

Лабораторная работа ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Цель работы: изучение зависимости фототока в сернистом свинце от напряжения и освещенности.

Общие сведения

Явление уменьшения электрического сопротивления вещества под действием излучения было открыто в 1873 г. Его причиной является перераспределение электронов по энергетическим состояниям в полупроводниках и диэлектриках, происходящее под действием света, которое впоследствии было названо *внутренним фотоэффектом*.

Состояния электронов в атоме характеризуются только вполне определенными значениями энергии, которые называют энергетическими уровнями. В твердом теле отдельные уровни энергии электронов в атомах трансформируются в *энергетические зоны*, имеющие конечную энергетическую ширину.

Зону энергий, соответствующую наивысшему заполненному электронами уровню, называют *валентной зоной*, так как состояния с этими значениями энергии заполняются валентными электронами атомов. Ближайшую к валентной зоне энергетическую зону, соответствующую не занятой электронами разрешенной совокупности состояний, называют *зоной проводимости*. Области разрешенных значений энергии отделены друг от друга областями запрещенных значений, называемых *запрещенной зоной*.

Электроны в зонах с полностью заполненными состояниями не дают вклада в электропроводность кристалла, так как все разрешенные состояния в зоне заняты и перемещение из одного места в другое невозможно. Если энергетическая зона заполнена электронами не полностью, то ее электроны при наложении электрического поля могут создавать ток. При переходе из валентной зоны в зону проводимости электрон становится носителем тока (отсюда и название зоны). Однако и образовавшееся при этом свободное состояние валентной зоны (*дырка*) ведет себя как свободный носитель тока. Заполняясь электронами с нижележащих уровней, дырки перемещаются по направлению поля как положительные заряды (+e).



Рис. 1. Структура энергетических зон

Чтобы обеспечить электропроводность полупроводника, необходимо сообщить электронам некоторую энергию, которая определяется шириной запрещенной зоны. Так как ширина запрещенной зоны полупроводников невелика, то даже в отсутствие освещения в полупроводнике происходит непрерывная генерация электронов и дырок, обусловленная тепловыми колебаниями решетки. Наряду с генерацией носителей тока осуществляется и обратный процесс – рекомбинация, т. е. переход электронов из состояний зоны проводимости в состояния валентной зоны.

В результате одновременно протекающих процессов тепловой генерации и рекомбинации в полупроводнике устанавливается равновесная концентрация электронов n_i и дырок p_i , зависящая от температуры и ширины запрещенной зоны. Для собственного полупроводника (т. е. полупроводника, свободного от примесей) эти концентрации можно считать равными. Собственная концентрация носителей заряда обуславливает так называемый темновой ток (ток в отсутствии освещения).

Электропроводность материалов (величина, обратная удельному сопротивлению $\sigma = 1/\rho$) зависит от концентрации и подвижности свободных носителей зарядов. Для полупроводников σ определяется выражением:

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p) = e(\mu_p + \mu_n)n,$$

где e – электрический заряд электронов; p и n – концентрация дырок и электронов в полупроводнике; μ_p и μ_n – подвижность дырок и электронов; и учтено, что в случае собственной проводимости $p = n$.

При освещении полупроводника светом с энергией фотонов $h\nu > \Delta\mathcal{E}_g = \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_v$ появляется дополнительный механизм генерации носителей заряда – фотогенерация, который приводит к возникновению избыточной концентрации электронов Δn и дырок Δp , относительно равновесной n_i и p_i , и, следовательно, к увеличению проводимости полупроводника. Увеличение проводимости полупроводника под действием света называется *фотопроводимостью*. Величина фотопроводимости собственных полупроводников определяется выражением:

$$\sigma_{\text{ф}} = e(\mu_p + \mu_n)\Delta n. \quad (1)$$

Однако далеко не каждый фотон, падающий на поверхность полупроводника, породит фотоэлектрон. Часть фотонов отражается от поверхности полупроводника. Значительная часть фотонов отдает свою

энергию остову кристаллической решетки, т. е. превращается в тепло. Только незначительная часть падающих фотонов порождает фотоэлектроны.

