

**Специализированный учебно-научный центр -
факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,
Школа имени А.Н. Колмогорова
Кафедра физики**

Общий физический практикум

Лабораторная работа № 4.4

**Экспериментальная проверка законов фотометрии
с помощью селенового фотоэлемента.**

Составитель Т.П. Корнеева

2011 г.

Экспериментальная проверка законов фотометрии с помощью селенового фотоэлемента.

Цель работы:

1. Ознакомление с работой селенового фотоэлемента.
2. Экспериментальное подтверждение законов фотометрии.

Приборы и оборудование:

Прибор лабораторный для изучения законов фотометрии, миллиамперметр, лабораторный источник питания ЛИП-90, реостат, ключ, соединительные провода, собирающая линза с фокусным расстоянием не более 10 см.

I. ФОТОМЕТРИЯ

Предмет фотометрии.

Электромагнитное излучение, воспринимаемое органами зрения человека, принято называть **световым излучением** или **светом**. Непосредственное воздействие света на органы зрения обусловлено действием световой энергии, поглощенной чувствительными элементами глаза. Отдел оптики, изучающий способы измерения световой энергии, называется **фотометрией**.

Энергетической характеристикой любого излучения является его **интенсивность**, т.е. величина, численно равная энергии, переносимой за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны:

$$J = \Delta W / \Delta S \cdot \Delta t$$

Единицей измерения интенсивности излучения в системе единиц СИ служит 1 Вт/м^2 .

Если волна проходит через произвольную выделенную в пространстве поверхность, то **поток излучения** через

данную поверхность называется отношение энергии, прошедшей через эту поверхность за некоторый интервал времени, к величине этого интервала:

$$\Phi_{\Sigma} = \Delta W / \Delta t$$

Единицей измерения потока излучения в системе единиц СИ служит 1 Вт.

Заметим, что интенсивность излучения можно также определить как **плотность потока излучения** $\Delta \Phi_{\Sigma} / \Delta S$ через площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.

Существуют высокочувствительные приборы, называемые **болометрами**, которые регистрируют весь поток электромагнитного излучения, попадающего на их поверхность.

Однако человеческий глаз реагирует на очень небольшую часть спектра электромагнитного излучения, заключенную между инфракрасной и ультрафиолетовой областями. Более того, даже в пределах этой области чувствительность глаза к свету разных длин волны сильно различается. Так, при одной и той же интенсивности излучения зрительное ощущение от лучей зеленого света будет в 100 раз сильнее, чем от лучей красного света. Характеристикой зрительного восприятия энергии электромагнитного излучения разных длин волн является **кривая относительной спектральной чувствительности глаза**, изображенная на рисунке 1.

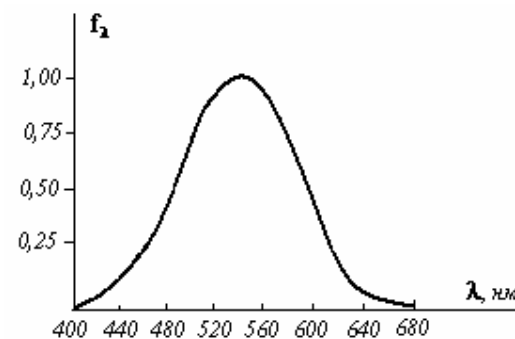


Рис. 1

На этой кривой показана зависимость чувствительности глаза f_λ от длины волны λ . Если чувствительность глаза для длины волны $\lambda = 555$ нм (зеленый свет) принять за единицу, то для более длинных и более коротких волн чувствительность быстро уменьшается. Так, даже в пределах желто-зеленой области для $\lambda = 510$ нм и $\lambda = 610$ нм чувствительность будет равна 0,5, а для $\lambda = 430$ нм (фиолетовый) и $\lambda = 675$ нм (красный) она составляет менее 0,01.

Система фотометрических величин.

Основной величиной фотометрии является **световой поток** Φ_{cv} – количество световой (лучистой) энергии, проходящей через заданную поверхность за единицу времени и оцениваемое по зрительным ощущениям.

Как видно из определения, световой поток характеризует световую энергию, проходящую в данном месте пространства через некоторую поверхность от одного или нескольких источников, и воспринимаемую органами зрения.

