

ИЗУЧЕНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЭФФЕКТА

Приборы и принадлежности: источник света, вентильный фотоэлемент, магазин сопротивления, милливольтметр, миллиамперметр.

Цель работы: ознакомление с вентильным фотоэффектом, исследование вольтамперных характеристик, определение максимальной мощности, оптимальной нагрузки, коэффициента полезного действия вентильного фотоэлемента, исследование световой характеристики фотоэлемента.

Внутренний фотоэффект

Важной обязанностью полупроводников является способность увеличивать электропроводность под действием света. Это явление получило название *внутреннего фотоэффекта* или *фотопроводимости*. Непосредственным результатом поглощения света в полупроводнике является увеличение числа свободных носителей тока. Три типа перехода приводит к появлению фотопроводимости (рис. 1).

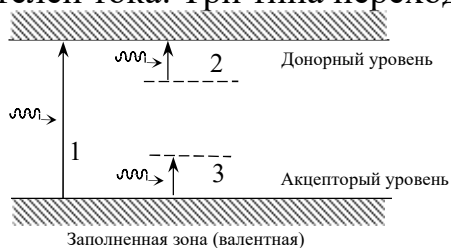


Рис. 1

1. В переходах первого типа электроны из заполненной зоны при поглощении фотона переводятся в зону проводимости. В результате этих переходов образуются свободные электроны и свободные дырки. Возникающая при таких переходах фотопроводимость называется *собственной*.

2. Переходы второго типа происходят при поглощении фотона атомом донорной примеси кристалла; при этом образуются свободные электроны и свободные места на донорных атомах.

3. Переходы третьего типа возникают, когда при поглощении света электроны переходят из заполненной зоны на не занятые акцепторные уровни. В результате этого процесса образуются свободные дырки и электроны, связанные с акцепторными атомами. Фотопроводимость, возникающая в результате последних процессов, называется *примесной*.

Некоторое количество носителей тока присутствует в полупроводниках и при отсутствии света. Часть электронов переводится из заполненной зоны (и с донорных уровней) в зону проводимости (и на акцепторные уровни) в результате теплового движения. Количество таких носителей - и вместе с ним проводимость кристалла - определяется температурой кристалла и быстро увеличивается при нагревании. В этом случае говорят о равновесных носителях тока и о темновой проводимости кристалла.

Количество носителей тока равно равновесному не только в полной темноте, но и в тех случаях, когда энергия фотонов недостаточно велика для того, чтобы вызвать электронные переходы в кристалле. Фотопроводимость появляется лишь в том случае, если частота света не слишком мала. Пороговая частота, при которой начинается фотопроводимость, называется *красной границей фотоэффекта*.

В отличие от тепловой, световая энергия запасается электронами полупроводника и практически не изменяет температуры кристаллической решетки. Поэтому в присутствии света тепловое равновесие между электронами и решеткой

нарушается. Носители тока, возникающие в результате оптической ионизации, являются *неравновесными*.

р-п- переход

При возникновении контакта между полупроводниками р- и п- типа происходит обмен носителями тока. В приконтактной области запирающий слой $l_p + l_n$, обедненный основными носителями тока: электронами со стороны электронного полупроводника, дырками со стороны дырочного полупроводника. Ионы примесей этого слоя создают положительный объемный заряд в п- области и отрицательный – в р- области. Между р- и п- областями возникает контактная разность потенциалов U_K , препятствующая движению основных носителей тока.

Если в отсутствии освещения закоротить наружные концы двух областей р-п- перехода, то тока в цепи не будет. Это означает, что в состоянии равновесия суммарный ток, созданный движением основных и неосновных носителей через контактный переход, равен нулю.

Подключение к контакту внешнего напряжения прямой полярности $+U$ (плюс со стороны р-полупроводника, минус со стороны п-полупроводника) приводит к уменьшению потенциального барьера запирающего слоя. Число основных носителей, способных проникнуть через р-п- переход, растет, поток неосновных носителей при этом не изменяется. Через контакт идет ток в прямом направлении.