В результате количество вышедших электронов dN_e оказывается пропорционально количеству фотонов dN_ϕ , падающих на поверхность металла в течение интервала времени dt :

$$dN_e = KdN_\phi = g_\phi dt ,$$

где K называют *квантовым выходом* фотоэффекта, g_ϕ – *интенсивностью фотогенерации*. Освещенность E , определяемая как количество энергии, падающей на единицу площади S поверхности в единицу времени при облучении монохроматическим светом, пропорциональна потоку dN_ϕ/dt фотонов

$$E = \frac{h\nu}{S} \frac{dN_\phi}{dt} .$$

Отсюда интенсивность фотогенерации

$$g_\phi = KSE/(h\nu) \quad (2)$$

также пропорциональна падающему световому потоку $\Phi = ES$.

Переход электронов в зону проводимости происходит не только под действием квантов света, но и под действием тепловой энергии. Скорость изменения концентрации электронов (дырок) определяется выражением: $dN_1/dt = g_T + g_\phi$, где g_T – интенсивность термогенерации, т. е. число электронов, которые переходят за одну секунду в зону проводимости в результате тепловых колебаний решетки.

Как отмечалось ранее, одновременно с процессом генерации свободных электронов идет процесс рекомбинации электронов и дырок, т. е. возвращение электронов из зоны проводимости на свободные места в валентной зоне. Рекомбинация электронов и дырок сопровождается уменьшением концентрации свободных носителей зарядов. Скорость рекомбинации пропорциональна числу дырок и числу свободных электронов: $dN_2/dt = \alpha np = \alpha n^2$, где α – коэффициент рекомбинации.

В стационарном состоянии скорости генерации и рекомбинации равны:

$$g_T + g_\phi = \alpha n^2 .$$

В темноте $g_\phi = 0$. Поэтому можно записать, что темновая равновесная концентрация свободных электронов $n_T = \sqrt{g_T/\alpha}$. Тогда концентрация фотоэлектронов:

$$\Delta n = n - n_T = \frac{\sqrt{g_T}}{\sqrt{\alpha}} \left(\sqrt{1 + \frac{g_\phi}{g_T}} - 1 \right). \quad (3)$$

Рассмотрим два предельных случая.

1. Световой поток мал. Тогда $g_\phi/g_T \ll 1$ и $\sqrt{1 + g_\phi/g_T} \approx 1 + g_\phi/(2g_T)$.

Подставляя последнее выражение в (3) и, воспользовавшись (2), получаем:

$$\Delta n \approx \frac{KS}{2h\nu\sqrt{\alpha g_T}} E.$$

Тогда из (12.1) для фотопроводимости полупроводника получаем:

$$\sigma_\phi \approx \frac{e(\mu_p + \mu_n)KS}{2h\nu\sqrt{\alpha g_T}} E. \quad (4)$$

Таким образом, при слабой освещенности полупроводника фотопроводимость прямо пропорциональна падающему световому потоку.

2. Интенсивность светового потока велика, $g_\phi \gg g_T$. Тогда из (2), (3) следует:

$$\Delta n \approx \sqrt{KSE/(\alpha h\nu)}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (1), получим:

$$\sigma_\phi \approx e(\mu_p + \mu_n) \sqrt{\frac{KS}{\alpha h\nu}} \sqrt{E}, \quad (6)$$

т. е. фотопроводимость $\sigma_\phi \sim \sqrt{E}$.

Однако при больших световых потоках внутренний фотоэффект сопровождается различными вторичными явлениями, также порождающими нелинейность зависимости (рекомбинацией носителей тока в объеме и на поверхности, захватом носителей, дефектами решетки и др.), которые не учитывались в рассмотрении. Поэтому (6) справедливо лишь в первом приближении.

Таким образом, концентрация фотоэлектронов (дырок) Δn и фотопроводимость σ_ϕ пропорциональны E^γ , где E – освещенность, а значение γ лежит в пределах от 0.5 до 1.0. Коэффициент γ можно определить экспериментально по зависимости стационарного фототока в полупроводнике от его освещенности, так как фототок пропорционален концентрации носителей заряда.

Исследуемые закономерности

Объектом исследования является *фотосопротивление* (рис. 2) – тонкий слой 1 полупроводникового материала, нанесенный на изолирующую пластинку 2. На краях слоя расположены электроды 3. Вся конструкция монтируется в пластмассовый корпус 4.

