окуляр 2.

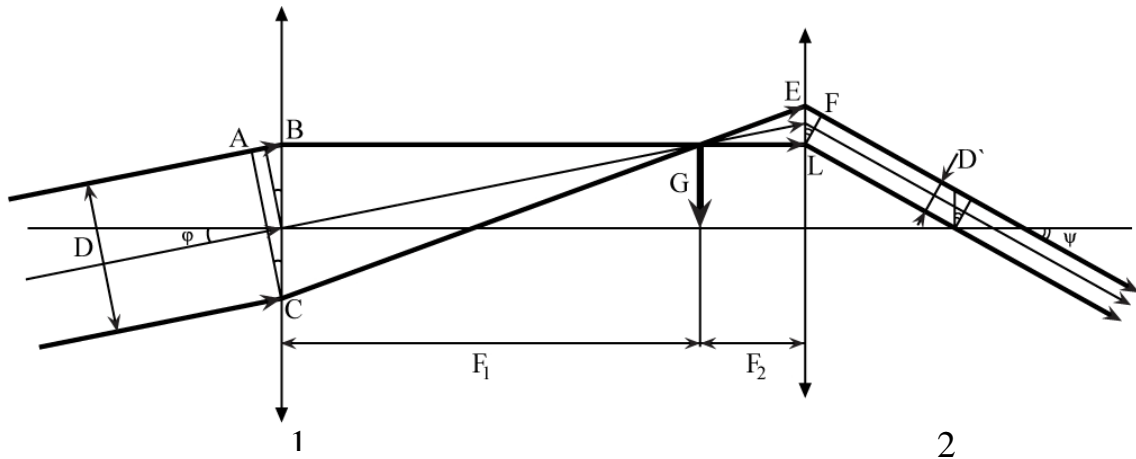


Рис.1.2. Ход лучей в зрительной трубе Кеплера.

Увеличение трубы Γ является *угловым увеличением* и равно отношению

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (1.4)$$

где ψ – угол, под которым предмет наблюдается в трубу (согласно правилу знаков, этот угол отрицательный); φ – угол, под которым предмет виден невооружённым глазом (если глаз поместить вместо объектива трубы на оптической оси).

Ширина параллельного пучка лучей D , входящих в объектив, обычно равна диаметру объектива. Ширина пучка D' , выходящего из окуляра, определяется диаметром выходного зрачка системы. Выходной зрачок является изображением входного зрачка, даваемого окуляром.

Из анализа рис. 1.2 получаем для углового увеличения Γ следующие расчетные формулы:

$$\Gamma = -\frac{F_1}{F_2}, \quad (1.5)$$

$$\Gamma = -\frac{D}{D'}, \quad (1.6)$$

где F_1 и F_2 - фокусные расстояния объектива и окуляра; D и D' - ширина входящего и выходящего параллельного пучка лучей, соответственно.

Соотношение (1.5) показывает, во сколько раз увеличиваются угловые размеры изображения в сравнении с угловыми размерами предмета при наблюдении через трубу.

Линейное увеличение β определяют из соотношений геометрической оптики:

$$\Gamma\beta = 1. \quad (1.7)$$

Из уравнений (1.5) - (1.7) следует, что линейное увеличение β можно вычислить как

$$\beta = -\frac{F_2}{F_1} = -\frac{D'}{D}. \quad (1.8)$$

Так как $D' < D$, то зрительная труба даёт уменьшение линейных размеров наблюдаемых объектов.

2. Микроскоп предназначен для наблюдения мелких предметов, не различимых глазом. На рис. 1.3 показана оптическая схема микроскопа.

Микроскоп состоит из двух линз: короткофокусного объектива I и окуляра II, фокусное расстояние которого больше, чем у объектива. Предмет Y располагается вблизи первого фокуса F_1 объектива так, что действительное увеличенное обратное изображение $-Y'$ получается вблизи первого фокуса F_2 окуляра – между ним и окуляром. Окуляр действует как лупа, давая мнимое изображение $-Y''$ на *расстоянии наилучшего зрения* d_0 ($d_0 = 0,25$ м) от глаза, который находится непосредственно за окуляром. Лучи 1 и 2 позволяют получить изображение $-Y'$. Лучи 1' и 2', попадая в систему глаза, сходятся на сетчатке глаза, где дают изображение, соответствующее мнимому изображению $-Y''$, даваемому окуляром как лупой. Без участия глаза изображения не видно, а из окуляра выходит расходящийся пучок лучей. Расстояние Δ между вторым фокусом объектива и первым фокусом окуляра называется *оптическим интервалом* Δ

$$\Delta = F_2 - F_1. \quad (1.9)$$

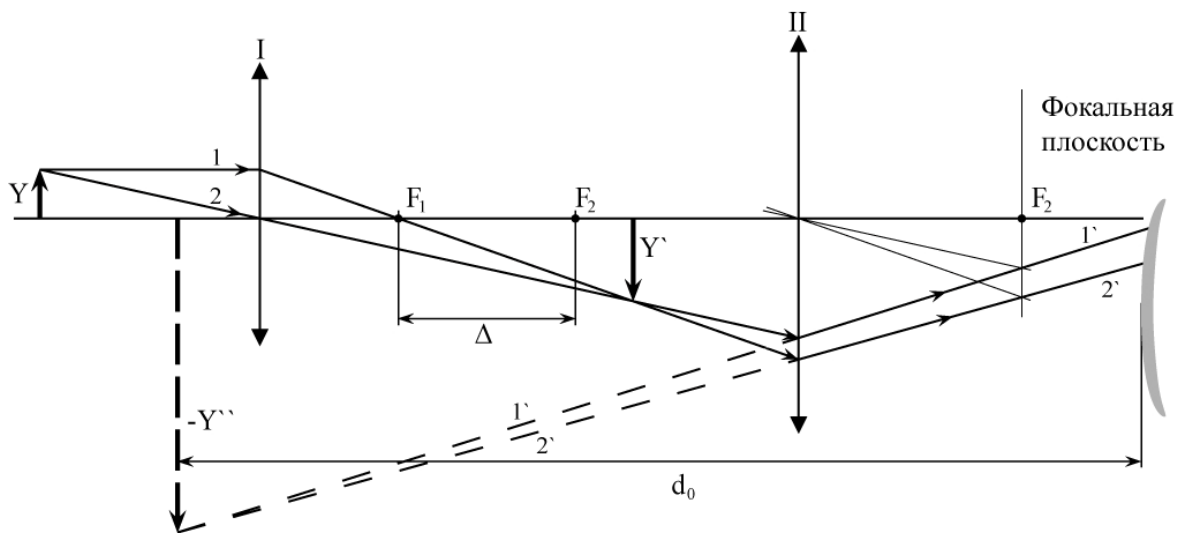


Рис.1.3. Ход лучей в микроскопе.

Если предмет Y поместить на расстоянии d_1 от объектива микроскопа, его изображение Y' будет находиться от объектива на расстоянии f_1 , удовлетворяющем уравнению

$$\frac{1}{F_{об}} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1}. \quad (1.10)$$

Изображение предмета будет увеличено при этом в $k_{об}$ раз, где

$$k_{об} = \frac{f_1}{d_1}. \quad (1.11)$$

Окуляр располагают относительно изображения Y' так, чтобы оно рассматривалось через него как через лупу. Окончательное изображение Y'' будет мнимым и будет отстоять от окуляра на расстоянии f_2 . Если расстояние d_2 от окуляра до промежуточного изображения Y' подобрано так, что оно удовлетворяет уравнению

$$\frac{1}{F_{ок}} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{f_2}, \quad (1.12)$$

то увеличение изображения Y' , даваемое окуляром, при этом окажется равным

$$k_{ок} = \frac{f_2}{d_2}. \quad (1.13)$$

Угловое увеличение микроскопа Γ вычисляется как произведение увеличений объектива и окуляра:

$$\Gamma = k_{об} k_{ок}. \quad (1.14)$$

В случае, когда фокусные расстояния F_1 и F_2 много меньше оптического интервала Δ , увеличение микроскопа выражается простой формулой:

$$\Gamma = \frac{d_0 \Delta}{F_1 F_2}. \quad (1.15)$$

Откройте поочередно компьютерные модели «Зрительная труба Кеплера» (рис. 1.4) и «Микроскоп» (рис. 1.5). Внимательно рассмотрите модели, найдите все регуляторы и другие элементы эксперимента. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз). Изменяя фокусные расстояния линз, наблюдайте за ходом лучей и изменением размеров получающегося в этих оптических приборах изображения.

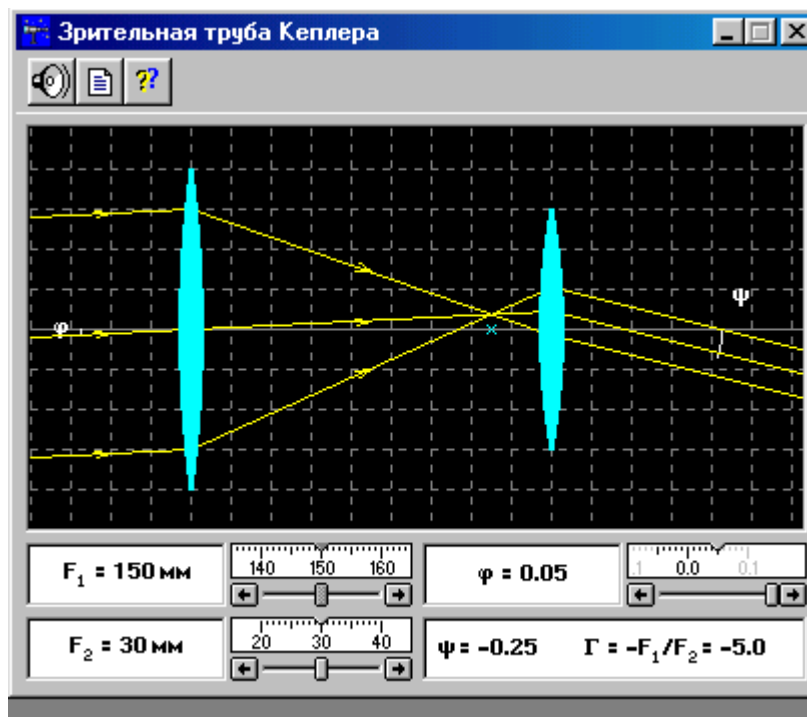


Рис. 1.4. Окно компьютерной модели «Зрительная труба Кеплера».

