

# ФОТОПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

## Цель работы:

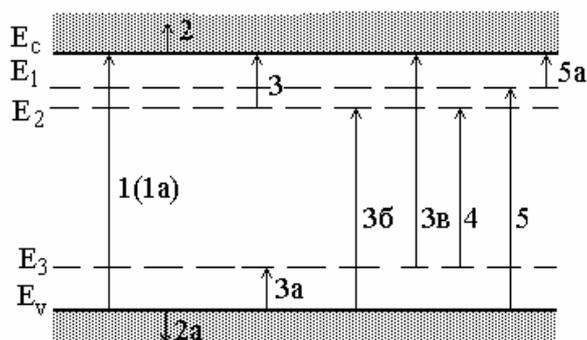
1. Ознакомиться с внутренней ионизацией полупроводников под действием света на примере работы полупроводниковых фотоприемников.
2. Построить спектральную зависимость фотопроводимости и определить энергию оптического перехода.
3. Получить осциллограмму фотопроводимости при импульсном освещении и определить время жизни неравновесных носителей.

## ВВОДНАЯ ТЕОРИЯ

### *Оптическая генерация носителей в полупроводниках и диэлектриках*

При освещении полупроводника происходит процесс внутренней ионизации под действием света. Он приводит к образованию дополнительных носителей заряда, которые называются неравновесными, в отличие от носителей заряда, которые появляются в результате термической генерации, и находятся в термодинамическом равновесии с решеткой. Эффект появления дополнительных неравновесных носителей заряда называется внутренним фотоэффектом, а добавочную к термически генерированным носителям проводимость называют фотопроводимостью.

Появление неравновесных носителей при поглощении света веществом происходит в результате электронных переходов. На рис. 1 представлена схема электронных переходов, возникающих в полупроводнике при поглощении света.



**Рис. 1.** Схема электронных переходов, возникающих в полупроводнике при поглощении света:

$E_c$  – дно зоны проводимости

$E_v$  – потолок валентной зоны

$E_{1,2,3}$  – примесные уровни

1, 1а – собственное поглощение

2, 2а – поглощение свободными носителями

3, 3а – примесное поглощение (примесь – ближняя зона)

3б, 3в – примесное поглощение (примесь – дальняя зона)

4 – межпримесное поглощение

5 – экситонное поглощение (оптическое возбуждение экситона)

5а – экситонное поглощение (оптический распад экситонов)

Переход типа 1 соответствует собственному поглощению вещества. При поглощении кванта света образуется пара свободных носителей — электрон и дырка. Такое возбуждение называется биполярным. В результате поглощения фотонов локальными несовершенствами кристаллической решетки, которые обеспечивают промежуточные примесные уровни разрешенных энергетических состояний электрона в запрещенной зоне, происходят переходы типа 3 и 4. Переход электронов с примесного уровня в зону проводимости или из валентной зоны на примесный уровень обеспечивают примесное возбуждение. Свободными оказываются лишь носители одного знака. Энергия поглощенного кванта света соответствует энергии перехода. Для собственного поглощения энергия фотона  $h\nu$  должна быть не меньше ширины запрещенной зоны полупроводника  $E_g$ :

$$h\nu \geq \Delta E = E_g \quad (1)$$

Возбужденные светом избыточные электроны и дырки остаются свободными в зоне проводимости и в валентной зоне до тех пор, пока не рекомбинируют или не будут захвачены на локальный энергетический уровень. При поглощении фотона электронно-дырочная пара получает избыточную энергию и квазиимпульс. Равновесное распределение фотоносителей по энергиям и квазиимпульсам устанавливается за время, меньшее времени

нахождения в соответствующих зонах. Поэтому они успевают «термализоваться», т.е. распределение их по энергиям и вазимпульсам становится таким же как для равновесных электронов и дырок.

