

## Исследование характеристик фоторезистора

### Цель работы

Ознакомиться с принципом действия фоторезистора и исследовать его вольт-амперные, световые и спектральные характеристики, оценить ширину запрещенной зоны материала фоторезистора.

### Введение

Фоторезистором называется полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого уменьшается под действием света. Конструктивные элементы фоторезистора показаны на рис.1.

На изолирующую подложку 1 наносится тонкий слой полупроводника 2 (фоточувствительный слой). Затем по краям этого слоя наносятся металлические электроды 3. Для предохранения фоточувствительного слоя его покрывают тонким слоем лака, прозрачного в области спектральной чувствительности материала. Прибор заключен в защитный корпус с открытым окном. Электроды 3 соединяются с выводными клеммами, с помощью которых прибор включается в электрическую цепь последовательно с источником напряжения, как показано на рис.1.

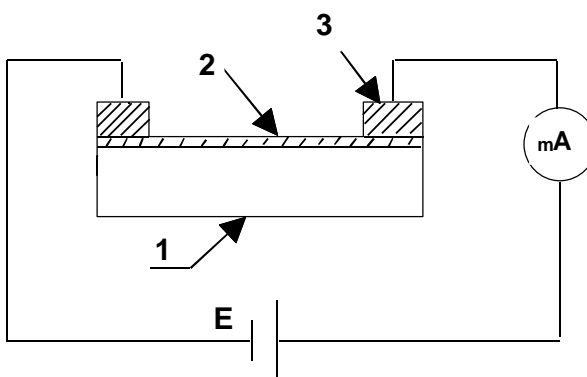


Рисунок 1

Под действием света в полупроводнике создаются свободные носители заряда. Это явление называется внутренним фотоэффектом, а дополнительная

проводимость, приобретенная полупроводником под действием света, называется фотопроводимостью.

Рассмотрим это явление вначале на примере химически чистого (собственного) полупроводника. При абсолютном нуле все энергетические уровни валентной зоны заняты электронами, а зона проводимости свободна (рис. 2,а). Для образования свободных носителей заряда электронам необходимо сообщить энергию, достаточную для преодоления запрещенного энергетического зазора - ширины запрещенной зоны  $\Delta E_0$ . Поэтому в темноте при температуре абсолютного нуля полупроводник является изолятором.

Если полупроводник нагреть, то вследствие теплового возбуждения атомов отдельные электроны могут получить энергию, достаточную для перехода в зону проводимости (рис 2, б). При заданной температуре кристалла установится равновесная концентрация электронов в зоне проводимости  $n_0$  и дырок в валентной зоне  $p_0$ . Электропроводность полупроводника, обусловленная тепловым возбуждением, называется темновой проводимостью

$$\sigma_0 = n_0 e \mu_n + p_0 e \mu_p, \quad (1)$$

где  $\mu_n$  и  $\mu_p$  - подвижности электронов и дырок соответственно,  $e$  - заряд носителя тока.

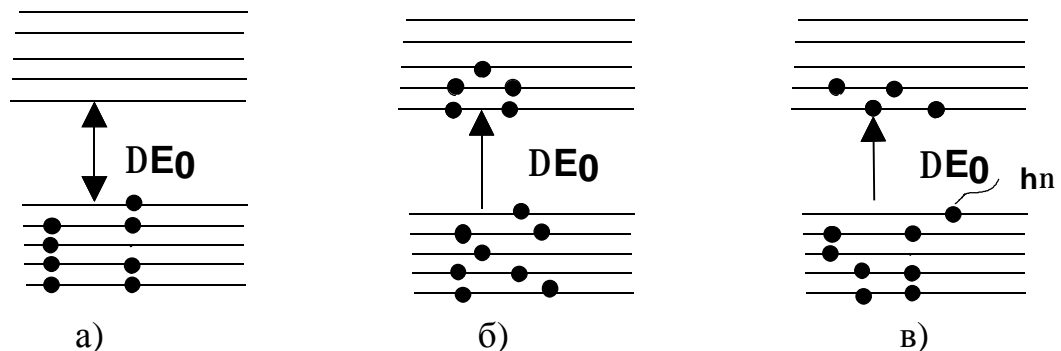


Рисунок 2

При освещении полупроводника наряду с термической ионизацией появление свободных носителей обусловлено внутренним фотоэффектом. Поглощая квант света, атом ионизируется, т.е. один из его валентных электронов переходит в зону проводимости (рис. 2,в), а в валентной зоне возникает дырка. Очевидно, такой переход электрона будет возможен, если энергия фотона равна или несколько больше ширины запрещенной зоны,

$$h\nu \geq \Delta E_0. \quad (2a)$$

По аналогичной схеме процесс фотоионизации протекает и в примесном полупроводнике. В донорных полупроводниках фотоны переводят электроны с донорных уровней в зону проводимости (рис. 3,а); в акцепторных – вызывают переход электронов из валентной зоны на акцепторные уровни (рис.3,б).