Внешнее поле обратной полярности складывается с внутренним полем запирающего слоя. При этом для тока диффузии основных носителей возникает большое сопротивление. Через контакт идет ток обратного направления. При некоторой величине обратного напряжения переход основных носителей через контакт прекращается. Обратный ток, создаваемый теперь только неосновными носителями достигает своего насыщения. На рис.2 (кривая 1) представлена вольт-амперная характеристика (ВАХ) неосвещенного р-п- перехода. Она может быть описана следующим выражением

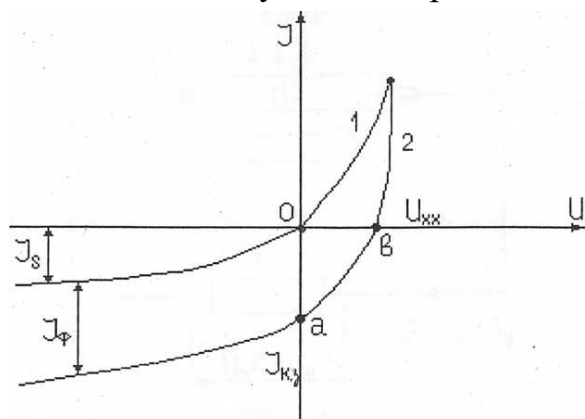


Рис.2.

$$J = J_s(e^{\pm eU/RT} - 1), \quad (1)$$

где J_s - ток насыщения неосвещенного р-п- перехода,
 k - постоянная Больцмана,
 e - заряд электрона,
 T - абсолютная температура,
 $\pm U$ - прямое и обратное напряжение внешнего поля.

Освещенный р-п- переход (фотодиодный режим)

Пусть теперь на полупроводник вблизи р-п- контакта падает свет. Концентрация электронно-дырочных пар, возникающих в результате внутреннего фотоэффекта, увеличивается по мере приближения к освещенной поверхности. В результате электроны и дырки перемещаются к контактному переходу, где происходит их разделение: основные носители области задерживаются контактным по-

лем, неосновные - ускоряются и свободно проходят через р-п-переход, образуя фототок J_ϕ , текущий в обратном направлении (рис.2, кривая 2).

Если цепь разомкнута, то на границах р-п- перехода накапливается объемный заряд, препятствующий движению неосновных носителей. Возникает *фото-эдс*. U_ϕ , полярность которой обратна полярности контактной разности потенциалов. Потенциальный барьер запирающего слоя уменьшается. Это в свою очередь вызывает появление так называемого *тока утечки* J_y , текущего в прямом направлении. Величина фото-эдс растет до тех пор, пока возрастающий ток основных носителей не скомпенсирует фототок. Возникновение фото-эдс в вентильном, т.е. выпрямляющем, контакте при его освещении называется *вентильным фотоэффектом*.

Фотогальванический режим

Замкнем р-п-переход на нагрузочное сопротивление r_n (рис.3). По цепи течет ток J , который можно представить как сумму двух токов

$$J = J_\phi - J_y.$$

Ток утечки рассчитывается по формуле (1) для неосвещенного р-п-перехода, когда к нему приложено внешнее напряжение $U_n = J \cdot r_n$ в прямом направлении

$$J_y = J_s(e^{U/kT} - 1).$$

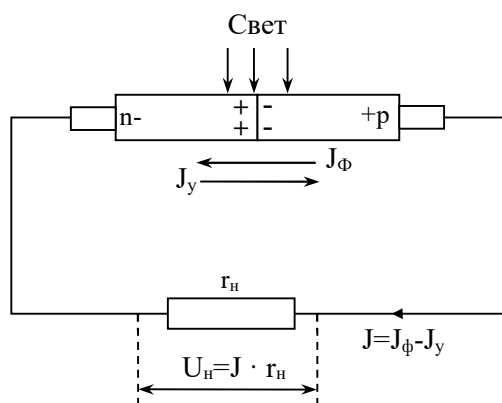


Рис. 3

В режиме *короткого замыкания* ($r_n=0$) будет $U_n = J \cdot r_n = 0$. $J_y = 0$, а ток $J_{к.з.}$ (ток короткого замыкания) внешней цепи равен фототoku, который в свою очередь пропорционален световому потоку Φ

$$J_{к.з.} = J_\phi \quad J_\phi \sim \Phi.$$

В режиме *холостого хода* цепь разомкнута ($r_n = \infty$), напряжение холостого хода $U_{xx} = U_\phi$; $J = 0$; $J_\phi = J_y$