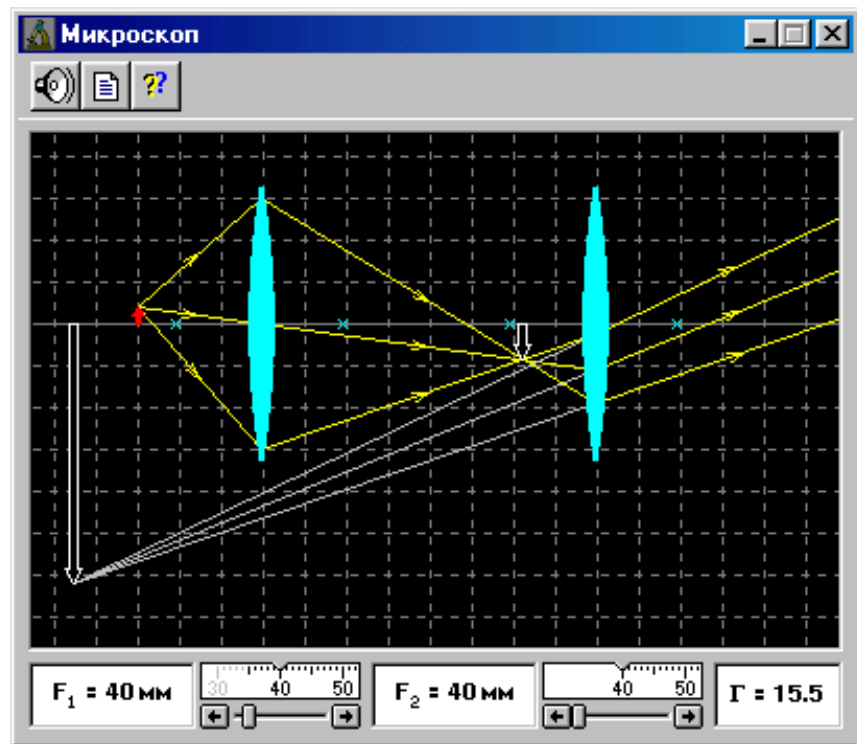


Рис. 1.5. Окно компьютерной модели «Микроскоп».

Перед измерениями определите размер масштабной клеточки окна оптических приборов, используемых в данной работе (для обеих моделей он одинаков). Для этого откройте модель «Зрительная труба Кеплера», установите фокусные расстояния F_1 и F_2 такими, чтобы расстояние между линзами 1 и 2 было равно целому числу клеточек. Сумма фокусных расстояний ($F_1 + F_2$) равна расстоянию между линзами 1 и 2; разделив это расстояние на число клеточек, можно определить размер масштабной клеточки (смотрите рис. 1.4).

Порядок выполнения работы и обработки результатов

Эксперимент 1. «Зрительная труба Кеплера»

1. Запустите, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент «Зрительная труба Кеплера».
2. Подведите указатель мыши к движку регулятора F_1 , нажмите левую кнопку мыши и, удерживая её в нажатом состоянии, перемещайте движок до установки значения F_1 , взятого из табл. 1.1 для вашего варианта.

Таблица 1.1

Значения фокусных расстояний и угла φ (не перерисовывать).

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_1 , мм	100	110	120	130	140	150	155	160	165	170
	105	115	125	135	145	155	175	165	170	175
F_2 , мм	20	22	24	26	28	30	31	34	35	36
	21	23	25	27	29	32	33	35	37	38
φ , рад	0,00	0,01	0,02	0,03	-0,01	-0,02	0,01	-0,03	0,00	-0,04

3. Установите аналогичным образом F_2 и φ .

4. Запишите в табл. 1.2 значение $\Gamma_{\text{теор.}} = -\frac{F_1}{F_2}$, взятое из нижнего

правого ряда окна модели зрительной трубы Кеплера.

Таблица 1.2

Результаты измерений и расчетов

Γ_T	D , мм	D' , мм	Γ_3	$\Delta\Gamma_3$

5. Используя рис. (1.2) и (1.4) и размер масштабной клеточки, определите расстояния BC (в мм) и EL (в мм). Вычислите D и D' по формулам ($D = AC = BC \cdot \cos\varphi$) и ($D' = FL \cdot \cos\psi$) и запишите эти значения в табл. 1.2.

6. Рассчитайте величину углового увеличения $\Gamma_{\text{эксп.}}$ по формуле

$$(\Gamma_{\text{эксп.}} = -\frac{D}{D'})$$
 и запишите это значение в табл. 1.2.

7. Сравните полученное значение $\Gamma_{\text{эксп.}}$ со значением $\Gamma_{\text{теор.}}$.

8. Устанавливая вторые значения F_1 и F_2 , взятые из табл. 1.1 для вашего варианта, повторите измерения по п.п. 2-7, записывая результаты измерений в таблицу 1.2.

9. Оцените погрешность измерений и сделайте выводы.

Эксперимент 2. «Микроскоп»

1. Запустите, щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент «Микроскоп».
2. Подведите указатель мыши к движку регулятора фокусного расстояния объектива микроскопа, нажмите левую кнопку мыши и, удерживая её в нажатом состоянии, перемещайте движок до установки F_1 , взятого из табл. 1.3 для вашего варианта.

Таблица 1.3

Значения фокусных расстояний (не перерисовывать).

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
F_1 , мм	35	39	43	47	51	55	54	59	62	63
	37	41	45	49	53	57	58	61	64	65
F_2 , мм	40	42	44	46	48	50	49	52	52	54
	41	43	45	47	49	51	50	53	54	55

3. Установите аналогичным образом фокусное расстояние окуляра F_2 и запишите эти значения в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Результаты измерений и расчетов

F_1 , мм	F_2 , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	f_1 , мм	f_2 , мм	$k_{об}$	$k_{ок}$	Γ	$\Delta_{эксп}$, мм

4. С помощью установленного размера масштабной клеточки измерьте расстояния (в мм) d_1 , d_2 , f_1 , f_2 и запишите их значения в табл. 1.4.
5. По формулам (1.11), (1.13) и (1.14) рассчитайте $k_{об}$, $k_{ок}$ и Γ и запишите эти значения в табл. 1.4.
6. Рассчитайте, используя формулу (1.15), теоретическое значение оптического интервала $\Delta_{теор.}$ по параметрам, указанным в нижней части окна модели и $d_0 = 0,25$ м.
7. Измерьте с помощью масштабной клеточки оптический интервал микроскопа и запишите полученное значение интервала $\Delta_{эксп}$ в табл. 1.4.

8. Сопоставьте полученные экспериментальные значения оптического интервала и увеличения микроскопа с указанными в окне модели значениями и сделайте соответствующие выводы.

9. Устанавливая вторые значения F_1 и F_2 , взятые из табл.1.3 для вашего варианта, повторите действия по пунктам 2-8, записывая результаты измерений в табл.1.4.

10. Оцените погрешности измерений и сделайте выводы.

Библиографический список

Основной

Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 4. – М.: АСТ. Астрель, 2006.

Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г. Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

Дополнительный

Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Физматлит. 2006. 848с.

Степанова В.А. Физика. Основы волновой оптики.– М.: Изд. Дом МИСиС. 2012

Контрольные вопросы

1. Что называют линзой? Дайте определение основных характеристик линзы (оптический центр, оптические оси, фокусы, фокальная плоскость), иллюстрируя ответ рисунками.

2. Покажите на рисунке, какие лучи используют для построения изображений в тонких линзах.

3. Постройте действительные (уменьшенное, увеличенное и неизменное по размеру) и мнимое изображения стрелки AB , расположенной своим основанием на главной оптической оси собирающей линзы.

4. Напишите формулу тонкой линзы, пояснив физический смысл величин в неё входящих, и дайте определение увеличения линзы.

5. *Задача.* Плосковыпуклая линза с радиусом кривизны $R = 30$ см и показателем преломления $n = 1,5$ дает действительное изображение предмета с увеличением, равным 2. Найти расстояние от предмета до линзы и расстояние от линзы до изображения. (Рисунок обязателен).

Расчетно-графическая работа № 2 – 2

КОЛЬЦА НЬЮТОНА

*Компьютерная модель «Кольца Ньютона»
в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика»
раздел «Оптика»*

Цель работы

Знакомство с моделированием явления интерференции света в тонких плёнках на примере изучения полос равной толщины в схеме колец Ньютона; определение радиуса кривизны линзы.