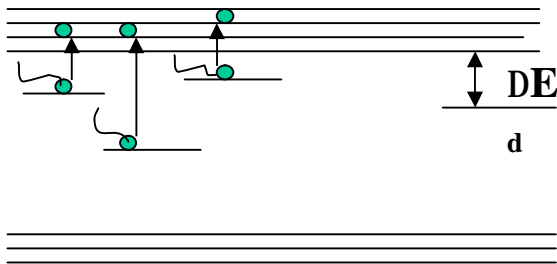


Рисунок 3а

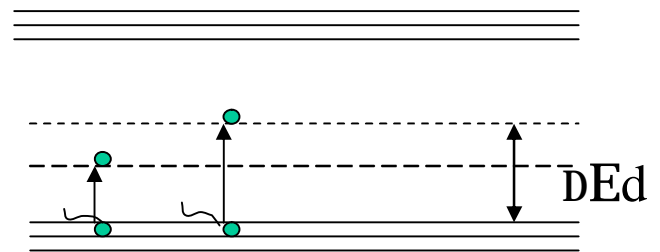


Рисунок 3б

В первом случае возрастает концентрация свободных электронов, во втором – концентрация дырок. Процесс примесной фотоионизации проходит при условии

$$h\nu \geq \Delta E_a \quad , \quad (26)$$

где  $\Delta E_a$  – энергия активации примесных атомов.

Кроме процессов генерации свободных носителей заряда, имеет место и обратный процесс – их рекомбинация.

Средний промежуток времени от момента генерации носителя до его рекомбинации называется временем жизни. Обозначим времена жизни электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне как  $\tau_n$  и  $\tau_p$ . Пусть в единицу времени в единице объема собственного полупроводника генерируется  $f_2$  пар носителей заряда. Тогда, если интенсивность света не

меняется с течением времени, установившиеся значения избыточных концентраций электронов и дырок равны

$$\Delta n = f_2 \tau_n \quad ; \quad \Delta p = f_2 \tau_p \quad . \quad (3)$$

Генерация  $f_2$  пропорциональна количеству квантов света, поглощенных в единицу времени в единице объема:

$$f_2 = \beta \alpha \tau \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $\beta$  – квантовый выход, т.е. число пар электрон-дырка, создаваемых одним фотоном. Для используемого в нашей работе диапазона энергий фотона  $\beta = 1$ .

Таким образом, под действием света концентрации электронов и дырок в полупроводнике изменяются и становятся равными  $n_0 + \Delta n$  и  $p_0 + \Delta p$ , а электропроводность становится равной

$$\sigma = n_0 e \mu_n + p_0 e \mu_p + \Delta n e \mu_n + \Delta p e \mu_p \quad , \quad (5)$$

или с учетом выражения (1)

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{\phi} \quad , \quad (6)$$

где второе слагаемое и есть фотопроводимость

$$\sigma_{\phi} = \Delta n e \mu_n + \Delta p e \mu_p \quad , \quad (7)$$

или

$$\sigma_{\phi} = e f_2 (\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p) \quad . \quad (8)$$

Отсюда видно, что время жизни определяет кинетику фотопроводимости. В полупроводниках, из которых оказалось возможным изготовить фоторезисторы, носители заряда обладают достаточно большим временем жизни  $\tau \propto 10^2 \text{ L } 10^{-5} \text{ с}$ .

При приложении к фоторезистору напряжения  $U$  будет протекать ток

$$I_c = \frac{\sigma Su}{I} = \frac{(\sigma_0 + \sigma_\phi)SU}{I} = \frac{\sigma_0 SU}{I} + \frac{\sigma_\phi SU}{I} = I_0 + I_\phi \quad , \quad (9)$$

где  $I_c$  называется световым током,  $I_0$  – темновой ток,  $I_\phi$  – фототок.

Если  $I_\phi \gg I_0$ , то световой ток практически совпадает с фототоком.

Спектральной характеристикой называется зависимость фототока от длины волны света при постоянной мощности падающего излучения  $I_\phi = f(\lambda)_{\varepsilon=const}$ . Фототок появляется начиная с длины волны  $\lambda_0 = hc/\Delta E_0$ , что соответствует формуле (2а), где  $\lambda_0$  называется длинноволновой границей поглощения или краем собственного поглощения. Следовательно, зависимость фототока от длины волны должна иметь вид ступени (рис.4,а). Однако такая зависимость возможна только при абсолютном нуле. При увеличении температуры тепловое движение атомов приводит к тому, что фототок появляется также при длинах волн, больших  $\lambda_0$  (рис.4,б). Длина волны  $\lambda_0$  определяется по спаду кривой.