Полная проводимость полупроводника:

$$\sigma = q (\mu_n n_0 + \mu_p p_0 + \mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p), \quad (2)$$

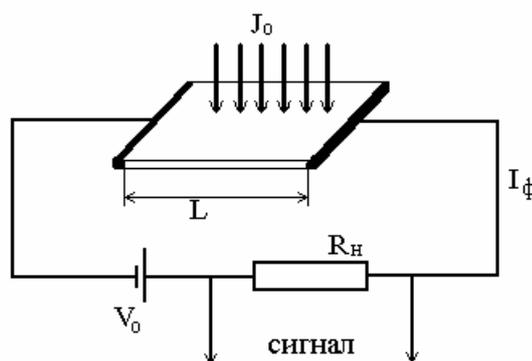
где  $n_0, p_0$  — равновесные концентрации электронов и дырок  
 $\Delta n, \Delta p$  — их неравновесные концентрации.

Проводимость, появляющаяся в результате действия оптического излучения:

$$\sigma_\phi = q (\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p). \quad (3)$$

### *Спектральная зависимость фотопроводимости*

Эффекты поглощения света в полупроводнике находят практическое применение при создании модуляторов световых потоков, фотоприемников и преобразователей световой энергии в электрическую, фотодатчиков. На рис. 2 показано устройство фоторезистора и схема его включения. Фоторезистор — прибор, с помощью которого можно регистрировать световое излучение по фотопроводимости, состоит из чувствительного моно— или поликристаллического полупроводника в виде бруска или пленки с двумя омическими контактами.



**Рис. 2.** Схема устройства и включения в цепь фоторезистора.

$J_0$  — падающее излучение заданной интенсивности

$L$  — длина чувствительного слоя

$R_H$  — нагрузочное сопротивление

$V_0$  — приложенное напряжение

$I_\phi$  — фототок

При  $h\nu \geq E_g$  концентрация неравновесных носителей пропорциональна скорости оптической генерации  $G = \Delta n / \tau$

$$G = N_\phi \eta(\lambda), \quad (4)$$

где:  $N_\phi = J_\phi / h\nu$  — поток фотонов, проникающих через поверхность полупроводника,  $\text{см}^2\text{с}^{-1}$ ,

$J_\phi$  — интенсивность падающего света,

$\eta(\lambda)$  — квантовый выход фотоионизации — число электронно-дырочных пар, образуемых одним квантом света.

Интенсивность излучения спадает вглубь полупроводника по закону Бугера–Ламберта:

$$N_\phi(x) = N_{\phi_0} \exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (5)$$

где  $\alpha(\lambda)$  — коэффициент поглощения, характерный для каждого вещества и зависящий от длины волны.

С учетом отражения от поверхности:

$$N_\phi = N_{\phi_0} [1 - r(\lambda)] \exp(-\alpha x), \quad (6)$$

где:  $r(\lambda)$  — спектральный коэффициент отражения,

$N_{\phi_0}$  — поток фотонов, падающих на поверхность полупроводника.

Фоторезистор должен быть достаточно толстым, чтобы в нем поглощался практически весь свет  $N_{\phi_0}[1 - r(\lambda)]$ , прошедший через освещенную поверхность. Объемная скорость генерации носителей тока в плоскости, находящейся на расстоянии  $x$  от освещаемой поверхности полупроводника определяется уравнением:

$$G(x) = \eta(\lambda) [1 - r(\lambda)] N_{\phi_0} \exp(-\alpha x). \quad (7)$$

Квантовый выход фотоионизации  $\eta(\lambda)$  учитывает, что часть энергии поглощенных фотонов расходуется без образования неравновесных электронов и дырок.

Под действием напряжения  $V$ , приложенного к фоторезистору, созданные светом носители заряда совершают дрейф и создают в цепи ток, который называется фототоком  $I_\phi$ . Каждый носитель заряда за время жизни  $\tau$  проходит через фоторезистор  $\tau/t_{\text{пр}}$  раз, где  $t_{\text{пр}}$  — время пролета или время дрейфа носителя через резистор.

$$t_{\text{пр}} = \frac{L}{v_{\text{др}}} = \frac{L}{\mu E} = \frac{L^2}{\mu V}, \quad (8)$$

где:  $L$  – длина чувствительного элемента,  
 $v_{\text{др}}$  – скорость дрейфа,  
 $\mu$  – подвижность носителей,  
 $E$  – напряженность электрического поля в фоторезисторе,  
 $V$  – разность потенциалов на резисторе.