Методика виртуального эксперимента

В данной работе используется компьютерная модель, основанная на **Дифракционной решетке** отражении световой волны от верхней и нижней поверхностей тонкого клина. На рис. 2.1 схематично изображена интерференция света от стеклянного клина (пластинка переменной толщины), находящегося в воздухе. На клин (у которого угол между боковыми гранями мал) падает плоская волна, направление которой совпадает с параллельными лучами 1 и 2. Лучи, отразившиеся от нижней и верхней поверхностей пластинки, не будут параллельны между собой. В этом случае лучи, отразившиеся от верхней и нижней поверхностей клина пересекутся еще до линзы (на пунктирной линии), где будут интерферировать. Таким образом, интерференционную картинку в результате интерференции света от клина можно наблюдать без линзы. Поскольку разность хода для лучей, отразившихся от различных участков клина, неодинакова, освещенность экрана будет неравномерной – на экране появятся светлые и темные полосы, которые получили название *полосы*

равной толщины – это интерференционные полосы, возникающие в результате интерференции света от мест одинаковой толщины.

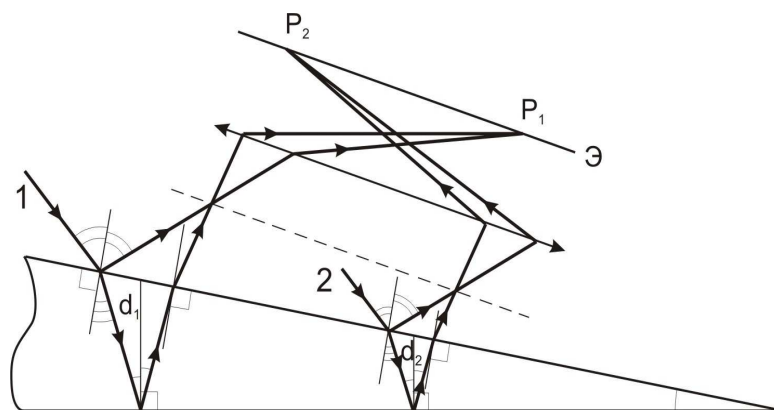


Рис. 2.1. Пример получения полос равной толщины при интерференции света от стеклянного клина.

Интерференция света – одно из ярких проявлений волновой природы света. Это интересное и красивое явление можно наблюдать при наложении двух или нескольких световых пучков. Интенсивность света в области перекрытия пучков имеет характер чередующихся светлых и темных полос. Причем в максимумах интенсивность больше, а в минимумах - меньше суммы интенсивностей складываемых пучков. При использовании белого света интерференционные полосы оказываются окрашены в различные цвета света. С интерференционными явлениями мы сталкиваемся довольно часто: цвета масляных пятен на мокром асфальте, окраска замерзающих оконных стекол, причудливые цветные рисунки на крыльях некоторых бабочек все это проявление интерференции.

Условия интерференционных максимумов и минимумов света:

- если оптическая разность хода складываемых когерентных световых волн равна четному числу длин полуволн, то наблюдается интерференционный максимум (светлая полоса)

$$\Delta_{\max} = \pm 2m \frac{\lambda}{2}; \quad (2.1)$$

- если оптическая разность хода складываемых когерентных световых волн равна нечетному числу длин полуволн, то наблюдается интерференционный минимум (темная полоса)

$$\Delta_{\min} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}; \quad (2.2)$$

где m – целое число, которое называется *порядок интерференции* ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$). В частности, при $m = 0$ возникает интерференционный максимум нулевого порядка, который часто называют центральным максимумом из-за симметричности интерференционной картины.

Оптическая разность хода – это величина, равная разности оптических длин интерферирующих световых волн.

Отметим, что при отражении световой волны от границы раздела оптически менее плотной среды с оптически более плотной средой происходит скачок фазы на π , что приводит к дополнительной разности хода

$$\Delta^* = \frac{\lambda}{2}. \quad (2.3)$$

Кольца Ньютона наблюдаются при отражении света от воздушного зазора, образованного плосковыпуклой линзой с большим радиусом кривизны соприкасающейся с плоскопараллельной пластинкой. Если на линзу падает пучок монохроматического света, то световые волны, отражённые от верхней и нижней поверхностей воздушной прослойки, будут интерферировать между собой. При этом образуются интерференционные полосы, имеющие форму концентрических светлых и тёмных колец, убывающей ширины.

На рис. 2.2 схематично показана связь радиуса третьего по счёту от центра кольца Ньютона (r_3) с радиусом линзы R (d_3 – это диаметр третьего кольца).

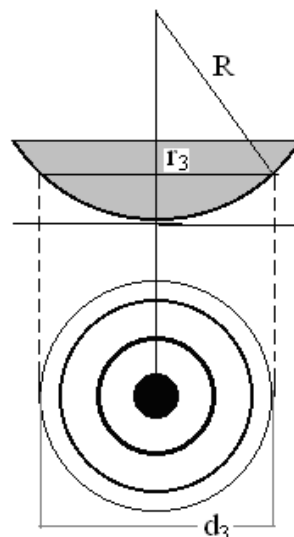


Рис.2.2. Интерференционные полосы - кольца Ньютона.

Радиус m -ого тёмного кольца Ньютона в отраженном свете вычисляется по формуле

$$r_m^2 = mR\lambda, \quad (2.4)$$

где λ – это длина волны падающего на линзу света, R - радиус линзы. Эта формула позволяет определить радиус кривизны линзы

$$R = \frac{r^2}{m\lambda}. \quad (2.5)$$

Вследствие деформации стекла, а также наличия на стекле пылинок невозможно добиться плотного примыкания линзы и пластины в одной точке. Поэтому при определении радиуса кривизны линзы пользуются другой формулой (2.6), в которую входит комбинация из двух значений радиусов интерференционных колец r_m и r_n , что позволяет исключить возможный зазор в точке контакта линзы и стеклянной пластины:

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m - n)\lambda}. \quad (2.6)$$

Откройте компьютерную модель «Кольца Ньютона» (рис.2.3). Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие элементы эксперимента. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз).

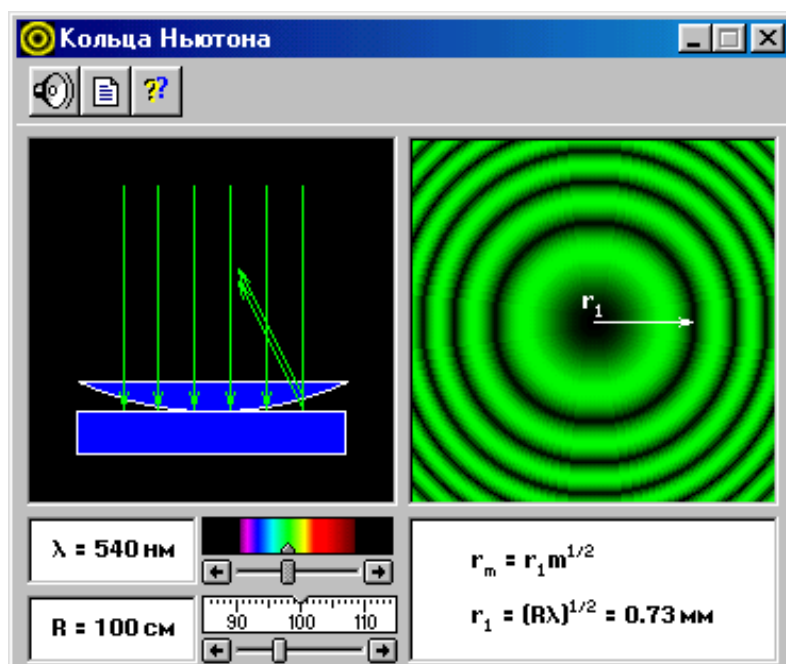


Рис. 2.3. Окно компьютерной модели «Кольца Ньютона».

Установив с помощью указателя мыши любую длину волны; не меняя ее, изменяйте значение радиуса линзы и наблюдайте интерференционную картину. Затем понаблюдайте за интерференционной картиной при неизменном значении радиуса линзы, меняя длину волны.

ВНИМАНИЕ! В этой компьютерной модели ошибка – лучи, отраженные от верхней и нижней поверхностей воздушного зазора (клина) не могут быть параллельными.

Порядок выполнения работы

1. Запустите, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент «Кольца Ньютона».

2. "Зацепите" мышью движок регулятора длины волны монохроматического света и установите первое значение длины волны λ_1 из табл.1 для вашего варианта. Аналогичным образом установите первое значение радиуса кривизны линзы R_1 .

3. Запишите значения длины волны, радиуса кривизны линзы и указанное в правом нижнем прямоугольнике окна компьютерной модели значение $r_{1(1)}$ в табл. 2.2.

4. Установите с помощью мыши вторые значения радиуса R_2 кривизны линзы и длины волны λ_2 из табл. 2.1; выполните измерения по п.3, записав значение $r_{1(2)}$ в табл.2.2.

Таблица 2.1

Значения длины волны и установочного радиуса кривизны линзы (не перерисовывать).