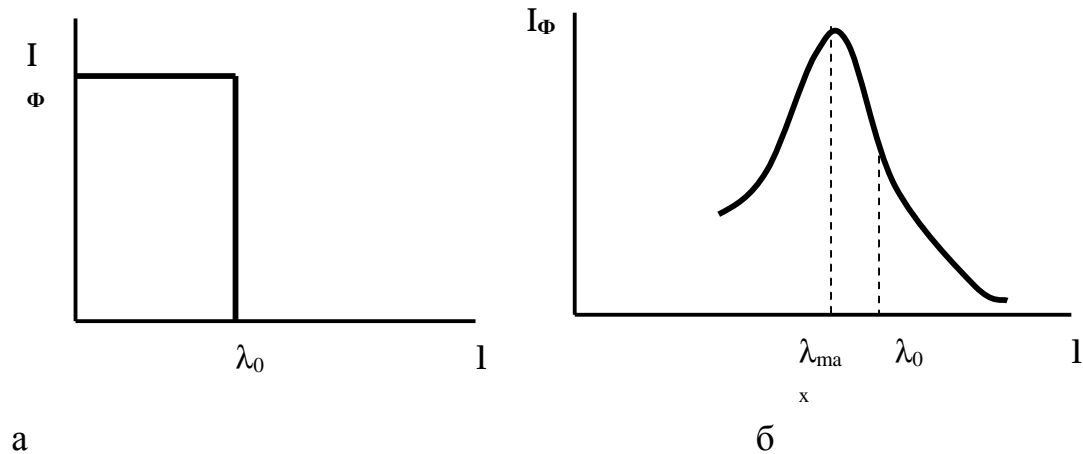


Рисунок 4

В случае примесного полупроводника  $\lambda_0$  сдвинута в сторону более длинных волн (рис.5), так как для ионизации с примесных уровней достаточны фотоны с меньшей энергией.

У реальных фоторезисторов наблюдается уменьшение фототока в области коротких длин волн  $\lambda < \lambda_{\max}$ , хотя энергии квантов этого света более чем достаточно для возникновения фотопроводимости. Это связано с тем, что с уменьшением  $l$  возрастает коэффициент поглощения  $\alpha$  (рис.б) и вся световая энергия поглощается не в объеме, а лишь в тонком приповерхностном слое полупроводника, причем толщина слоя тем меньше, чем меньше длина волны падающего света.

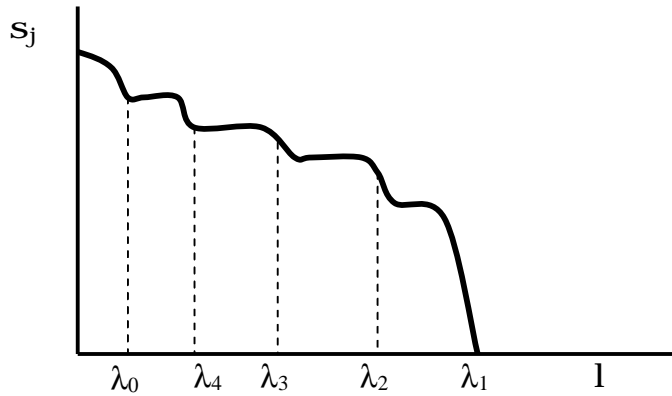


Рисунок 5

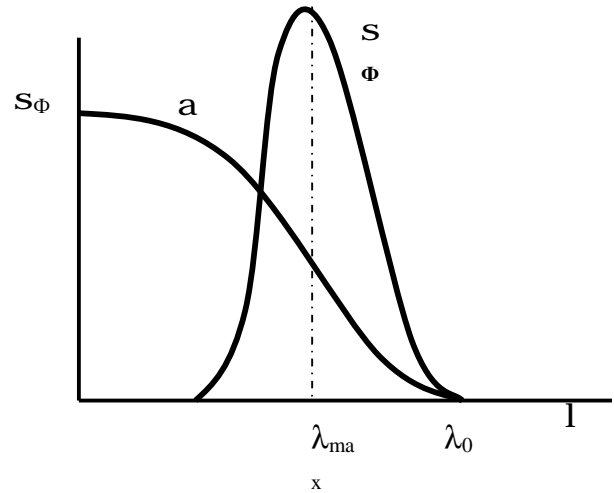


Рисунок 6

Так как при заданной интенсивности света  $I_{св}$  генерация неравновесных носителей пропорциональна коэффициенту поглощения  $\alpha$ , то вблизи поверхности образуется повышенная концентрация неравновесных носителей заряда, которые эффективно рекомбинируют на поверхностных состояниях, не успевая диффундировать в объем кристалла. Для этого процесса на рис.б показана зависимость коэффициента поглощения и фотопроводимости от длины волны  $\lambda$ .