Световой поток, излучаемый в пространство каким либо источником света, также может служить характеристикой источника. Так, полный поток излучения (во всем диапазоне электромагнитных волн), который звезда посылает в окружающее пространство, астрономы называют светимостью звезды. Но такая характеристика источника становится неполной, если источник не является изотропным, т.е. излучает свет по разным направлениям неодинаково. В этом случае для характеристики световой энергии, посылаемой источником в разных направлениях, служит **сила света источника**.

Силой света источника I в данном направлении называется отношение светового потока, посылаемого источником в этом направлении внутри телесного угла $\Delta\Omega$, к величине этого угла:

$$I = \Delta\Phi_{cv} / \Delta\Omega$$

Важную роль в фотометрии играет понятие **точечного источника**. Реальный источник может считаться точечным, если:

- 1) его линейные размеры существенно меньше тех расстояний, с которых ведется наблюдение;
- 2) его излучение изотропно, т.е. сила света одинакова по всем направлениям.

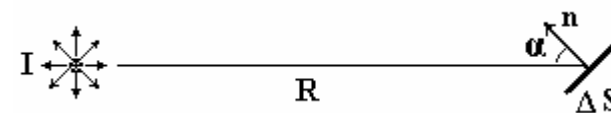
Поскольку полный телесный угол, окружающий точечный источник, равен 4π , полный световой поток, излучаемый точечным источником, равен $\Phi_{cv} = 4\pi I$.

Когда световой поток падает на какую либо освещаемую поверхность, например, стол или книгу, для нас важна **освещенность E** этой поверхности, т.е. отношение светового потока, падающего на поверхность площади ΔS , к величине этой площади:

$$E = \Delta\Phi_{cv} / \Delta S.$$

Используя определения основных величин фотометрии, нетрудно вывести **основной закон фотометрии**: если свет от точечного источника с силой света I падает под углом α на небольшую площадку, находящуюся на расстоянии R от источника, освещенность площадки равна

$$E = (I \cos\alpha) / R^2. \quad (*)$$



Система единиц измерения в фотометрии.

В системе световых единиц измерения за основную принята единица силы света, устанавливаемая с помощью эталонного источника. Таким источником, дающим силу света, равную единице, первоначально считалось пламя свечи, изготовленной строго стандартным способом (отсюда и пошло название этой единицы – **свеча**). Впоследствии пытались использовать в качестве эталона лампы накаливания, но их

свойства меняются с течением времени, к тому же их невозможно в точности воспроизвести в случае поломки.

В 1967 г. специальным Международным соглашением был утвержден новый эталон, который можно точно воспроизвести, и который устроен следующим образом.

В специальном тугоплавком сосуде находится химически чистая платина (Pt) при температуре плавления 2042 К. При такой высокой температуре платина светится, и ее излучение по своим свойствам близко к излучению абсолютно черного тела. В сосуд с расплавленной платиной помещена узкая трубочка, сделанная из материала сосуда, и через ее открытый конец наблюдают излучение с поверхности расплавленной платины. Источником света, имеющим силу света 1 **кандела** (1 *свеча*), считается площадка величиной $1/60 \text{ см}^2$ на поверхности расплавленной платины, излучающая в направлении оси трубочки.

За единицу светового потока 1 **люмен** (лм) принимают такой световой поток, который создается точечным источником света с силой света 1 кандела (кд) в телесном угле 1 стерадиан (стер).

За единицу освещенности 1 **люкс** (лк) принимают освещенность поверхности площадью в 1 м^2 , на которую падает световой поток в 1 лм, равномерно распределенный по этой поверхности.

Все эти единицы измерения фотометрических величин входят в Международную систему единиц СИ, а кандела является основной единицей в системе СИ наряду с метром, килограммом, секундой и ампером.

Для приведения в соответствие друг с другом энергетических и фотометрических величин измеряют энергетическую величину потока излучения $\Phi_{\text{э}}$, который создает источник с силой света в 1 кд, излучающий на длине волны 555 нм в телесном угле 1 стер (при этом световой поток равен 1 лм).

