

ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ЗАПИРАЮЩЕМ СЛОЕ

Цель работы: проверить закон обратных квадратов, снять спектральную характеристику фотоэлемента и оценить ширину запрещённой зоны полупроводника.

Приборы и принадлежности: селеновый фотоэлемент, светофильтры, лампа накаливания, микроамперметр.

Объект измерений: фотоэффект в полупроводнике.

Средства измерений: линейка, микроамперметр, угломер.

Теоретическая часть

Внутренним фотоэффектом называется перераспределение электронов по энергетическим состояниям в полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием света. При этом в образце изменяется концентрации носителей тока, что приводит к возникновению фотопроводимости или вентильного фотоэффекта.

При внутреннем фотоэффекте в полупроводниках происходит поглощение фотона с энергией, достаточной для перехода электрона:

- из валентной зоны в зону проводимости: *собственная проводимость* (рис. 1). Это приводит к появлению электронов и дырок, участвующих в создании проводимости полупроводника.



Рис. 1. Зонная энергетическая диаграмма собственной проводимости (ширина запрещённой зоны E_g): 1 – поглощение электроном кванта света с энергией $h\nu$; 2 – потеря электроном энергии

- с примесного уровня атома-донора в зону проводимости: *донорная проводимость* (рис. 2);



Рис. 2. Зонная энергетическая диаграмма примесного полупроводника с донорной (электронной) проводимостью: $\Delta E_{\text{д}}$ – энергия активации примесного уровня, 1 – поглощение кванта света с энергией $h\nu_1$, 2 – потеря электроном энергии

- из валентной зоны на уровень акцепторной примеси с образованием в валентной зоне вакантного энергетического состояния, дырки: *дырочная проводимость* (рис. 3).



Рис. 3. Зонная энергетическая диаграмма примесного полупроводника с акцепторной (дырочной) проводимостью: $\Delta E_{\text{а}}$ – энергия активации примесного уровня, 1 – поглощение кванта света с энергией $h\nu_2$; 2 – потеря электроном энергии

Минимальная энергия, необходимая для образования свободных электрона и (или) дырки, определяет границу внутреннего фотоэффекта:

$$\Delta E = h\nu_{\text{ГП}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{ГП}}}, \quad (1)$$

где ΔE – энергия активации соответствующего уровня проводимости:

- $\Delta E = E_g$ – для собственного полупроводника;

- $\Delta E = \Delta E_{\text{д}}$ – для донорного полупроводника (полупроводника n-типа);
- $\Delta E = \Delta E_{\text{А}}$ – для акцепторного полупроводника (полупроводника p-типа).

Обычно «границей» (или «красной границей») фотоэффекта называют минимальную частоту или максимальную длину волны, определяемую шириной запрещённой зоны:

$$\nu_{\text{ГР}} = \frac{E_g}{h}, \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{ГР}} = \frac{hc}{E_g}, \quad (3)$$

Чем больше квантов света падает на полупроводник, тем (в случае наблюдения фотоэффекта) меньшим становится его сопротивление. Зависимость фотопроводимости полупроводников от освещённости используется в фоторезисторах (фотосопротивлениях).

В настоящей работе используется селеновый фотоэлемент: под действием падающего света в селене возникают электронно-дырочные пары, однако электроны приграничной области селен-золото покидают полупроводник и переходят в металл (дырки в полупроводнике остаются). В результате металл (плёнка золота) приобретает отрицательный потенциал, а полупроводник (селен) – положительный. Таким образом, свет выступает в качестве источника сторонних сил, разделяющих заряды на участке цепи: в элементе возникает фото-ЭДС, которая называется вентильной.

Устройство селенового фотоэлемента, изучаемого в настоящей работе, представлено на рис. 4.



Рис. 4. Устройство селенового элемента

Подложка 1 (материал подложки сталь, стекло, редко – гибкая подложка); слой селена 2, на который с обеих сторон нанесены тонкие полупрозрачные слои 3 и 4 хорошо проводящего материала (электроды).

В работе измеряется фототок в цепи, нагрузочным сопротивлением для источника фото-ЭДС, которой служит сопротивление гальванометра. Поскольку оно мало, то этот ток можно считать током короткого замыкания фотоэлемента.

Взаимосвязь освещённости и фототока фотоэлемента. Освещённостью E плоской поверхности называется отношение светового потока Φ , нормально падающего на эту поверхность, к ее площади S :

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (4)$$

Единица измерения освещённости в СИ – люкс (лк).