Из формулы (1) получим $J_\phi = J_s(e^{U/kT} - 1)$, откуда следует

$$U_\phi = U_{xx} = kT/e \ln(1 + J_\phi/J_s).$$

Таким образом, вентильные фотоэлементы позволяют осуществить непосредственное превращение лучистой энергии в электрическую, поэтому их также называют *фотогальваническими элементами* (применяют для создания солнечных батарей)

При изменении внешней нагрузки от 0 до ∞ получаем участок ab (рис. 2, кривая 2), который и представляет собой вольт-амперную характеристику р-п-перехода в фотогальваническом режиме при постоянном световом потоке (постоянной освещенности E). При изменении светового потока, а, следовательно, и освещенности вольт-амперные характеристики смещаются, форма их изменяется. Семейство ВАХ вентильного фотоэлемента в фотогальваническом режиме при различных освещенностях представлено на рис. 4.

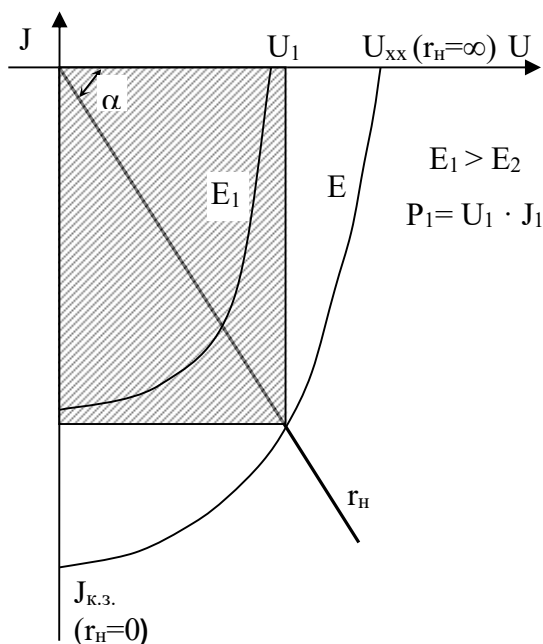


Рис. 4

Прямые, проведенные из начала координат под углом α , определяемым величиной сопротивления ($\text{ctg } \alpha = r_H$), пересекают характеристику в точках, абсциссы которых дают падение напряжения на нагрузке, а ординаты – ток во внешней цепи, например $U_1 = J_1 \cdot r_{H1}$. Площадь, заштрихованная на рисунке, пропорциональна мощности P_1 , выделяемой на нагрузке r_{H1}

$$P_1 = U_1 \cdot J_1 = J_1^2 \cdot r_{H1}.$$

Оптимальное сопротивление нагрузки $r_{H \text{ опт.}}$ выбирают так, чтобы эта мощность была максимальной.

Коэффициент полезного действия фотогальванического элемента определяется соотношением

$$\eta = \frac{P}{\Phi} \cdot \psi = \frac{P}{ES} \cdot \psi,$$

где ψ - световая отдача, которая для волны длиной $\lambda = 555$ нм равна 628 Лм/Вт; S - площадь приемной части фотоэлемента.

Описание установки

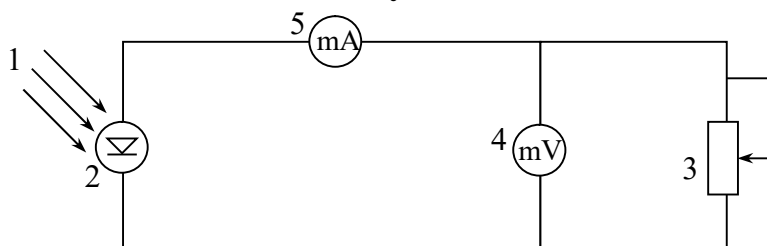


Рис. 5. Схема установки: 1-источник света; 2-вакуумный фотоэлемент; 3-магазин сопротивления; 4-милливольтметр; 5-миллиамперметр

Порядок выполнения работы

1. Включить в сеть амперметр, вольтметр и источник света.
2. Тумблер S_1 (род работы) установить в положение "МСЭ" (солнечный элемент); тумблер S_2 (полярность) в положение "Прямая".

Снятие вольт-амперных характеристик (ВАХ)

3. Установить фотоэлемент на расстоянии 35 см от источника света.
4. Изменяя сопротивление r_H от 0 до ∞ при постоянной освещенности снять значения напряжения и тока. Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1.