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ_1 , нм	400	420	440	450	460	500	510	520	540	560
R_1 , см	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
λ_2 , нм	570	580	600	620	640	660	680	700	710	720
R_2 , см	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50

Результаты измерений и расчетов

$\lambda_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ $r_{1(1)} = \underline{\hspace{2cm}}$				$\lambda_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ $r_{1(2)} = \underline{\hspace{2cm}}$			
r_3	r_5	r_4	r_6	r_3	r_5	r_4	r_6
$R_{11}^* =$		$R_{12}^* =$		$R_{21}^* =$		$R_{22}^* =$	

Обработка результатов измерений

1. По формуле ($r_m = r_1 \sqrt{m}$) рассчитайте значения радиусов 3, 4, 5 и 6-ого тёмных колец Ньютона и запишите эти значения в табл. 2.2.
2. По формуле (2.6) для каждой длины волны при значениях пар нижних индексов в этой формуле ($m_1 = 3$ и $n_1 = 5$) и ($m_2 = 4$ и $n_2 = 6$), используя рассчитанные значения радиусов, вычислите соответствующие радиусы кривизны линзы R_{11}^* и R_{12}^* и запишите эти значения в табл. 2.2 .
3. Проанализируйте полученные результаты и оцените погрешность проведённых измерений.

Библиографический список

Основной

Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 4. – М.: АСТ. Астрель, 2006.

Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г. Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

Дополнительный

Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Физматлит. 2006. 848с.

Степанова В.А. Физика. Основы волновой оптики.– М.: Изд. Дом МИСиС. 2012

Контрольные вопросы

1. Что такое «Интерференция света»? Поясните это явление на примере полос равной толщины (плоскопараллельная пластинка) и полос равного наклона (клин), иллюстрируя ответ рисунками, на которых покажите сложение когерентных световых волн.

2. Дайте определение оптической длины и оптической разности хода световых волн.

3. Запишите условия максимума и минимума интенсивности при интерференции света и поясните физический смысл величин, входящих в эти формулы. Как эти условия используются при выводе формул расчета радиусов темных и светлых колец Ньютона в отраженном и проходящем свете?

4. Почему при наблюдении колец Ньютона в отраженном свете в центре всегда будет темное пятно?

5. Как изменится интерференционная картина колец Ньютона, если: а) воздушный зазор между линзой и пластинкой заполнить водой вместо воздуха; б) наблюдение проводить в проходящем свете при воздушном зазоре?

6. *Задача.* Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 600$ нм, падающим по нормали к поверхности пластинки. Найти толщину воздушного слоя между линзой и стеклянной пластинкой в том месте, где наблюдается четвертое темное кольцо в отраженном свете.

ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

*Компьютерная модель «Дифракционная решетка»
в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика»
раздел «Оптика»*

Цель работы

Знакомство с моделированием явления дифракции света в параллельных лучах на дифракционной решетке; определение возможности наблюдения дифракционных максимумов интенсивности с учетом ограничений экспериментальных установок.

Методика виртуального эксперимента

В данной работе используется компьютерная модель, основанная на явлении дифракции света при нормальном падении плоской волны на дифракционную решетку.

Большое практическое значение имеет дифракция, наблюдаемая при прохождении света через *дифракционную решётку* – систему параллельных щелей равной ширины, лежащих в одной плоскости и разделённых равными по ширине непрозрачными промежутками. Дифракционная картина на дифракционной решётке определяется как результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей. Дифракция на щели и на дифракционной решётке относятся к случаю, когда на препятствие падает плоская волна, а дифракционная картина наблюдается на экране, находящемся в фокальной плоскости собирающей линзы, установленной за

препятствием. Дифракционные явления этого типа называют *дифракцией Фраунгофера* или *дифракцией в параллельных лучах*.

Дифракция на щели. Пусть плоская монохроматическая световая волна падает нормально на не прозрачный экран (рис.3.1) со щелью шириной b и длиной $\ell \gg b$.

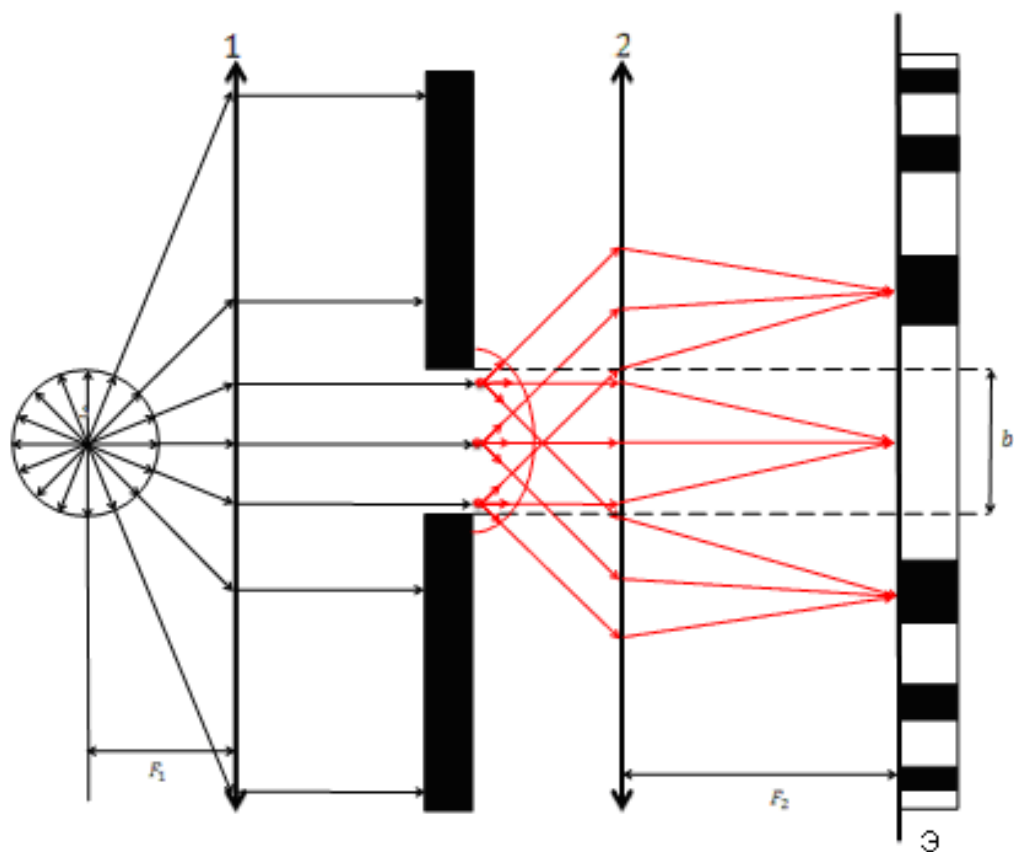


Рис. 3.1. Ход лучей при дифракции света на щели.

При практическом осуществлении дифракции Фраунгофера источник света S помещают в фокусе линзы 1 на расстоянии F_1 от неё (линза 1 не нужна, если источником света является лазер, поскольку от него уже исходит параллельный пучок света). Лучи после линзы 1 падают параллельными лучами на непрозрачный экран со щелью.

В узкой щели шириной b наблюдается дифракция в параллельных лучах: согласно принципу Гюйгенса - Френеля, каждая точка открытого волнового фронта становится источником вторичных волн, фронт которых распространяется в область геометрической тени (на рис.3.1 это показано огибающей линией). Ближе к щели ставят линзу 2, а экран располагают на расстоянии, равном фокусному расстоянию линзы F_2 (из-за малости расстояния между щелью и линзой, в задачах им пренебрегают, и расстояние

от линзы до экрана принято считать фокусным F_2 расстоянием линзы). Плоскость щели и экран параллельны друг другу. Параллельные пучки щелей, выходящие из щели в одинаковом направлении φ (φ – это угол дифракции), собираются линзой в одну точку на экране и интерферируют между собой, усиливая или уменьшая результирующую интенсивность света.

На рис. 3.2. схематично показана интерференция вторичных лучей (рис. 3.2.а), дифрагированных под углом φ , и распределение интенсивности света (рис. 3.2.б), на экране при дифракции на щели. На экране виден ряд интерференционных полос: широкую светлую полосу и симметрично расположенные параллельно щели темные и светлые полосы. От числа зон Френеля, укладываемых на открытой части волнового фронта (на щели шириной b), зависит результат наложения всех вторичных волн, иными словами, определяется дифракционная картина. Если число зон Френеля четное, то есть, оптическая разность хода равна

$$b \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2}, \quad (3.1)$$

(где $k=1,2,3,\dots$), на экране в т.В наблюдается дифракционный минимум (колебания от каждой пары лучей взаимно гасят друг друга и выполняется условие интерференционного минимума. В точке, расположенной симметрично по отношению к т.В, наблюдается такой же минимум света. Если число зон Френеля не четное, то оптическая разность хода вычисляется по формуле

$$b \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (3.2)$$

(где $k=1,2,3,\dots$), выполняется условие максимума интенсивности света (одна зона Френеля не скомпенсирована) и на экране наблюдается дифракционный максимум. В направлении $\varphi=0$ (щель действует как одна зона Френеля в этом направлении) свет распространяется с наибольшей интенсивностью, т.е. в точке O наблюдается центральный дифракционный максимум.