Сила фототока  $I_{\text{ф}}$  равна произведению числа носителей ежесекундно генерируемых в полупроводнике под действием света  $G$ , заряда электрона и отношения  $t/t_{\text{пр}}$ .

$$I_{\text{ф}} = eG \frac{\tau}{t_{\text{пр}}} = eG \tau \frac{\mu V}{L^2}. \quad (9)$$

Генерация, происходящая в ед. объема в ед. времени, характеризуется соответствующим темпом генерации  $G = \Delta n / \tau$ .

Тогда  $G \cdot \tau = \Delta n$  — число неравновесных носителей в фоторезисторе.

Выражение (9) можно переписать в виде:

$$I_{\text{ф}} = \frac{N_{\text{ф}} \eta(\lambda) \tau \mu V}{L^2} = \eta(\lambda) \frac{I_{\text{фо}} e \tau \mu V}{h \nu L^2} [1 - r(\lambda)], \quad (10)$$

где  $N_{\text{фо}} = I_{\text{фо}} / h \nu$ .

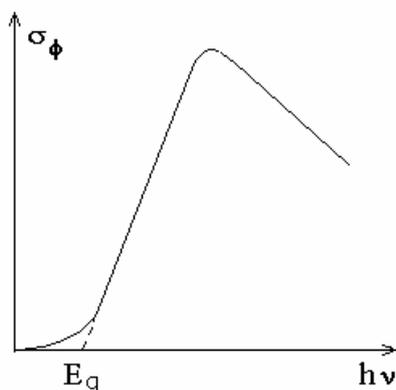
$$\text{Отношение: } \frac{I_{\text{ф}}}{I_{\text{фо}}} = \frac{[1 - r(\lambda)]}{h c l^2} \eta(\lambda) \lambda \tau \mu e V \quad (11)$$

характеризует чувствительность фоторезистора, которая пропорциональна длине волны  $\lambda$  падающего излучения  $I_{\text{фо}}$ , приложенному к фотопроводнику напряжению  $V$ , времени жизни неравновесных носителей  $\tau$ , их подвижности  $\mu$  и обратно пропорциональна квадрату длины чувствительного элемента.

В выражениях (10) и (11)  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж\*с – постоянная Планка,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света.

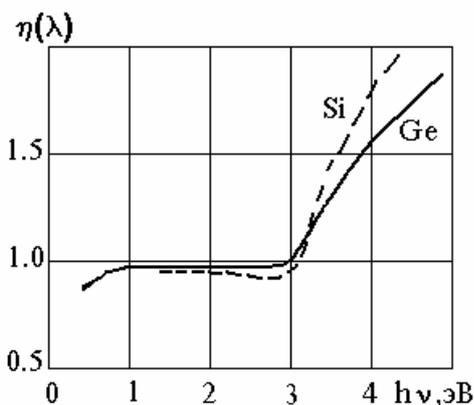
Зависимость электропроводности энергии падающего излучения носит название спектральной зависимости собственной фотопроводимости.

Фотопроводимость возникает при возбуждении только таким излучением, для которого энергия фотонов превышает некоторое пороговое значение. При собственном поглощении пороговая энергия определяется шириной запрещенной зоны, а при примесном – энергией активации соответствующего уровня примесного центра. На рис.3 показан вид спектральной зависимости фотопроводимости полупроводника.

