

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы:

Изучение принципа действия фотопреобразователя и определение его основных параметров.

Приборы и оборудование, используемые в работе:

1. Измеритель характеристик ППП Л2-56.
2. Осветитель регулируемый.
3. Столик для образцов.
4. Вольтметр В7-27 (2 шт.).
5. Магазин сопротивлений Р33.
6. Блок питания БП-591.
7. Устройство присоединительное.

КРАТКОЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

При освещении р-п-перехода светом, энергия квантов которого превышает ширину запрещенной зоны, происходит генерация электронно-дырочных пар и разделение их р-п-переходом. Если внешняя цепь разомкнута, то по обеим сторонам р-п-перехода будут накапливаться заряды противоположного знака. В результате произойдет снижение уровня Ферми на величину φ_k , как это показано на рис.1, а на внешних выводах появится разность потенциалов (фото - э.д.с.). Это явление называется фотогальваническим эффектом. Фотогальванический эффект применяется в фотоэлементах.

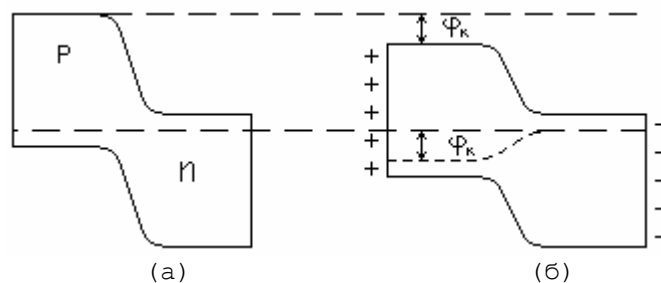


Рис.1. Зонная диаграмма солнечного элемента с р-п-переходом в темноте (а) и при освещении (б).

Вольтамперная характеристика (ВАХ) солнечного элемента отличается от ВАХ полупроводникового диода появлением члена I_ϕ , обозначающего собой ток, генерируемый элементом под действием освещения, часть которого I_d течет через p-n-переход, а другая часть I - через внешнюю нагрузку:

$$I_\phi = I_d + I, \quad (1)$$

где

$$I_d = I_0(\exp(qU/kT) - 1) \quad (2)$$

обычная темновая характеристика, в которой:

I_0 - обратный ток насыщения p-n-перехода;

q - заряд электрона;

T - абсолютная температура (в K);

k - постоянная Больцмана;

U - напряжение.

При разомкнутой внешней цепи, когда ее сопротивление бесконечно и $I = 0$, из уравнений (1) и (2) можно определить напряжение холостого хода U_{xx} солнечного элемента:

$$U_{xx} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_\phi}{I_0} + 1\right). \quad (3)$$

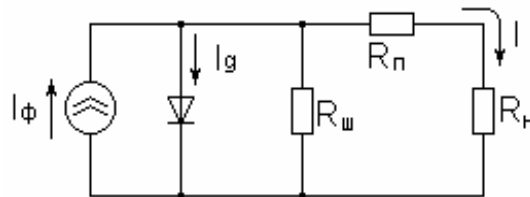


Рис.2. Эквивалентная схема солнечного элемента.

Для реального солнечного элемента характерно наличие последовательного сопротивления контактных слоев, сопротивлений каждой из p- и n-областей элемента, переходных сопротивлений металл-полупроводник, а также шунтирующего сопротивления $R_{ш}$, отражающего возможные поверхностные и объемные утечки тока по сопротивлению, параллельному p-n-переходу (Рис.2). Учет этих сопротивлений и рекомбинации в p-n-переходе приводит к развернутому выражению для ВАХ:

$$I = I_{\Phi} - I_0 \left(\exp \frac{q(U + IR_n)}{AkT} - 1 \right) - \frac{U + IR_n}{R_{ш}}. \quad (4)$$

В уравнение введен коэффициент А, отражающий степень приближения параметров реального прибора к характеристикам идеального. Обычно шунтирующее сопротивление $R_{ш}$ на несколько порядков больше R_n и его влиянием можно пренебречь. Тогда уравнение (4) запишется в виде

$$I = I_{\Phi} - I_0 \left(\exp \frac{q(U + IR_n)}{AkT} - 1 \right). \quad (5)$$

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Установка для измерения ВАХ солнечных элементов (рис.3) состоит из цифрового миллиамперметра, цифрового вольтметра и магазина типа РЗЗ, используемого в качестве переменной нагрузки.

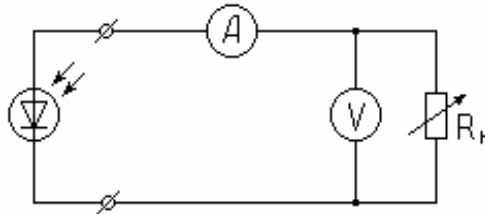


Рис.3. Принципиальная схема установки для снятия ВАХ.