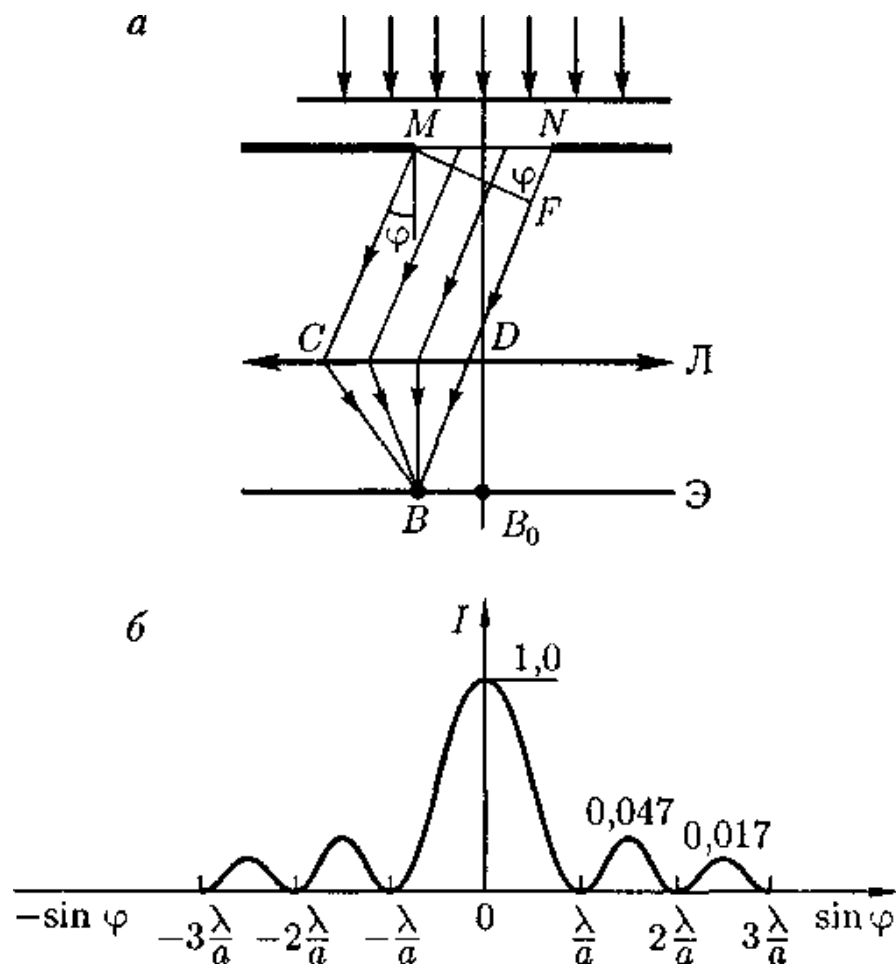


Рис. 3.2. Дифракция Фраунгофера на щели.

Рассматривая дифракцию на щели, пришли к выводу, что распределение интенсивности света на экране определяется направлением дифрагированных лучей. Это означает, что при перемещении щели параллельно самой себе влево или вправо не изменит дифракционной картины. Следовательно, если перейти от одной щели ко многим (к дифракционной решетке), то дифракционные картины, создаваемые каждой щелью в отдельности, будут одинаковыми.

Дифракция на дифракционной решетке. Рис.3.3 схематично иллюстрирует некоторые из множества лучей, нормально падающих на дифракционную решетку, и ход вторичных лучей, дифрагированных под одинаковыми углами φ .

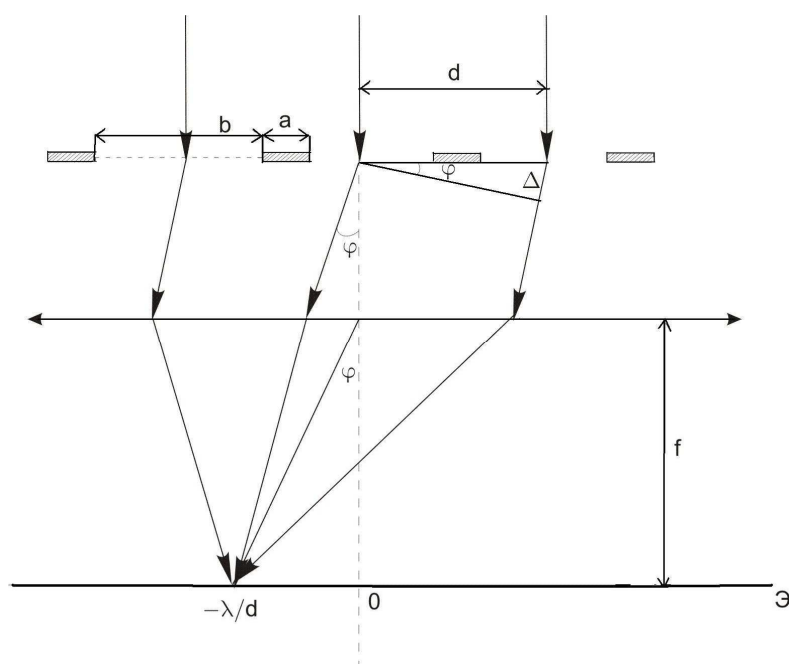


Рис. 3.3. Ход лучей при дифракции света на дифракционной решетке.

Плоская монохроматическая волна нормально падает на дифракционную решетку, **период которой равен d** и определяется формулой

$$d = a + b, \quad (3.3)$$

где b - ширина щели; a - ширина непрозрачных участков между щелями. *Расстояние между серединами соседних щелей называют **периодом дифракционной решетки**.*

Дифракционная картина на дифракционной решётке определяется как результат взаимной интерференции вторичных лучей, идущих от всех щелей, т.е. в дифракционной решётке осуществляется многолучевая интерференция когерентных дифрагированных пучков света, идущих от всех щелей. Вследствие интерференции дифрагированных лучей, на экране видны яркие полосы (интенсивность которых убывает по мере удаления от центра дифракционной картины) и некоторый фон между ними (рис. 3.4). *Яркие полосы называют главными максимумами*, а фон состоит из $(N-1)$ дополнительных минимумов, разделенных $(N-2)$ вторичными максимумами. Интенсивность дополнительных минимумов и вторичных максимумов невелика, поэтому в компьютерной модели их нет.

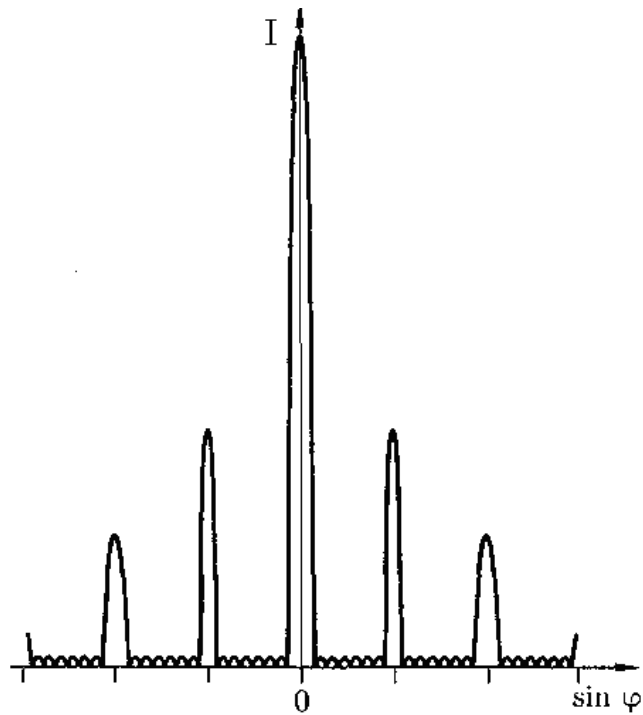


Рис. 3.4. Дифракционная картина от восьми щелей ($N=8$).

Положение *главных максимумов* интенсивности при дифракции на дифракционной решётке определяется условием

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (3.4)$$

где d – период дифракционной решетки, φ – угол дифракции, λ – длина волны падающего на решетку света, число m – это *порядок* главного максимума; $m = 0, 1, 2, 3, \dots$. Так как модуль $\sin \varphi$ не может быть больше единицы, то из (3.4) следует, что количество наблюдаемых главных максимумом определяется отношением периода решетки к длине волны

$$m \leq (d/\lambda) \quad (3.5)$$

Если значения угла дифракции φ одновременно удовлетворяют условиям (3.1) и (3.4), то главные максимумы, отвечающие этим направлениям, не наблюдаются. На рис.3.5 приведена дифракционная картина, наблюдаемая на дифракционной решетке с числом щелей $N = 4$ и отношением периода дифракционной решетки d к ширине щели b равным $d/b = 3$. В рассматриваемом случае главные максимумы третьего, шестого и т.д. порядков приходятся на минимумы интенсивности от одной щели, в результате чего они не наблюдаются.

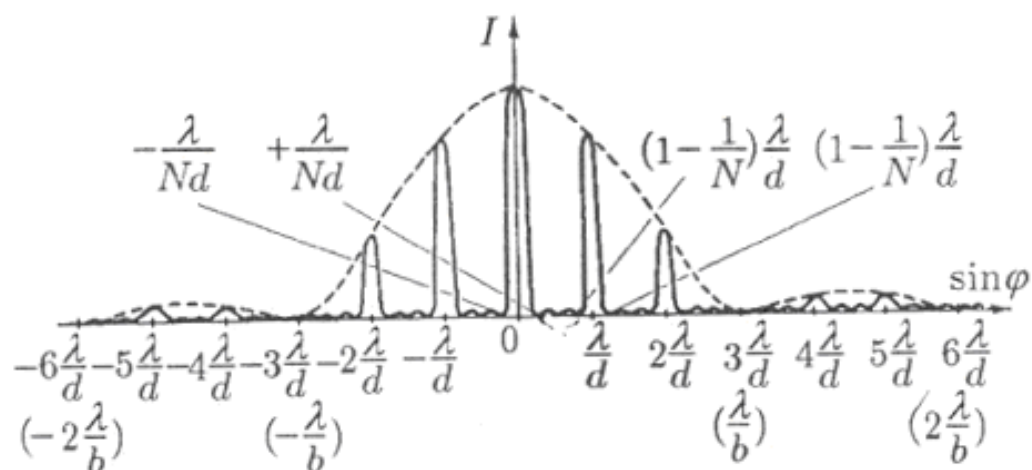


Рис. 3.5. Дифракционная картина от четырех щелей ($N=4$) при $d/b=3$.