Мощность такого излучения (поток излучения) оказывается равной $1/683 \text{ Вт}$, так что *источнику с силой света в*

1 кд соответствует источник, излучающий в единицу телесного угла мощность $1/683 \text{ Вт}$ на длине волны 555 нм (т.е. в области максимальной чувствительности глаза).

Соответственно, потоку излучения в 1 Вт на длине волны 555 нм соответствует световой поток 683 лм.

Для перевода фотометрических величин в энергетические в других диапазонах длин волн следует использовать кривую относительной спектральной чувствительности глаза (Рис 1). Если в каких-либо экспериментах спектральный состав излучения не меняется, то все энергетические и фотометрические величины будут пропорциональны друг другу с одним и тем же коэффициентом пропорциональности.

Заметим, что наряду с рассмотренными величинами важную роль в фотометрии играет *яркость* светящихся протяженных тел или освещаемых поверхностей.

II. Устройство и принцип действия селенового фотоэлемента.

Конструкция полупроводникового фотоэлемента представлена схематически на рисунке 2.

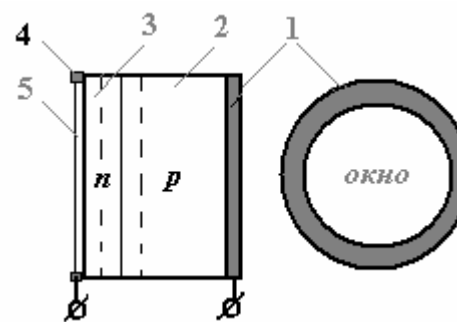


Рис. 2

Используемый в работе селеновый фотоэлемент состоит из железной пластинки круглой формы (1), покрытой слоем

селена с дырочной проводимостью (2), на который нанесен тонкий полупрозрачный слой золота (3), закрытый прозрачным окном (5). Пленка золота соединяется с контактным кольцом (4). От железной пластинки и контактного кольца сделаны выводы для включения фотоэлемента в электрическую цепь. Сам фотоэлемент находится в эбонитовом защитном корпусе.

Принцип работы фотоэлемента заключается в следующем. В результате специальной обработки атомы золота проникают в селен и образуют в нем область с электронной проводимостью. В результате в кристалле селена возникают области с p - и n -проводимостью, между которыми образуется $p - n$ переход. В фотоэлементе область $p - n$ перехода располагается близко к поверхности кристалла, так что свет, проходящий через окно, не успевает существенно поглотиться. Обычно плоскость $p - n$ перехода располагается на расстоянии в несколько десятых долей микрона ($\sim 10^{-7}$ м) от поверхности.

$p - n$ переход представляет собой область объемного заряда (двойной электрический слой), внутри которой существует электрическое поле E .

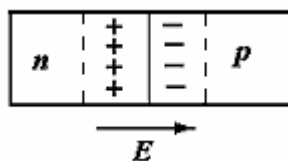


Рис. 3

Это поле направлено так (рис. 3), что на свободный электрон, оказавшийся внутри этого слоя, действует сила, «выталкивающая» его в n -область, а дырки, соответственно, «выталкиваются» в p -область.

Под действием света, падающего на $p - n$ переход, в области объемного заряда образуются электронно-дырочные пары. Физическое явление возникновения в полупроводниках свободных зарядов (электронно-дырочных пар) носит название *внутреннего фотоэффекта*.

Существующее в области $p - n$ перехода электрическое поле будет разделять заряды: дырки будут перемещаться в p -

область, создавая в этой области избыток положительного заряда, а электроны, соответственно, – в n -область, создавая в ней отрицательный заряд. Если теперь соединить контакты фотоэлемента, во внешней цепи возникнет электрический ток, направленный от p - к n - области, который называют *фототоком* (рис. 4).

Величина фототока будет зависеть от числа электронно-дырочных пар, образующихся в области объемного заряда в единицу времени, что, в свою очередь, определяется величиной потока излучения, падающего на фотоэлемент, и спектральным составом излучения.

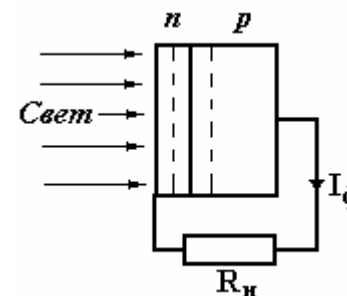


Рис. 4

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание установки.