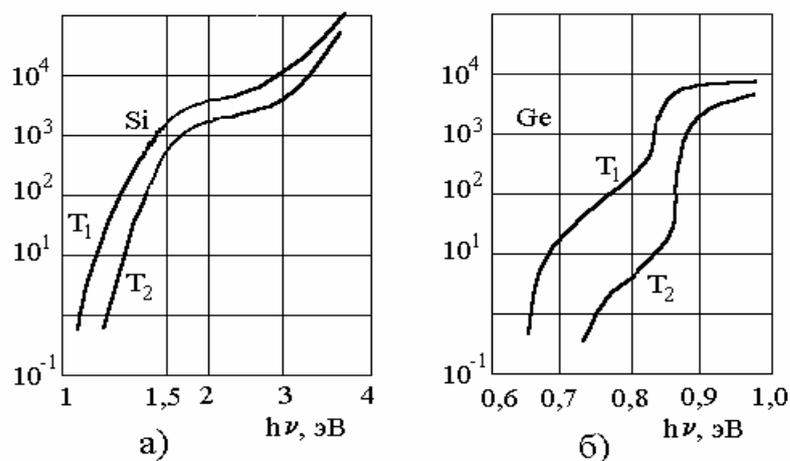


**Рис. 3.** Спектральная зависимость собственной проводимости.

Спектральная зависимость фотопроводимости аналогична зависимостям квантового выхода  $\eta(\lambda)$  коэффициента поглощения  $\alpha(\lambda)$  от энергии квантов ( $E=h \cdot (c/\lambda)$ ) (Рис. 4,5).



**Рис. 4.** Спектральная зависимость квантового выхода германия и кремния.



**Рис. 5.** Спектры поглощения излучения кремния (а) и германия (б),  $T_1=300\text{K}$ ,  $T_2=77\text{K}$ .

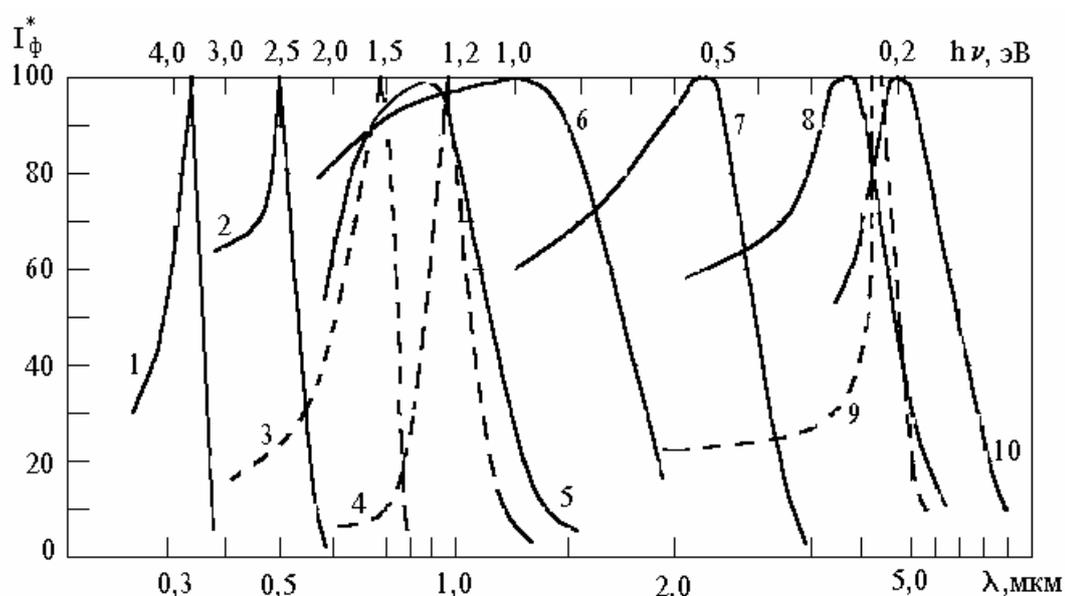
В таблице 1 приведены электрофизические свойства ряда простых и сложных полупроводников, фотоэлектрические свойства которых

используются в приборах. На рис.6 представлено спектральное распределение фототока некоторых полупроводников в области собственного поглощения.

Таблица 1.

	Si	Ge	CdS*	CdSe*	CdTe*	GaAs*	In Sb*
Ширина запрещенной зоны $\Delta E_g$ , эВ	1,15	0,7	2,4	1,7	1,5	1,5	0,2
Подвижность носителей электронов и дырок $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1300 500	3800 1820	200 20	600 -	1500 100	8500 420	78000 750

\*) свойства соединений зависят от формульного состава (стехиометрии) и в данной таблице соответствует составу 50% ат. на 50% ат.