Откройте компьютерную модель «Дифракционная решетка» (рис.3.6). Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие элементы. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ еще раз.

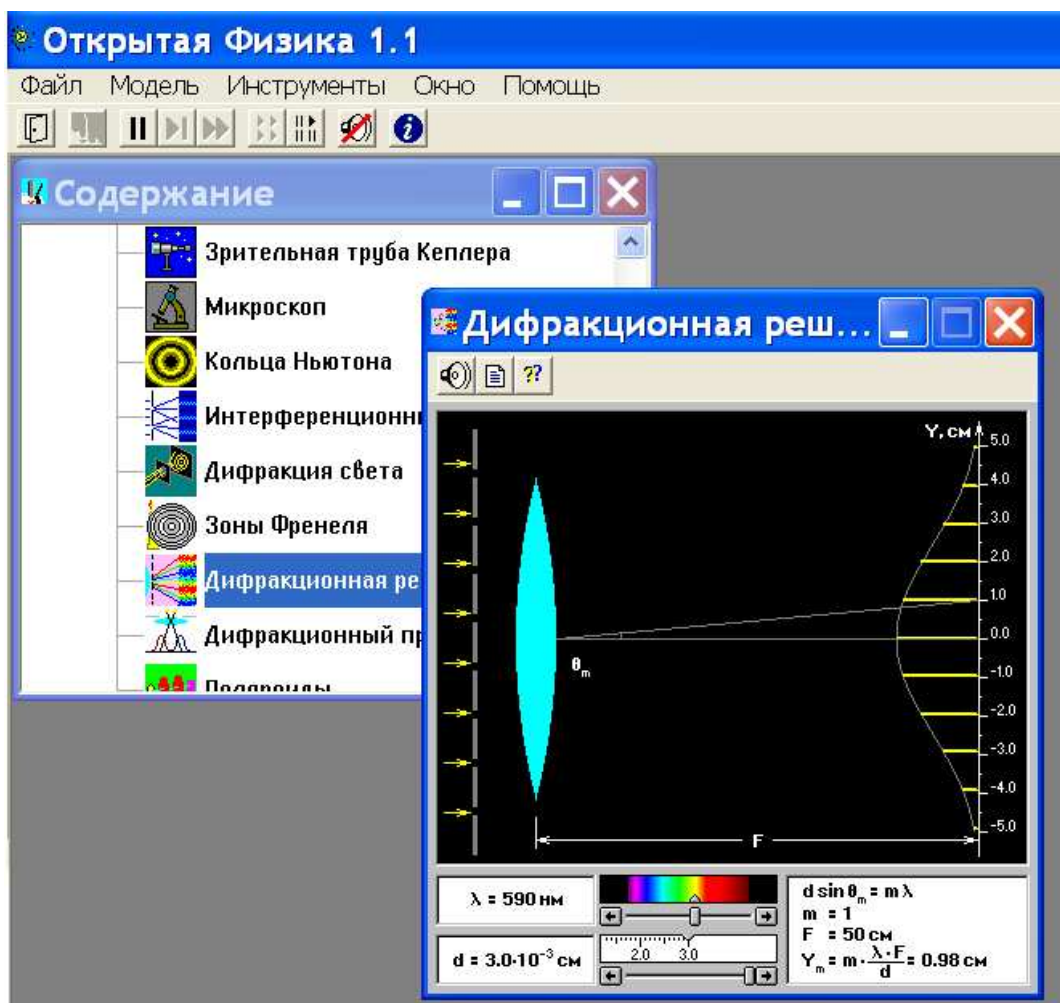


Рис. 3.6. Диалоговое окно компьютерной модели «Дифракционная решетка».

В этой компьютерной модели можно с помощью движков менять длину волны λ падающего на дифракционную решетку света и величину периода d этой решетки. Вблизи решетки расположена собирающая линза, в фокальной плоскости которой находится экран для наблюдения дифракционной картины, имеющей здесь вид узких полос, цвет которых меняется с изменением значения длины волны λ . Фокусное расстояние F в этой модели фиксированное. По вертикальной оси (Y , см) можно определить расстояние m - о го главного максимума интенсивности от центра дифракционной картины.

Точка для исследования выбирается установкой указателя мыши на цветную линию вблизи вертикальной оси (Y , см); при этом на экране появляется изображение руки, которую можно перемещать в вертикальном направлении, а в правом нижнем углу экрана модели указывается численное значение m -ого главного максимума интенсивности и расстояние этого главного максимума интенсивности до центра дифракционной картины (Y_m). Угол дифракции в модели обозначен как θ_m . Для больших углов дифракции указатель мыши (изображении руки) нужно ставить между вертикальной осью (Y , см) и огибающей линией распределения интенсивности.

Характерной особенностью этой модели является то, что для фиолетово-синей области длин волн ($\lambda=385\div 440$ нм) она фиксирует значение m -ого главного максимума интенсивности, (при увеличении угла дифракции θ_m) увеличивающееся от 1 до определенного значения, а затем значение m фиксируется равным $m = 1$, а обозначение угла перемещается в положение θ_{m1} . Визуально это наблюдается, когда изображение "руки" установить в место, где линия не видна, и выше этого места. Например, при $\lambda=435$ нм и $d=3.0 \cdot 10^{-3}$ см фиксируемые значения $m=6$ и $Y_m = 4,10$ см, а линия не видна; выше линия видна также как при θ_{m5} , а фиксируемое значение $m=1$. Вероятно, что при моделировании было заложено явление, когда главные максимумы определенных порядков приходятся на минимумы интенсивности от одной щели, в результате чего они не наблюдаются. Следовательно, можно сделать вывод, что в рассмотренном нами примере исчезает главный максимум шестого порядка ($m=6$), а следующий главный

максимум, фиксируемый в модели как $m=1$, равен значению на единицу больше, т.е. максимально "видимый" главный максимум имеет значение $m_{max}=7$. Такое распределение интенсивности показано на рис.3.5. в случае, когда пропадает главный максимум третьего порядка.

Данная компьютерная модель позволяет определить возможность наблюдения дифракционных максимумов интенсивности с учетом ограничений экспериментальных установок, которые определяют численное значение порядка максимально видимого главного максимума, т.е. величину m_{max} .

Установив с помощью указателя мыши любое значение длины волны λ падающего на дифракционную решетку света, посмотрите распределение интенсивности дифрагированных лучей при разных значениях периода d дифракционной решетки. Затем проделайте те же наблюдения при определенном значении периода d дифракционной решетки для разных длин волн. Сделайте вывод: что изменяется в распределении интенсивности дифрагированных лучей и почему?

Порядок выполнения работы

Эксперимент 1

1. Запустите, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент «Дифракционная решетка».
2. Перемещая движок регулятора значений длины волны, установите значение λ , указанное в табл.3.1 для вашего варианта.
3. Перемещая движок регулятора значений периода дифракционной решетки, установите значение $d = 1,0 \cdot 10^{-3}$ см. Подведите указатель мыши (изображение руки) к первой видимой линии выше центра графика и щелкните левой кнопкой мыши; при этом фиксируется значение $m=1$. Затем, перемещая указатель вертикально вверх, определите значение m_{max} максимально "видимого" главного максимума, подведя "изображение руки" к наиболее удаленной от центра дифракционной картины видимой линии и нажав левую кнопку мыши. *Обратите внимание на характерную*

особенность этой модели для фиолетово-синей области длин волн ($\lambda=385\div 440$ нм).

4. Запишите численное значение m_{max} в табл. 3.2.
5. Увеличивая значение периода d на $0,5 \times 10^{-3}$ см, повторите измерения численного значения m_{max} (пункты 3 и 4), записывая его табл. 3.2.

Таблица 3.1

**Значения длины волны и периода дифракционной решетки
(не перерисовывать).**

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ , нм	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625
$d, \times 10^{-3}$ см	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0

Таблица 3.2

Результаты измерений порядка максимально "видимого" главного максимума при $\lambda = \dots$ нм

$d, \times 10^{-3}$ см	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
m_{max}					

Эксперимент 2

1. Запустите, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент «Дифракционная решетка».

2. Перемещая движок регулятора значений периода дифракционной решетки, установите значение d , указанное в табл.3.1 для вашего варианта.

3. Перемещая движок регулятора значений длины волны, установите значение $\lambda = 400$ нм. Подведите указатель мыши (изображение руки) к первой видимой линии выше центра графика и щелкните левой кнопкой мыши; при этом фиксируется значение $m=1$. Затем, перемещая указатель вертикально вверх, определите значение m_{max} максимально "видимого" главного максимума, подведя "изображение руки" к наиболее удаленной от центра дифракционной картины видимой линии и нажав левую кнопку мыши. *Обратите внимание на характерную особенность этой модели для фиолетово-синей области длин волн ($\lambda=385\div 440$ нм).*

4. Запишите численное значение m_{max} в табл. 3.3.

5. Увеличивая значение длины волны λ на 50нм, повторите измерения численного значения m_{max} (пункты 3 и 4), записывая его табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты измерений порядка максимально "видимого" главного максимума при $d = \dots \times 10^{-3}$ см

λ , нм	400	450	500	550	600
m_{max}					

Обработка результатов измерений

Эксперимент 1

1. Вычислите, используя формулу (3.5), максимальное значение номера главного максимума, который можно наблюдать в дифракционной картине при падении света на дифракционную решетку при λ и d , данных для вашего варианта.