Согласно *закону обратных квадратов* фотометрии освещенность E обратно пропорциональна квадрату r и прямо пропорциональна косинусу угла:

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2}, \quad (5)$$

где I – сила света источника, r – расстояние от источника, α – угол падения лучей на поверхность фотоэлемента.

Величина фототока прямо пропорциональна освещённости $I_{\Phi} \sim E$ и она также должна подчиняться закону обратных квадратов:

$$I_{\Phi} : \frac{\cos \alpha}{r^2}. \quad (6)$$

Спектральной характеристикой фотоэлемента называют зависимость его тока короткого замыкания от длины световой волны или энергии фотона $h\nu$ при условии постоянства падающего на фотоэлемент в одну секунду числа фотонов при всех длинах волн λ .

Ввиду того, что интенсивность света лампы накаливания различна для разных длин волн, необходимо делать поправку, учитывающую распределение энергии в спектре излучения вольфрамовой нити, нагретой до определённой температуры. Для этого энергии светового потока, необходимо разделить на

соответствующие коэффициенты A , приведённые в таблице 3 для каждого из светофильтров. Кроме того, светофильтры различаются оптической плотностью, что учитывается коэффициентом B .

Методика проведения измерений и описание установки

Схема установки приведена на рис. 5. Фотоэлемент ФЭ находится в левой части горизонтально расположенного корпуса прибора. На торцевой части корпуса размещены две клеммы, к которым подведены выводы от фотоэлемента (к этим же клеммам присоединяется микроамперметр). Фотоэлемент можно вращать вокруг горизонтальной оси (максимальный угол поворота 90°) при помощи рукоятки, рядом с которой укреплена шкала, служащая для измерения угла поворота. Нулевому положению рукоятки соответствует вертикальное расположение фотоэлемента.

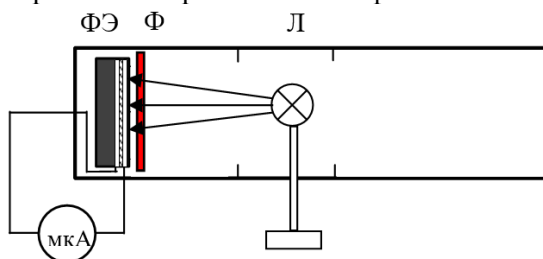


Рис. 5. Схема установки

В нижней части откидной крышки корпуса прибора укреплена шкала, предназначенная для измерения расстояний между фотоэлементом и источником света. Нулевое деление шкалы совпадает с плоскостью чувствительного слоя фотоэлемента. Внутри корпуса имеются несколько защитных рёбер, которые предохраняют фотоэлемент от отражённых лучей света; чёрная матовая окраска внутренней части корпуса защищает фотоэлемент от световых бликов. На стойке закреплена лампочка накаливания Л, которая может передвигаться вдоль оси корпуса в пределах длины шкалы. В левую часть корпуса (справа от фотоэлемента) в оправу можно вставлять необходимые светофильтры Ф, которые

фиксируются в вертикальном положении на стержне оправы. Фотография установки приведена на рис. 6.

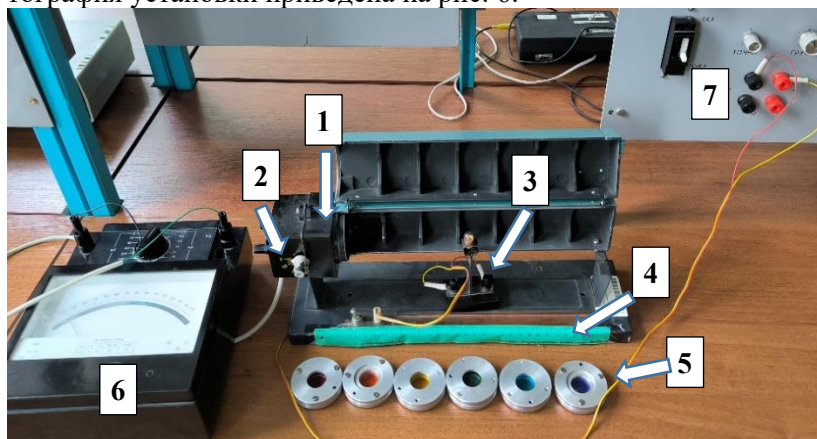


Рис. 6. Фотография установки

1 – фотоэлемент с оправой для установки светофильтров 5, 2 – рукоятка поворота фотоэлемента со шкалой, 4 – шкала измерения расстояний между фотоэлементом и источником света 3, 6 – микроамперметр.

Порядок выполнения работы

Упражнение 1. Проверка закона «обратных квадратов»

1. Рукоятку фотоэлемента установить на ноль шкалы угломера.

