

# ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель работы: Изучение основных физических закономерностей, определяющих свойства и параметры фотодиодов, исследование вольтамперных и световых характеристик.

## Фотодиоды

Фотодиоды являются полупроводниковым прибором, в котором используется эффект разделения на границе электронно-дырочного перехода неравновесных носителей, создаваемых светом.

Схематически фотодиод изображен на рис.1а. Фотодиод выполняется обычно на монокристалле германия или кремния. Освещаемая область (на рис. n-область) обычно слабо легирована, имеет большое время жизни и, следовательно, большую диффузионную длину  $L$ . Если ширина n-области  $W$  значительно меньше диффузионной длины дырок  $L$  в этой области, то большая часть этих носителей не успеет прорекомбинировать и дойдет до границы p-n перехода.

Рассмотрим более подробно работу фотодиода. При отсутствии освещения существует равновесное состояние между тепловыми потоками носителей через переход из n-области в p-область и в противоположном направлении. При освещении n-области в ней образуются неравновесные электроны и дырки. Изменение концентрации электронов в n-области можно не учитывать, т.к. это изменение по сравнению с равновесной концентрацией обычно не очень велико и только ничтожная их доля, преодолевая потенциальный барьер, может проходить в p-область полупроводника. Повышение концентрации дырок приводит к тому, что через переход появляется дырочный ток, направленный в p-область. Величину дырочного тока, обусловленного освещением, обозначим через  $I_f$ . Наличие  $I_f$  нарушает тепловое равновесие и приводит к тому, что p-область полупроводника заряжается положительно относительно n-области. Возникшая таким образом разность потенциалов уменьшает потенциальный барьер, что соответствует смещению p-n перехода в прямом направлении. Эта разность потенциалов вызывает прямой ток дырок, который противодействует диффузионному току неосновных носителей  $I_f$ . Если разность потенциалов на p-n переходе то инжекционный ток

$$I = I_s \left( e^{\frac{\varphi}{\varphi_T}} - 1 \right)$$

где  $I_s$  - ток насыщения p-n перехода.

$$\varphi_T = \frac{kT}{e} \quad - \text{температурный потенциал.}$$

В результате установится динамическое равновесие между током  $I_f$ - и током инжектированных носителей  $I$ :

$$I - I_s \left( e^{\varphi/\varphi_T} - 1 \right) = 0$$

Если подключить к выводам фотодиода источник напряжения  $U$ , то в цепи потечет ток, величина которого определяется разностью встречных токов через p-n переход:

$$I = I_f(\Phi) - I_s \left( e^{\varphi/\varphi_T} - 1 \right)$$

Уравнение описывает семейство вольтамперных характеристик фотодиода (рис.2)(см.л.р.№3). Параметром семейства характеристик является величина светового потока  $\Phi$ .

Пусть последовательно с фотодиодом включен источник напряжения  $E$  и внешнее сопротивление  $R$  (рис.1б). Ток через переход в этом случае так же будет определяться уравнением

$$I = I_f - I_s \left( e^{\varphi/\varphi_T} - 1 \right) (*)$$

Величина напряжения на переходе  $U$  будет являться результатом совместного воздействия светового потока  $\Phi$  и внешнего напряжения  $E$ . Величина тока  $I$  через сопротивление нагрузки  $R$

$$I_n = \frac{U + E}{R} (**)$$

где  $E$ - напряжение источника питания в цепи фотодиода.

Подставив выражение (\*\*) для  $I$  в уравнение (\*), основное уравнение фотодиода при наличии внешнего смещения

$$I_f - I_s \left( e^{\varphi/\varphi_T} - 1 \right) = \frac{U + E}{R} = I (***)$$

Различают два режима работы фотодиода: вентильный и фотодиодный.

Вентильный режим характеризуется отсутствием источника - внешнего напряжения в цепи фотодиода. При этом внешнее сопротивление  $R$  в общем случае может быть включенным во внешнюю цепь.

Уравнение (\*\*\*) для вентильного режима работы фотодиода имеет вид

$$I_f - I_s \left( e^{\varphi/\varphi_T} - 1 \right) = \frac{U}{R} = I (****)$$

При разомкнутой внешней цепи ( $R = \infty$ ) величину напряжения на переходе называют вентильной фотоЭДС и обозначают  $\varphi$ . Из уравнения (\*\*\*\*) получим

$$\varphi_B = \varphi_T \ln \left( \frac{I_f}{I_s} + 1 \right)$$

В режиме короткого замыкания ( $R = 0$ ) напряжение на выводах фотодиода  $U = 0$  и ток во внешней цепи  $I = I_f$ , что следует из уравнения (\*\*\*\*). В этом

случае ток короткого замыкания  $I$  образован только потоком неравновесных дырок, вызванных светом.

Рассмотрим связь тока короткого замыкания  $I$  с величиной светового потока  $\Phi$ , падающего на поверхность фотодиода. Световой поток  $\Phi$  есть мощность излучения, приходящаяся на всю поверхность  $n$ -области полупроводника. Поэтому число квантов света, приходящее в единицу времени на всю поверхность  $n$ -области, равно  $\Phi/h\nu$ , где  $h\nu$ - энергия одного кванта. Очевидно, что величина светового тока  $I_f$  будет пропорциональна числу квантов света, поглощаемых в полупроводнике в единицу времени. В таком случае ток

$$I_f = e\beta\chi \frac{\Phi}{h\nu} (v)$$

где  $\beta$  - квантовый выход, т.е. число электронно-дырочных пар, образуемых одним квантом света,  $\chi$  - коэффициент переноса, учитывающий долю непрорекомбинировавших носителей заряда от общего количества носителей, возникающих под действием светового потока.