2. Постройте график зависимости численного значения порядка m_{max} максимально "видимого" главного максимума от численного значение периода d дифракционной решетки $m_{max} = f(d)$.

3. Запишите выводы по результатам расчета и анализа графика.

Эксперимент 2

1. Вычислите, используя формулу (3.5), максимальное значение номера главного максимума, который можно наблюдать в дифракционной картине при падении света на дифракционную решетку при λ и d , данных для вашего варианта.

2. Постройте график зависимости численного значения порядка m_{max} максимально "видимого" главного максимума от численного значение длины волны λ света, падающего на дифракционную решетку $m_{max} = f(\lambda)$.

3. Запишите выводы по результатам расчета и анализа графика.

Библиографический список

Основной

Савельев И. В. Курс общей физики. Кн. 5. - М: АСТ: Астрель, 2007.

Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г. Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ (№ 805). - М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

Дополнительный

Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.5. - М.: Физматлит, 2006.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип Гюйгенса - Френеля, пояснив его рисунком.
2. Что такое *угол дифракции* и как определить его величину?
3. Как изменится дифракционная картина, если увеличить общее число штрихов (щелей) решетки, не меняя период решетки?
4. Сколько дополнительных минимумов и максимумов возникает при дифракции на семи щелях?
5. При каком отношении периода дифракционной решетки к ширине щели не будет наблюдаться спектр второго порядка?
6. Почему дифракционная решетка разлагает белый свет на спектр?

ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

*Компьютерная модель «Фотоэффект»
в сборнике компьютерных моделей «Открытая физика»
раздел «Квантовая физика»*

Цель работы

На компьютерной модели внешнего фотоэффекта подтверждение закономерностей внешнего фотоэффекта; определение красной границы фотоэффекта, работы выхода электронов из фотокатода и постоянной Планка.

Методика виртуального эксперимента

В данной работе используется компьютерная модель, основанная на методе изучения закономерностей внешнего фотоэффекта — явлении, сыгравшего исключительную роль в становлении квантовой оптики.

В квантовой оптике свет рассматривается как поток особых частиц — **фотонов (квантов электромагнитного излучения)**, всегда движущихся со скоростью распространения света в вакууме. Фотоны не существуют в состоянии покоя, их масса и энергия покоя равны нулю. Это не противоречит тому, что скорость света в среде всегда меньше скорости света в вакууме: согласно квантовой электродинамике, фотоны поглощаются и вновь испускаются частицами среды, что и приводит к тому, что скорость света в среде меньше скорости света в вакууме.

Свет, обладая одновременно корпускулярными и волновыми свойствами, обнаруживает определенные закономерности в их проявлении. Так, волновые свойства света проявляются в закономерностях его распространения, интерференции, дифракции, поляризации, а корпускулярные – в процессах взаимодействия света с веществом.

Согласно теории Эйнштейна, при взаимодействии электромагнитного излучения с веществом мономатическое электромагнитное излучение с частотой ν ведет себя как совокупность одинаковых частиц – фотонов. Энергия фотона ε определяется формулой

$$\varepsilon = h\nu, \quad (4.1)$$

где h – это постоянная Планка, равная $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Фотоэлектрическим эффектом (или просто фотоэффектом) называют явление взаимодействия световых волн с атомами вещества, в результате чего энергия света передается атомам вещества. **Внешний фотоэффект** — это явление выбивания светом электронов из проводника.

Для изучения законов внешнего фотоэффекта применяют установку, схематично изображенную на рис.4.1. Два электрода (катод К из исследуемого металла и анод А) в вакуумной трубке подключены к батарее так, что с помощью потенциометра можно изменять значение и знак подаваемого на электроды напряжения, величина которого измеряется вольтметром (V).

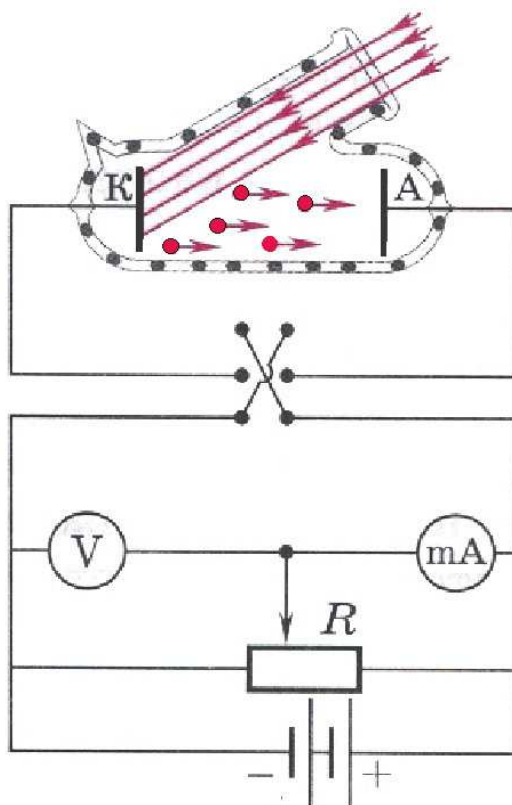


Рис. 4.1. Схема установки для изучения законов внешнего фотоэффекта.

Ток, возникающий в электрической цепи при освещении катода монохроматическим светом (через кварцевое окошко), измеряется включенным в цепь миллиамперметром (mA). Этот ток называют фототоком. Цель исследования — установить зависимость силы фототока от напряжения между электродами и от условий освещения катода. По результатам исследования строят *вольтамперную характеристику*, т. е. зависимость силы фототока I от напряжения U между катодом и анодом.

Сила фототока I прямо пропорциональна числу фотоэлектронов N , долетающих до анода за единицу времени

$$I = \frac{Ne}{t}, \quad (4.2)$$

где N - число фотоэлектронов, достигших анода за время t , e - заряд электрона.

Сообщим аноду положительный потенциал, соединив его с плюсом источника тока, и будем увеличивать напряжение на электродах. При одинаковых условиях освещения (при одинаковом световом потоке) зависимость силы фототока от напряжения имеет вид, изображенный на рис. 4.2: с увеличением напряжения U фототок I постепенно нарастает (все большее число электронов достигает анода), доходя до «насыщения». С увеличением светового потока ($\Phi_2 > \Phi_1$); ток насыщения увеличивается ($I_{2\text{нас}} > I_{1\text{нас}}$). Пологий характер кривой объясняется тем, что электроны из катода вылетают с различными скоростями, образуя «электронное облако» возле катода. При некотором значении U все электроны, вырванные из катода, достигают анода, т.е. «электронное облако» размывается и превращается в направленный поток электронов – в этом случае имеет место ток насыщения $I_{\text{нас}}$.

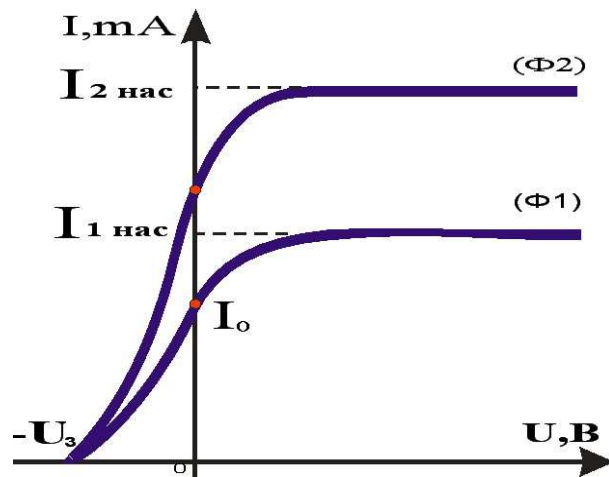


Рис. 4.2. Вольтамперная характеристика.

При уменьшении напряжения, фототок уменьшается. Чтобы он совсем прекратился, надо на анод подать отрицательное напряжение, тогда электрическое поле между анодом и катодом будет тормозить вылетевшие фотоэлектроны, и фототок совсем прекратится при некотором значении напряжения (U_3).

По теории Эйнштейна, *каждый квант падающего света поглощается только одним электроном*, поэтому число вырванных фотоэлектронов должно быть пропорционально интенсивности света, падающего на металл. Согласно закону сохранения энергии, **уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта** записывают в виде

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mV_{\text{max}}^2}{2}, \quad (4.3)$$

где $h\nu$ - энергия падающего на металл фотона, $A_{\text{вых}}$ - работа выхода электрона из металла, $\frac{mV_{\text{max}}^2}{2}$ - максимальная кинетическая энергия некоторых вылетевших фотоэлектронов.

Минимальная частота $\nu_{\text{кр}}$ (или максимальная длина волны $\lambda_{\text{кр}}$), при которой еще наблюдается фотоэффект, т.е. для которой энергия падающего на катод фотона равна работе выхода,

$$\nu_{\text{кр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h} \quad \text{или} \quad \lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}} \quad (4.4)$$

называется красной границей фотоэффекта.

Запирающим (или задерживающим) напряжением называется минимальное тормозящее напряжение между анодом вакуумной лампы (фотоэлемента) и фотокатодом, при котором отсутствует ток в цепи этой лампы, т.е. фотоэлектроны не долетают до анода. При таком напряжении кинетическая энергия электронов у катода равна потенциальной энергии электронов у анода, откуда следует выражение:

$$U_{\text{зан}} = \frac{E_{\text{к. max}}}{e} = \frac{h\nu - A_{\text{вых}}}{e} \quad (4.5)$$

Откройте компьютерную модель «Фотоэффект» (рис.4.3). Внимательно рассмотрите модель, найдите все регуляторы и другие элементы. (Если вы забыли, как работать с системой компьютерного моделирования, прочитайте ВВЕДЕНИЕ ещё раз).