2. Лампочку с линзой установить на минимальном расстоянии (6 см) от фотоэлемента.

3. Включить лампочку накаливания и записать начальное показание микроамперметра I_{ϕ} при $\alpha=0$.

4. Меняя угол падения лучей на фотоэлемент, через каждые 10° , записать в таблицу 1 значения фототока I_{ϕ} . Ввиду невысокой точности угломера зависимость величины фототока от угла падения лучей снимается три раза.

Таблица 1

α , град	0	10	20	...	90
$\cos\alpha$					
$I_{\phi 1}$, мкА					
$I_{\phi 2}$, мкА					
$I_{\phi 3}$, мкА					
$I_{\phi \text{ ср}}$, мкА					

5. Установите рукоятку фотоэлемента на ноль шкалы угломера и снимите значения фототока I_{ϕ} при различных значениях расстояния между источником света и фотоэлементом r от 6 см до 26 см с шагом 2 см. Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2

r , м	0,06	0,08	0,1	...	0,26
$1/r^2$, м ⁻²					
$I_{\phi 1}$, мкА					
$I_{\phi 2}$, мкА					
$I_{\phi 3}$, мкА					
$I_{\phi \text{ ср}}$, мкА					

Обработка результатов измерений. Вычислите значения косинусов углов падения и среднее значение фототока для каждого угла, занесите в таблицу 1. Постройте график зависимости фототока насыщения от косинуса угла падения. Сделайте вывод о характере зависимости освещённости ($E \sim I_{\phi}$) от угла падения лучей на поверхность фотоэлемента.

Вычислите значения $1/r^2$ и среднее значение фототока для каждого расстояния, занесите в таблицу 2. Постройте график зависимости фототока насыщения от $1/r^2$. Сделайте вывод о характере зависимости освещённости ($E \sim I_{\phi}$) от расстояния между источником и фотоэлементом.

Упражнение 2. Снятие спектральной характеристики фотоэлемента и оценка ширины запрещённой зоны полупроводника.

Изменение длины волны света, падающего на фотоэлемент, производится в данной работе при помощи набора светофильтров.

1. Установите источник света на минимальном расстоянии (6 см) от фотоэлемента.

2. Поочередно меняя светофильтры, запишите показания микроамперметра I_ϕ в таблицу 3.

Таблица 3

№ п/п	Светофильтр	I_ϕ , мкА	I_ϕ/AB	A	B	λ , нм	$h\nu$, эВ
1	Красный			53	0,97	650	
2	Оранжевый			26	0,97	565	
3	Жёлтый			10	0,96	530	
4	Зелёный			4	0,38	510	
5	Синий			3	0,98	450	
6	Фиолетовый			1	0,8	420	

Обработка результатов измерений. Вычислите энергию фотона излучения, пропускаемого каждым светофильтром:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (7)$$

где $c=3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, $h=6,6 \cdot 10^{-23}$ Дж·с = $4,1 \cdot 10^{-15}$ эВ·с – постоянная Планка.

Значение фототока I_ϕ для отдельного светофильтра разделите на коэффициенты A и B .

Постройте график зависимости фототока I_ϕ/AB от энергии фотона $h\nu$. Проведите касательную к низкоэнергетическому склону кривой этой зависимости, определив точку пересечения с осью абсцисс $h\nu_{ГР}$. Данное значение дает представление о ширине запрещенной зоны полупроводника $E_g = h\nu_{ГР}$ (эВ). Найдите красную границу фотоэффекта: $\nu_{ГР} = h\nu_{ГР}/h$ и $\lambda_{ГР} = c/\nu_{ГР}$.

Контрольные вопросы

1. Чем внутренний фотоэффект отличается от внешнего?
2. Что называется фотопроводимостью?
3. Что называется красной границей фотоэффекта? Как рассчитать $\lambda_{кр}$?
4. Опишите механизм собственной и примесной проводимости с помощью зонных диаграмм (рис. 1-3)
5. Что такое энергия активации?
6. Что называется фото-ЭДС?
7. Что такое освещённость поверхности и как она зависит от угла падения параллельного пучка света?
8. Сформулируйте закон «обратных квадратов».
9. Для чего при расчётах используются коэффициенты А и В?
10. Что показывает спектральная характеристика фотоэлемента?

Рекомендуемая литература

В качестве литературы по фотоэффекту можно рекомендовать [1, §9; 2, §202-204]. Там же можно найти ответы на некоторые контрольные вопросы.

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. С.-Пб.: Лань, 2022. – 320 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Академия, 2006. – 560 с.