**Рис. 6.** Спектральное распределение фототока полупроводников в области собственного поглощения.

$I_{\phi}^*$  — произвольные единицы;

кривые: 1—ZnS; 2—CdS; 3— CdSe; 4— GaAs; 5— Si; 6— Ge; 7— PbS; 8— PbTe 90К;

9— InSb 5К; 10 — PbSe 90К.

Появление некоторой фоточувствительности при  $h\nu < E_g$  объясняется тем, что тепловые колебания кристаллической решетки, приводят к возникновению флуктуации энергии электронов и значения  $E_g$ . С увеличением энергии фотонов фотопроводимость быстро достигает максимума, а затем начинает уменьшаться. Этот спад объясняется малыми временами жизни носителей заряда в приповерхностном слое полупроводника. где преимущественно

поглощаются фотоны с энергией  $h\nu < E_g$ . Скорость рекомбинации здесь велика и велика также концентрация носителей. У поверхности, кроме того, мала эффективная подвижность носителей заряда из-за многочисленных дефектов. На поверхности и вблизи нее на перенос носителей влияют не только центры захвата, связанные с нарушением периодичности кристаллической решетки полупроводника, но и область пространственного заряда, который обусловлен поверхностными состояниями.

Длинноволновая граница примесной проводимости в соответствии с примесным поглощением сдвинута в сторону больших длин волн относительно собственной фотопроводимости. Коэффициент поглощения в примесной области зависит от интенсивности возбуждающего света, так как вероятность поглощения фотонов определяется степенью заполнения привесных уровней.

На рисунке 3 показано, как по восходящей ветви спектральной зависимости фотопроводимости можно найти наименьшую энергию в области собственного поглощения, соответствующую ширине запрещенной зоны. Оценку ширины запрещенной зоны можно сделать по длине волны, соответствующей максимальной фотопроводимости.

### ***Уравнение непрерывности и фототок при импульсном освещении фоторезистора***

Генерация (G) и рекомбинация (R) носителей задаются теплом и равны соответственно:  $\pm \Delta n/t$ , где  $\Delta n$  учитывает изменение концентрации неравновесных носителей относительно начала процесса за промежутки времени ( $\Delta t$ ).

При захвате носителей на локальные центры происходит наполнение объемного заряда. Темп наполнения объемного заряда равен:

$$\frac{1}{q} \operatorname{div} \int n, \text{ где } q - \text{заряд носителя; } n - \text{плотность тока.}$$

Уравнение непрерывности для фотоэлектронов и фотодырок имеет вид:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G + R + \frac{1}{q} \operatorname{div} \int n. \quad (12)$$

Аналогичным выражением описывается кинетика изменения концентрации дырок.

Полная плотность тока в полупроводнике складывается из диффузионной и дрейфовой составляющих. Для электронов и соответственно также для дырок она имеет вид:

$$\int n = qD_n \frac{dn}{dx} + qn\mu_n \varepsilon, \quad (13)$$

где  $D_n$  – коэффициент диффузии данного вида носителя.

Для одномерного случая выражение, характеризующее движение нейтрального фронта неравновесных носителей на основании (12) и (13) имеет вид:

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G - R = \frac{d}{dx} \left( D \frac{d(\Delta n)}{dx} \right) + \mu \varepsilon \frac{d(\Delta n)}{dx}. \quad (14)$$

где  $D$  и  $\mu$  – коэффициент биполярной диффузии и биполярная дрейфовая подвижность соответственно.

Из (12) видно, что на начальном этапе освещения, когда рекомбинация мала и объемный заряд отсутствует, нарастание неравновесных носителей при заданных условиях освещения происходит линейно. За счет рекомбинации происходит отклонение от линейного закона и устанавливается равновесное значение неравновесных носителей, определяющее стационарную фотопроводимость в соответствии с уравнением (3).

В стационарных условиях  $\frac{d(\Delta n)}{dt} = 0$  и  $\frac{d(\Delta p)}{dt} = 0$ .