Прибор, предназначенный для выполнения данной работы, представляет собой горизонтально расположенную трубу, закрытую с торцов и имеющую откидную крышку в средней части. В левой части трубы находится селеновый фотоэлемент, выводы которого подсоединены к клеммам с указанием полярности на торцевой части трубы.

При помощи рукоятки фотоэлемент можно поворачивать вокруг горизонтальной оси, проходящей вдоль диаметра фотоэлемента, на различные углы от нуля до 90° .

Внутри трубы может перемещаться лампочка на подставке, положение которой фиксируется укрепленной в нижней части трубы шкалой с делениями. Нулевое деление шкалы совпадает с плоскостью чувствительного слоя фотоэлемента. Накал нити лампы можно регулировать с помощью реостата.

Внутренность трубы имеет несколько защитных ребер и матовую черную окраску. Ребра и черная окраска предохраняют фотоэлемент от отраженного излучения.

Целью данной работы является опытная проверка основного закона фотометрии, выраженного формулой (*). Однако, поскольку мы не располагаем прибором, измеряющим освещенность в фотометрических единицах, нам придется сравнивать различные значения величины потока излучения, воспринимаемого нашим фотоэлементом. При неизменности спектрального состава излучения можно считать, что его фотометрические и энергетические характеристики пропорциональны друг другу. Величину потока излучения, воспринимаемого фотоэлементом, мы будем оценивать по величине фототока.

Упражнение 1.

Установление зависимости фототока от величины светового потока.

В данном упражнении Вам необходимо убедиться, что для любых двух значений Φ_1 и Φ_2 потока излучения, воздействующего на фотоэлемент, и соответствующих им значений фототока I_1 и I_2 выполняется соотношение

$$\Phi_1 : \Phi_2 = I_1 : I_2.$$

Если излучение падает на фотоэлемент в виде плоской волны перпендикулярно его поверхности, а площадь рабочей поверхности фотоэлемента ограничена диафрагмой, то поток излучения будет пропорционален площади открытого участка фотоэлемента. Имея несколько диафрагм, мы можем менять

величину потока излучения, попадающего на поверхность фотоэлемента.

В данном упражнении необходимо обнаружить прямую пропорциональность между фототоком и площадью поверхности фотоэлемента (квадратом диаметра диафрагмы) для каждого накала нити.

Порядок выполнения.

1. Измерьте штангенциркулем диаметры диафрагм, результат измерений занесите в таблицу. Оцените погрешность измерений.

2. Расположите фотоэлемент прибора перпендикулярно к оси трубы и соедините его клеммы с микроамперметром, соблюдая полярность.

3. Подключите к источнику питания последовательно реостат, лампочку и ключ.

4. Установите внутри прибора собирающую линзу, и в ее фокальную плоскость поместите лампочку так, чтобы на фотоэлемент падал параллельный пучок лучей.

5. Вставляя в прибор различные диафрагмы, определите и запишите в таблицу соответствующие им значения фототока по показаниям микроамперметра. Оцените погрешность измерений.

6. Повторите серию измерений, изменив с помощью реостата накал нити лампы.

Таблица 1

№ опыта	d, мм	d ² , мм ²	I, мкА	ΔI , мкА	$\Delta(d^2)$, мм ²

7. Изобразите на графике зависимость между величиной фототока и площадью (квадратом диаметра) диафрагмы в двух сериях измерений (при различных накалах нити лампы).

8. Убедитесь, что в пределах погрешности измерений величина фототока пропорциональна квадрату диаметра диафрагмы, а значит, по величине фототока можно судить о величине светового потока.

Упражнение 2.

Проверка зависимости освещенности поверхности от угла падения света.

Если поток излучения Φ_0 нормально падает на площадку площадью S , то ее освещенность равна $E_0 = \Phi_0/S$. Если угол падения лучей на площадку площадью S равен α , то на нее попадает поток $\Phi = \Phi_0 \cos \alpha$, а ее освещенность при этом будет равна $E = E_0 \cos \alpha$ (см. рис. 5).