### Описание экспериментальной установки

Вольт-амперная и световая характеристики фоторезистора снимаются по схеме рис.7. Фоторезистор освещается с помощью электрической лампочки. Для изменения светового потока расстояние от фоторезистора до лампочки можно изменить и зафиксировать. Световой поток определяется по формуле

$$\Phi = IS/r^2, \quad (10)$$

где  $I$  – сила света источника,  $S$  – площадь активной поверхности фоторезистора,  $r$  – расстояние между фоторезистором и источником света.

Спектральная характеристика снимается по схеме рис.8.

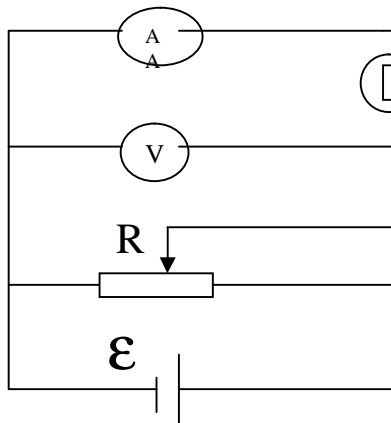


Рисунок 7

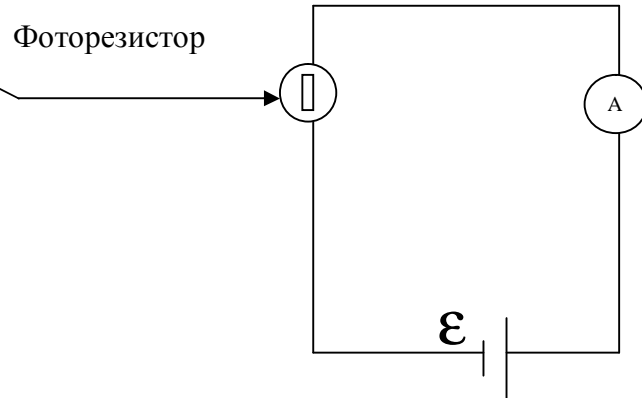


Рисунок 8

Свет от источника падает на входную щель монохроматора, ширина которой должна быть постоянной в течение всего эксперимента. Фоторезистор устанавливается у входной щели монохроматора. Длина волны света, падающего на фоторезистор, определяется по градуировочной кривой зависимости длины волны от числа делений на барабане монохроматора.

Так как различным длинам волн  $\lambda$  соответствует разная мощность излучения  $\epsilon_\lambda$ , то для построения спектральной характеристики значения величин фототока, снимаемых по показаниям микроамперметра, следует пересчитать, приводя их к постоянной освещенности фоторезистора. Пересчет проводится по формуле

$$I_\Phi = I'_\Phi \epsilon_{\max} / \epsilon_\lambda, \quad (11)$$

где  $I'_\Phi$  – измеренное значение фототока.

Значения  $\epsilon_{\max}$  и  $\epsilon_\lambda$  берутся из графика зависимости  $\epsilon_\lambda = f(\lambda)$ , который прилагается к работе.

## Задание к работе

1. Снять три вольт-амперные характеристики фоторезистора при различных постоянных значениях светового потока  $\Phi = 0$ ,  $\Phi = \Phi_1$ ,  $\Phi = \Phi_2$ . Значение  $\Phi$  определяется при расстоянии  $r$ , задаваемом преподавателем.
2. Снять три световые характеристики при трех различных значениях напряжения на фоторезисторе.
3. По схеме, показанной на рис.б, снять спектральную характеристику фоторезистора. Источником света служит лампа с вольфрамовой нитью накаливания. Построить график зависимости  $I_{\Phi} = f(\lambda)_{E=\text{const}}$ .
4. Определить ширину запрещенной зоны полупроводника, из которого изготовлен фоторезистор.

## Контрольные вопросы

1. Какое явление называется внутренним фотоэффектом?
2. Что такое фотопроводимость, фототок?
3. Объясните механизм фотопроводимости в собственном и примесном полупроводниках.
4. В чем состоит принцип действия фоторезистора?
5. Как изменяются световые и вольт-амперные характеристики фоторезистора при возрастании светового потока?
6. Какая зависимость называется спектральной характеристикой фоторезистора? Какой она имеет вид?
7. Объясните спектральную зависимость фототока в собственной и примесной области поглощения.
8. Почему на спектральной характеристике наблюдается уменьшение фотопроводимости при уменьшении длины световой волны?
9. Что такое рекомбинация и время жизни носителей заряда?
10. Как оценить ширину запрещенной зоны полупроводника, из которого изготовлен фоторезистор?

## Литература

1. Епифанов Г.И. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1977, § 60.
2. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. – М.: Сов.радио, 1971. - С.219-224.
3. Бушманов В.Н., Хромов Ю.А. Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 1991. – С.149-152.