Уравнение непрерывности приобретает вид:

$$\begin{aligned} - \left( D_n \frac{d^2(\Delta n)}{dx^2} + \mu_n \varepsilon_x \frac{d(\Delta n)}{dx} \right) &= G - \frac{p - p_0}{\tau_p} \\ - \left( D_p \frac{d^2(\Delta p)}{dx^2} + \mu_p \varepsilon_x \frac{d(\Delta p)}{dx} \right) &= G - \frac{p - p_0}{\tau_p}. \end{aligned} \quad (15)$$

Уравнение (15) выражает закон сохранения числа частиц: в стационарных условиях: поток частиц, вытекающих из единицы объема полупроводника, равен числу частиц, генерируемых в этом объеме, за вычетом числа частиц, рекомбинирующих в этом объеме.

При выключении источника света, концентрация избыточных носителей убывает за счет рекомбинации по закону:

$$\Delta n = \Delta n_0 e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau}}, \quad (16)$$

где  $t_0$  – момент выключения света.

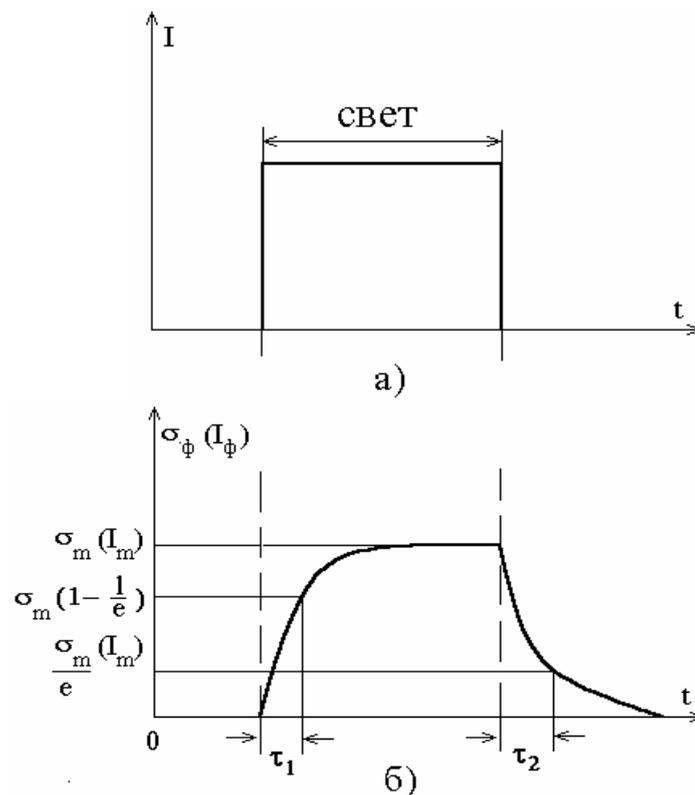
По такому же закону происходит спад фотопроводимости полупроводника:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\phi_0} e^{-\frac{-(t-t_0)}{\tau}}. \quad (17)$$

Характер нарастания фотопроводимости полупроводника после включения светового импульса описывается уравнением, подобным спаду фототока:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\phi_0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (18)$$

На рис.7 показана кривая нарастания фотопроводимости при облучении и спада фотопроводимости после прекращения облучения. На кривой спада фототока при  $(t-t_0)=\tau$  максимальное значение фототока при  $t=t_0$  убывает в «e» раз и можно определить время жизни носителей  $\tau$ .



**Рис. 7.** Релаксация фотопроводимости (б) при возбуждении ее импульсом прямоугольной формы (а).

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить зависимость интенсивности фототока от длины волны падающего излучения  $I_{\phi}(\lambda)$  и построить спектральную зависимость фотопроводности. (Сначала ищется  $\lambda$ , при которой  $I_{\phi}$  достигает максимального значения, а затем снимается характеристика  $I_{\phi}(\lambda)$  с минимальным шагом по  $\lambda$  в сторону увеличения и уменьшения длины волны.)

2. Измерить зависимость фототока от напряжения для трех длин волн падающего излучения. (Напряжение меняется на ИПЗ с шагом 1В в диапазоне от 1В до 10В при значениях  $\lambda$  700нм, 800нм, 900нм.)