Таким образом, величина тока  $I$  прямо пропорциональна световому потоку  $\Phi$ .

Фотодиодный режим работы прибора характеризуется наличием обратного напряжения на переходе. В этом режиме величина потенциального барьера возрастает и, следовательно, ток через переход будет определяться потоками неосновных носителей. Ток через фотодиод является током насыщения. Действительно, при достаточно больших отрицательных напряжениях из выражения (\*\*\*) следует:

$$I = I_f + I_s$$

При малых напряжениях на переходе ( ) после разложения в ряд выражения (\*\*\*) получим

$$I = I_f + I_s \frac{U}{\phi_T} = I_f + \frac{U}{R_0}$$

где величина  $R_0 =$  соответствует внутреннему сопротивлению  $p$ - $n$  перехода при нулевом смещении.

Следовательно, при малых  $U$  ток во внешней цепи примерно равен току короткого замыкания ( $I - I_f$ ).

Рассмотрим световую характеристику фотодиода. Она представляет собой зависимость фототока от величины светового потока  $\Phi$ , падающего на фотодиод. В фотодиодном режиме световая характеристика, описываемая выражением (v), строго линейна в большом диапазоне величин световых потоков (рис.3) (см.л.р.№3) что является важным достоинством фотодиода. В режиме короткого замыкания фотодиода его световая характеристика оказывается нелинейной за счет нарушения этого режима неучтенным сопротивлением толщи полупроводника (кривая 2, рис.3).

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Собрать фотоэлектрическую схему для случая фотодиодного режима (рис.4) (см.л.р.№3).

Снять семейство вольтамперных характеристик фотодиода при четырех различных световых потоках  $\Phi$  и при отсутствии освещения .

(Характеристики снимать при  $R = 90$  кОм. Внешнее напряжение менять от 0 до 30 вольт).

Освещенность диода изменяется путем изменения расстояния между фотоприбором и источником света. Световой поток, падающий на фотоприбор, вычисляется по формуле:

$$\Phi = \frac{SJ}{r^2}$$

где  $S$ - активная площадь прибора,  $m^2$  (диаметр диода=2 мм).

$J$ - сила света лампы накаливания, св ( $W=100$  Вт,  $J=103,4$  св)

$r$ - расстояние между нитью лампы и окном фотодиода, м.

Снять световую характеристику диода в фотодиодном режиме при трех различных напряжениях на фотодиоде (2, 5 и 10 В).

Собрать фотоэлектрическую схему для случая вентильного режима (рис.5).

5.Снять световую характеристику фотодиода в вентильном режиме короткого замыкания и при сопротивлении нагрузки, равном 1,2 кОм.

Результаты зафиксировать в таблице и представить графически а) семейством вольтамперных характеристик (параметр семейства  $\Phi$ ), б) семейством световых характеристик ( параметр  $-U$ ) для двух режимов.

### ВОПРОСЫ

1. Чем обусловлен тип полупроводника ?
2. Что такое p – n переход ?
3. Запишите уравнение динамического равновесия между диффузионным током неосновных носителей и током инжектированных носителей.
4. Что изменится, если к фотодиоду последовательно подсоединить внешний источник напряжения?
5. Нарисуйте вольт - амперную характеристику фотодиода.
6. Расскажите о двух режимах работы фотодиода.
7. Что называется световой характеристикой фотодиода? Как она выглядит для двух режимов работы фотодиода?

### ЛИТЕРАТУРА

Рыбкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Физматгиз, 1963.

Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам. Под ред. Шалимовой " Высшая школа " 1968.

Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников. М., " Высшая школа ", 1975.

Ш.Панков. Оптические процессы в полупроводниках. " Мир) ", М., 1973.

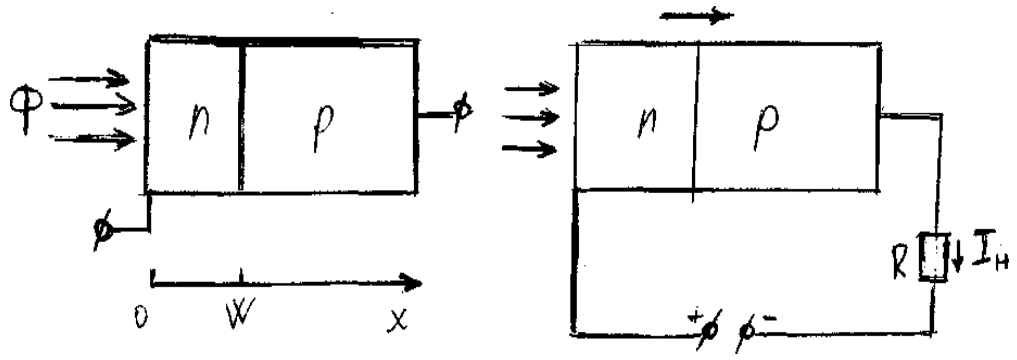


Рис.1 Схематическое изображение фотодиода (а) и схема его выполнения