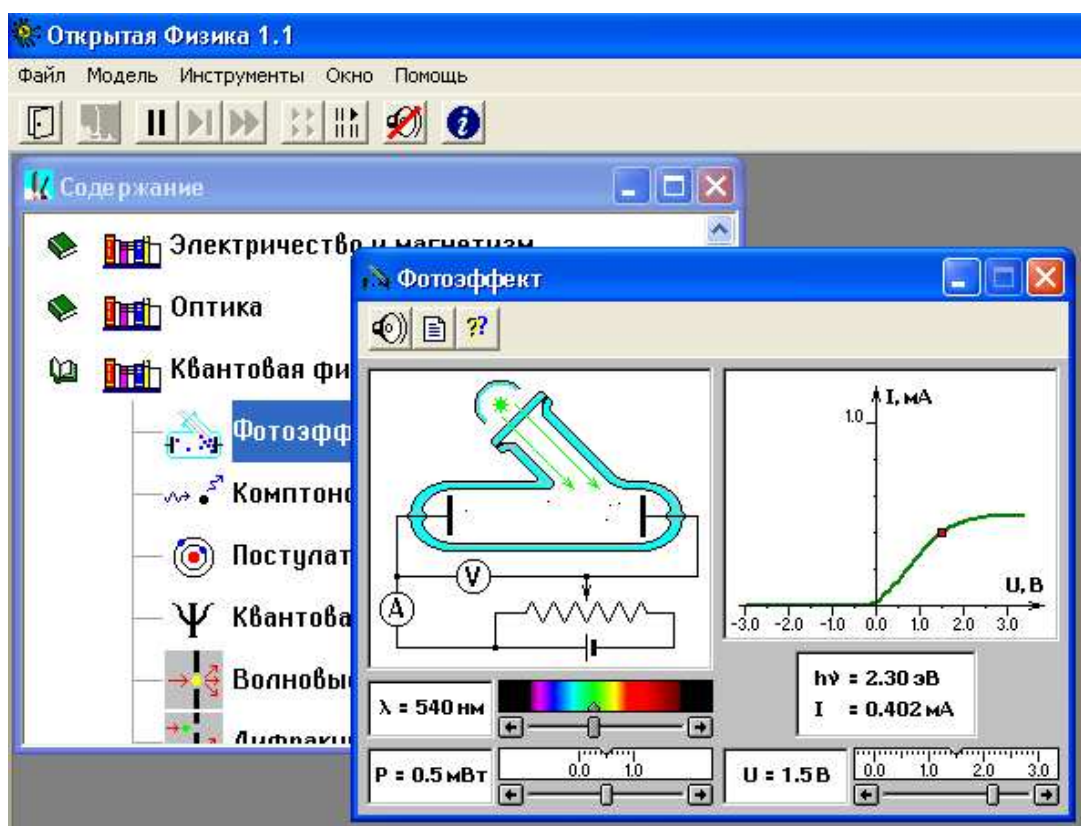


Рис. 4.3. Диалоговое окно компьютерной модели «Фотоэффект».

В компьютерной модели можно с помощью движков менять длину волны λ падающего на фотокатод света, мощность падающего света (иначе говоря, интенсивность света), величину и знак напряжения U электростатического поля между электродами вакуумной лампы.

Компьютерная модель фиксирует численные значения энергии фотона ($h\nu$), падающего на фотокатод, и величину фототока I .

Установив с помощью указателя мыши любое значение длины волны падающего на фотокатод света, наблюдайте процессы движения электронов при разных значениях мощности излучения (при разных значениях светового потока). Затем проделайте те же наблюдения при определенной мощности для разных длин волн.

«Зацепите» мышью движок реостата регулятора интенсивности (мощности) облучения фотокатода светом и установите его на максимум. Аналогичным образом установите нулевое напряжение между анодом и фотокатодом и минимальную длину волны падающего на фотокатод света. Наблюдайте движение электронов в фотоэлементе, изменяя напряжение до **запирающего фототока (показания тока $I = 0$)**.

Порядок выполнения работы

1. Запустите, дважды щелкнув левой кнопкой мыши, виртуальный эксперимент «Фотоэффект».
2. Установите нулевое напряжение между анодом и фотокатодом. «Зацепив» мышью, перемещайте метку на спектре, постепенно увеличивая длину волны падающего на фотокатод света λ . Добейтесь полного отсутствия фототока (показания тока $I = 0$). Зафиксируйте (перемещая щелчками по стрелке движка) самую большую длину волны (она будет равна $\lambda_{кр}$), при которой фототок еще присутствует. Запишите значение длины волны красной границы фотоэффекта ($\lambda_{кр}$).
3. Для определения связи запирающего напряжения с длиной волны падающего света необходимо сначала установить минимальную длину волны.
4. Затем установите движком значение запирающего напряжения $U = U_{запi}$ из табл. 4.1 для вашего варианта (в которой i - это номер измерения).

Таблица 4.1

Значения запирающего напряжения (не перерисовывать).

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{зап } 1}, \text{ В}$	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,1	-0,3
$U_{\text{зап } 2}, \text{ В}$	-0,3	-0,4	-0,5	-0,8	-0,7	-0,7	-0,8	-0,9	-0,2	-0,6
$U_{\text{зап } 3}, \text{ В}$	-0,6	-0,8	-0,7	-0,9	-0,9	-0,8	-0,9	-1,0	-0,3	-0,9
$U_{\text{зап } 4}, \text{ В}$	-0,9	-1,0	-1,1	-1,2	-1,0	-0,9	-1,0	-1,1	-0,4	-1,2

5. Перемещая мышью метку на спектре, установите такое максимальное значение длины волны $\lambda = \lambda_1$, при котором прекращается фототок (при визуальном наблюдении движения электронов вы видите, что электроны не долетают до анода, а движутся обратно к катоду), при этом амперметр показывает ток $I = 0$.

6. Значения λ_1 и $U_{\text{зап}1}$ занесите в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты измерений

Номер измерения i	1	2	3	4
$U_{\text{зап } i}, \text{ В}$				
$\lambda_i, \text{ нм}$				
$1/\lambda_i, 10^6 \text{ м}^{-1}$				

7. Повторите измерения по п. 3 – 6 для трех других значений $U_{\text{зап } i}$ из табл. 4.1 для вашего варианта.

Обработка результатов измерений

1. Вычислите численное значение работы выхода материала фотокатода, используя формулу $(\lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}})$ и экспериментально установленную длину волны красной границы фотоэффекта. Используя табл.3, определите из какого материала изготовлен катод вакуумной лампы (обратите внимание на размерность работы выхода в таблице).

2. Вычислите и запишите в табл. 4.2 обратные длины волн.

3. Постройте график зависимости модуля напряжения запираения ($U_{\text{зап}}$) от обратной длины волны ($1/\lambda$), т.е. $(U_{\text{зап}}) = f(1/\lambda)$.

4. Определите численное значение постоянной Планка, используя график и формулу $h = \frac{e}{c} \cdot \frac{\Delta(U_{\text{зап}})}{\Delta(\frac{1}{\lambda})}$, в которой e – заряд электрона, c – скорость

света в вакууме, $\frac{\Delta(U_{\text{зап}})}{\Delta(\frac{1}{\lambda})}$ – отношение приращения функции к

соответствующему приращению аргумента.

5. Запишите ответы и проанализируйте ответы и график.

Значения работы выхода для некоторых материалов приведены ниже:

Материал	калий	литий	платина	рубидий	серебро	цезий	цинк
$A_{\text{вых}}, \text{эВ}$	2.2	2.3	6.3	2.1	4.7	2.0	4.0

Библиографический список

Основной

Савельев И. В. Курс общей физики. Кн. 5. - М: АСТ: Астрель, 2007.

Капуткин Д.Е., Шустиков А.Г. Физика. Обработка результатов измерений при выполнении лабораторных работ. (№ 805). - М.: МИСиС. «Учеба». 2007.

Дополнительный

Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.5. - М.: Физматлит, 2004.

Контрольные вопросы

1. Что такое фотон? Напишите формулу вычисления энергии фотона.
2. Что называют внешним фотоэффектом? Перечислите условия, при которых возможен внешний фотоэффект. Напишите уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта и поясните физический смысл входящих в него величин. Что называют работой выхода и красной границей фотоэффекта?
3. Объясните принцип действия электрической схемы наблюдения внешнего фотоэффекта в данной работе. Нарисуйте и поясните вольт - амперную характеристику вакуумного фотоэлемента. Отличаются ли вольт - амперные характеристики различных материалов? (Ответ поясните).
4. Дайте определение фототока. От чего зависит величина фототока?
5. Поясните физический смысл запирающего (задерживающего) напряжения. Изменится ли величина запирающего напряжения, если: а) не меняя источник монохроматического излучения, изменить материал фотоэлемента? б) не меняя материал фотоэлемента, изменять монохроматическое излучение?
6. *Задача.* Найти длину волны λ света, вырывающего из металла электроны, которые полностью задерживаются разностью потенциалов, равной $U = 3\text{В}$. Фотоэффект начинается при частоте света $\nu = 6 \cdot 10^{14}$ Гц. Вычислить работу выхода электрона из этого металла.