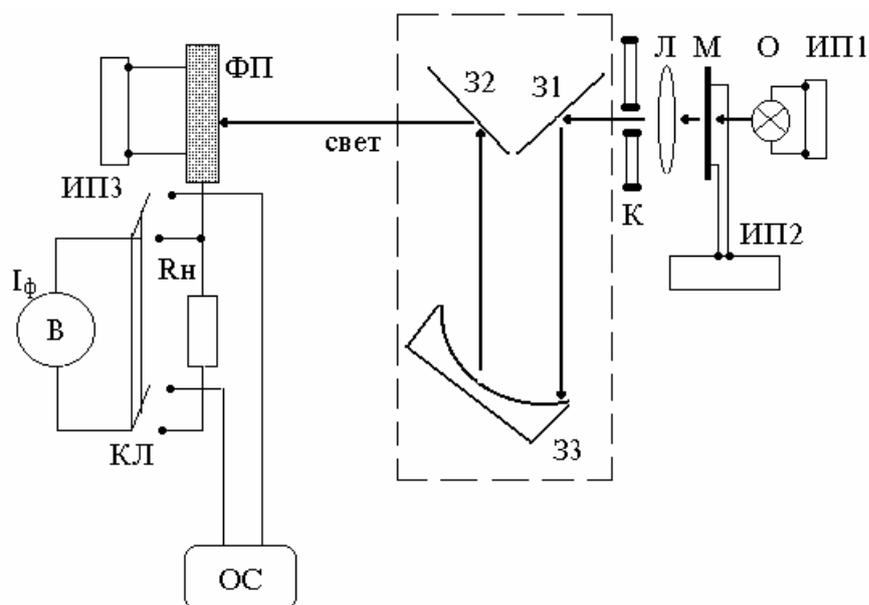
3. Получить осциллограммы нарастания и спада фотопроводимости при циклическом освещении полупроводника прямоугольным импульсом света с длиной волны, соответствующей максимальной фотопроводимости. Зарисовать осциллограмму и оценить время жизни  $\tau$  неравновесных носителей. (Отключить вольтметр и включить осциллограф, масштаб развертки: по оси X – 5нс/дел., по оси Y – 5V/дел.)

4. По спектральной характеристике фотопроводимости определить ширину запрещенной зоны полупроводника.

Отчет должен содержать: график  $I_{\phi}(\lambda)$ , графики ВАХ, осциллограмму импульса  $I_{\phi}$  и определенные значения  $\tau$  и  $E_g$ .

В работе используется ФП типа ФСД–1 на основе CdSe.

## Схема установки:



ИП1 – источник питания осветителя (В-24м:  $I=6A$ )

О – осветитель

М – модулятор света

ИП2 – источник питания модулятора (В5-49:  $I=210mA/U=10V$ )

Л – линза

К – коллиматор ( $d=4mm$ )

31, 32, 33 – система зеркал

ФП – фотопроводник

ИП3 – источник питания фотопроводника (В5-49:  $I=300mA/U=10V$ )

$R_n$  – нагрузочное сопротивление (режим: прямой –  $R=100\Omega$ , обратный –  $R=10\text{Ком}$ )

В – вольтметр

ОС – осциллограф

КЛ – ключ переключения с вольтметра на осциллограф

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким образом появляются неравновесные носители в полупроводнике? Что такое внутренний фотоэффект?
2. Как изменяется проводимость полупроводника при освещении?
3. Как изменяется проводимость полупроводников в зависимости от длины волны падающего света и почему?
4. Запишите уравнение непрерывности фототока для одномерного случая и проанализируйте его.
5. Как определить время жизни неравновесных носителей?
6. Можно ли по спектральной характеристике фотопроводимости определить энергию оптического возбуждения носителей?

## ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов Г.И. «Физика твердого тела». М.: Высшая школа. 1977, с. 288.
2. Шалимова К.В. «Физика полупроводников». М.: Энергоатомиздат. 1985, с.391.
3. Верещагин И.К., Косяченко Л.А., Кокин С.М. «Введение в оптоэлектронику». М.: Высшая школа. 1991, с. 191.
4. «Полупроводниковые фотоприемники». Под ред. Стафеева В.И. М.: Радио и связь. 1984, с.216.