$I_1 =$				$I_2 =$		
R (Ом)	U (мВ)	J (мА)	$U^{3/2}$	U (мВ)	J (мА)	$U^{3/2}$
0						

500						
1000						
2000						
3500						
5500						
7500						
9000						
11000						
17000						
20000						
28000						
41000						
$P_{\max} =$	$\eta =$			$r_H =$	$P_{\max} =$	
					$r_H =$	
					$\eta =$	

5. Повторить п.4 для других освещенностей (различные освещенности получаются путем изменения расстояния L от фотоэлемента до источника света).

6. Построить семейство вольт-амперных характеристик. $J = f(U)$.

Обработка результатов измерений

1. График зависимости $J = f(U)$ хорошо описывается функцией

$$J = a - b U^{3/2}.$$

Необходимо определить коэффициенты a и b для каждой ВАХ. Для этого строим график зависимости J от $U^{3/2}$. Получаем прямую линию

$$J = a - b \cdot z, \quad \text{где } z = U^{3/2}.$$

По оси y в точке пересечения данной прямой линии с осью координат находим коэффициент a .

Коэффициент b равен тангенсу угла наклона данной прямой к оси x .

$$b = \Delta J / \Delta Z$$

Зная коэффициенты, можем записать функцию, которой описывается ВАХ.

$$J = a - b \cdot U^{3/2}$$

3. Для каждой освещенности из соответствующей ВАХ определить максимальную мощность фототока.

4.

$$P = U \cdot J = a \cdot U - b \cdot U^{5/2}$$

Чтобы найти максимум этой функции, возьмем производную и приравняем к 0. Из полученного уравнения определим, при каком напряжении U будет максимальная мощность P_{\max}

$$P' = a - \frac{5}{2} b U^{3/2} = 0 \qquad U_0 = \sqrt[3]{\frac{4a^2}{25b^2}}$$

Найдем из графика $J = f(U)$ соответствующее значение тока J_0 и вычислим

$$P_{max} = U_o \cdot J_o$$

3. По формуле (2) найдем К.П.Д. фотоэлемента $\eta = \frac{P}{ES} \psi$,

где Р – максимальная мощность

Е - освещенность для данного расстояния (из таблицы 3 или графика)

S - площадь приемной части фотоэлемента – 6,2 см²

ψ- световая отдача, которая для волны длиной $\lambda = 555$ нм равна 628 Лм/Вт.

4. Зная P_{max} для всех освещенностей, рассчитать по формуле $P = J^2 \cdot R_n$ оптимальное нагрузочное сопротивление $R_{n \text{ опт}}$

Снятие световой характеристики

1. Установить $r_n=0$; снять зависимость фототока от расстояния L между фотоэлементом и источником света. Данные занести в таблицу

2. По таблице 3 или графику определить освещенности для расстояний L и данные занести в таблицу 2.

3. Построить график зависимости J_ϕ от Е.

Таблица 2

l (см)	Е (Люкс)	J_ϕ (мА)

Таблица 3

Зависимость освещенности от расстояния

l (см)	Е (Люкс)	Для солнечной батареи	
5	2550	l (см)	Е (Люкс)
10	1250	10	830
15	800	15	550
20	500	20	356
25	345	25	260
30	255	30	195
35	255	35	160

Для точечного источника справедлива формула $E \sim J / l^2$, где Е - освещенность, J - сила источника, l - расстояние.

В этой работе источник не точечный и пользоваться формулой нельзя. Освещенности Е для различных расстояний были определены экспериментально люксметром. Эти результаты представлены в таблице 3 и на графике.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается внешний и внутренний фотоэффект?
2. Чем отличаются собственная и примесная фотопроводимости?
3. Что называется красной границей фотоэффекта?

4. Объясните происхождение запирающего слоя в приконтактной области р- и п-полупроводников.
5. Укажите вид ВАХ неосвещенного и освещенного р-п-перехода.
6. Объясните возникновение фототока $J_{\text{ф}}$, фото-э.д.с. $U_{\text{ф}}$ и тока J_y освещенного, р-п- перехода в фото диодном режиме.
7. Что называется вентильным фотоэффектом?
8. Объясните ход ВАХ вентильного фотоэффекта в фотогальваническом режиме.
9. Как определяется в настоящей работе максимальная мощность, выделяемая в цепи, оптимальное нагрузочное сопротивление, К.П.Д. фотоэлемента?
10. Объясните зависимость фототока от освещенности.