При отсутствии освещения в цепи протекает темновой ток I_T , зависящий от приложенного напряжения и темнового сопротивления. При освещении ток I в цепи больше темнового тока. Разность между током при освещении и темновым током составляет фототок I_ϕ .

Характеристиками фотосопротивления являются интегральная чувствительность, зависимость чувствительности от длины волны падающего излучения (спектральная характеристика) и от освещенности (световая характеристика), рабочее напряжение, темновое сопротивление.

Интегральная чувствительность в общем случае вычисляется как отношение фототока I_ϕ к освещенности E : $\Gamma = I_\phi / E$.

Если фотосопротивление используется для регистрации излучения видимой части спектра, чувствительность выражают в амперах (чаще микроамперах) на люмен. Поскольку чувствительность фотосопротивления зависит от спектрального состава падающего излучения, при определении чувствительности необходимо указывать, каким источником создавалось излучение. Для определения чувствительности фотосопротивления в видимой части спектра источником излучения обычно служит лампа накаливания с вольфрамовой нитью при температуре 2840 К.

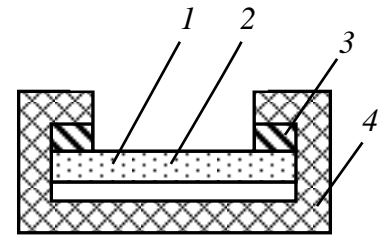


Рис. 2. Устройство фотосопротивления

Величина фототока зависит не только от лучистого потока, но и от приложенного напряжения, поэтому при задании чувствительности необходимо либо указывать рабочее напряжение U , либо пользоваться понятием удельной чувствительности

$$\Gamma_U = I_\phi / (UE). \quad (7)$$

Для точечного источника $E = J/r^2$, где J – сила света источника. Поэтому зависимость фототока от освещенности может быть представлена как

$$I_\phi = U_\phi / R = U_\phi S \sigma_\phi / l = CE^\gamma = C(J/r^2)^\gamma,$$

10	Темновой, I_T							
	При освещении, I							
	Фототок, I_ϕ							
15	Темновой, I_T							
	При освещении, I							
	Фототок, I_ϕ							
Освещенность E , лк								

3. Снять световые характеристики фотосопротивления при напряжении 10 и 15 В. Для этого, поддерживая напряжение постоянным, изменять расстояние a между фотосопротивлением и источником света от 10 до 40 см через 5 см и измерять ток I . Результаты измерений записать в табл. 2.

Указания по обработке результатов

1. Построить графики зависимости темнового тока и фототока от напряжения при двух значениях освещенности (три кривые расположить на одном чертеже). Освещенность вычислять по формуле $E = J/a^2$, где J – сила света (указана на приборе); a – расстояние от лампы до фотосопротивления.

2. Вычислить $I_\phi = I - I_T$. Построить график зависимости фототока I_ϕ от освещенности E для двух напряжений (10 и 15 В).

3. Вычислить удельную чувствительность фотосопротивления (7) при рабочем напряжении $U = 15$ В и освещенности $E = 500$ лк. Площадь сечения полупроводникового слоя S указана на установке.

4. Приняв за r_0 минимальное расстояние r_{\min} , а за $I_{\phi 0}$ фототок при этом минимальном расстоянии, построить зависимость $\ln\left(\frac{I_\phi}{I_{\phi 0}}\right) = f\left(\ln\left(\frac{r}{r_0}\right)\right)$.

Таблица 3

Определение зависимости фототока от освещенности

$r_0 = r_{\min} =$			$I_{\phi 0} = I_{\phi \max} =$		
r , см	r/r_0	$\ln r/r_0$	I_ϕ , В	$I_\phi/I_{\phi 0}$	$\ln(I_\phi/I_{\phi 0})$

5. Используя экспериментальные значения, соответствующие линейному участку зависимости, вычислить γ и его погрешность. Результаты расчетов занести в табл. 3.

7. Сделать заключение по полученным результатам.

Контрольные вопросы

1. Что такое валентная зона, зона проводимости и запрещенная зона?
2. Что такое фоторезистор и как меняются его свойства под действием света?
3. Какие зависимости исследуются в данной работе?
4. Какова зависимость фототока от освещенности?
5. Как определяется коэффициент γ и его погрешность?