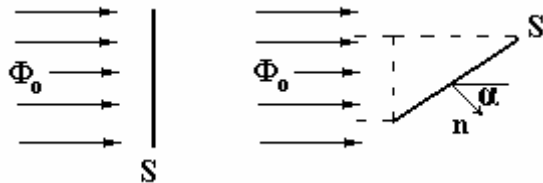


Рис. 5

Порядок выполнения.

1. Вставьте в прибор диафрагму наибольшего диаметра.
2. С помощью реостата отрегулируйте фототок так, чтобы показания амперметра находились в последней четверти шкалы.
3. Поворачивая фотоэлемент вокруг горизонтальной оси, меняйте угол падения лучей. Для каждого угла фиксируйте значение фототока. Результаты измерений (не мене 4-х) занесите в таблицу.

Таблица 2

№ опыта	α , град	$\cos \alpha$	I , мкА

4. Изобразите на графике зависимость между величиной фототока и косинусом угла падения лучей на фотоэлемент.

5. Убедитесь в справедливости соотношения $E = E_0 \cos \alpha$

Упражнение 3.

Проверка зависимости освещенности поверхности от расстояния до точечного источника света

Если некоторая площадка находится от точечного источника света на расстоянии r , то падающий на нее световой поток равен $\Phi = I \Omega$, где I – сила света источника, а Ω – телесный угол, внутри которого распространяется излучение, попадающее на площадку.

Если размеры площадки существенно меньше расстояния до источника r , и если лучи падают нормально в центр площадки, то $\Omega = S/r^2$, где S – площадь площадки.

Поскольку размеры площадки малы, можно считать угол падения лучей одним и тем же для всех точек площадки. Тогда ее освещенность будет равна $E = \Phi/S = I/r^2$.

Порядок выполнения.

1. Удалите из прибора линзу. Расположите фотоэлемент прибора перпендикулярно к оси трубы. Установите диафрагму наименьшего диаметра.

2. Установите лампочку на расстоянии 10 см от фотоэлемента и отрегулируйте фототок так, чтобы показания амперметра находились в последней четверти шкалы.

3. Не изменяя накал нити лампы, перемещайте лампу вдоль трубы и для каждого расстояния лампы от фотоэлемента фиксируйте силу фототока. Результаты измерений занесите в таблицу. Оцените погрешности измерений.

Таблица 3

№ опыта	r, см	I, мкА	$1/r^2$, см ⁻²	ΔI , мкА	$\Delta(1/r^2)$ см ⁻²

4. Изобразите на графике зависимость между величиной фототока и величиной $1/r^2$.

5. Убедитесь в справедливости соотношения $E \sim 1/r^2$.

Сделайте выводы о проделанной работе.

Вопросы для получения допуска к выполнению лабораторной работы.

1. Сформулируйте цель работы.
2. Какие задания Вы будете выполнять в данной работе, в какой последовательности, и какие приборы будут Вами использованы для выполнения каждого из этих заданий?
3. Какие физические величины Вы будете измерять непосредственно в данной работе?
4. В какой форме Вы будете представлять результаты Вашей работы?

Вопросы к защите результатов лабораторной работы.

1. Какой раздел физики именуют фотометрией?
2. Какими энергетическими величинами характеризуется электромагнитное излучение?
3. Как построена система физических величин фотометрии? Что является основной физической величиной в фотометрии?
4. Как строится система единиц измерения в фотометрии? Какая единица измерения является эталонной?
5. Как связаны между собой энергетические и фотометрические характеристики светового излучения?
6. Как выводится основной закон освещенности.
7. В каких видах человеческой деятельности необходимо знание фотометрических характеристик излучения?
8. Что такое внутренний фотоэффект в полупроводниках?
9. Как устроен селеновый фотоэлемент?
10. От каких характеристик излучения зависит величина фототока, даваемого селеновым фотоэлементом?
11. Какие выводы Вы сделали по результатам Вашей работы?

Рекомендуемая литература:

1. Г.Я. Мякишев, А.З. Синяков **ФИЗИКА. Оптика. Квантовая физика.** 11 класс. - М.: Дрофа, 2002 г.
2. **ФИЗИКА - 11.** Под ред. А.А. Пинского. М.: Просвещение, 1995 г.