Вольтамперная характеристика (Рис.4) снимается в режиме меняющейся нагрузки при освещении образца вольфрамовой лампой накаливания с водяным фильтром. Падающая мощность $P_{пад}$ определяется при помощи эталонного образца, у которого ток короткого замыкания $I_{кз}$ в миллиамперах численно равен $P_{пад}$ в мВт/см².

В данной работе определяются основные параметры солнечного элемента P_{max} , ξ , η , I_0 , А и R_n .

Коэффициент заполнения определяется как отношение максимальной площади вписанного прямоугольника со сторонами I_{mp} и U_{mp} к описаному со сторонами $I_{кз}$ и $U_{хх}$:

$$\xi = \frac{I_{mp} U_{mp}}{I_{кз} U_{хх}}, \quad (6)$$

где I_{mp} и U_{mp} - соответственно ток и напряжение при максимальной мощности.

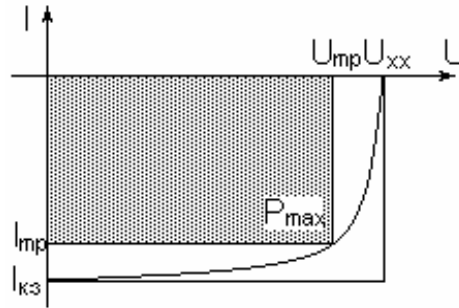


Рис.4. К определению коэффициента заполнения.

Произведение $I_{mp} * U_{mp}$ представляет собой максимальную выходную мощность солнечного элемента (P_{max}) для данного светового потока.

Коэффициент полезного действия фотопреобразователя

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{пад}} = \frac{\xi U_{xx} I_{кз}}{P_{пад}} \quad (7)$$

где $P_{пад}$ — мощность падающего на солнечный элемент излучения.

Параметры A , I_0 и $R_{п}$ определяются по методике, предложенной в [3], которая изложена ниже с незначительными сокращениями.

Для удобства расчетов вводится обозначение $U_t = kT/q$, называемое термическим напряжением, которое для комнатной температуры ($t=25^{\circ}C$) равно 0,026 В. Тогда уравнение (4) принимает вид

$$I = I_{\Phi} - I_0 \left(\exp \left(\frac{U + IR_n}{AU_t} \right) - 1 \right) - \frac{U + IR_n}{R_{ш}} \quad (8)$$

Согласно известным теоретическим результатам в режиме холостого хода $A=1$, а в режиме короткого замыкания A не менее двух.

В режиме х.х. ($U=U_{xx}$, $A=1$) нагрузочный ток $I=0$ и из уравнения (8) следует, что

$$I_{\Phi} = I_0 \left(\exp \frac{U_{xx}}{U_t} - 1 \right) + \frac{U_{xx}}{R_{ш}} \quad (9)$$

Подставляя выражение (9) в (8), можно получить соотношение между параметрами СЭ для режима к.з., когда $U=0$, $I=I_{кз}$ и $A=2$ и для режима генерации максимальной мощности

$$I_0 \left(\exp \frac{U_{xx}}{U_t} - \exp \frac{I_{\kappa 3} R_n}{2U_t} \right) - I_{\kappa 3} \left(1 + \frac{R_n}{R_{uu}} \right) + \frac{U_{xx}}{R_{uu}} = 0. \quad (10)$$

Если ввести условное обозначение $r = 1 + R_n/R_{uu}$ и учесть, что $\exp(I_{\kappa 3} R_n / 2U_t) \ll \exp(U_{xx}/U_t)$, то уравнение (10) упрощается и приводится к виду

$$I_0 \left(\exp \frac{U_{xx}}{U_t} - \exp \frac{U_{mp} + I_{mp} R_n}{AU_t} \right) - I_{mp} \left(1 + \frac{R_n}{R_{uu}} \right) + \frac{U_{xx} - U_{mp}}{R_{uu}} = 0. \quad (11)$$

$$I_0 = \left(I_{\kappa 3} * r - \frac{U_{xx}}{R_{uu}} \right) \left(\exp \frac{U_{xx}}{U_t} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Решая совместно (11) и (12), можно получить следующее уравнение для диодного коэффициента A , соответствующего режиму генерации максимальной мощности:

$$A = (U_{mp} + I_{mp} R_n) / \left(U_{xx} + U_t \ln \left(\frac{(I_{\kappa 3} - I_{mp})r - U_{mp} / R_{uu}}{I_{\kappa 3} r - U_{xx} / R_{uu}} \right) \right). \quad (13)$$

Принимая во внимание, что для большинства высокоэффективных СЭ выполняется условие $R_{uu} > 10^4 \text{ Ом}$, при проведении теоретического анализа шунтирующее сопротивление можно считать бесконечно большим. Это позволяет упростить уравнение (13) и представить его в виде

$$A = (U_{mp} + I_{mp} R_n) / \left(U_{xx} + U_t \ln \left(\frac{(I_{\kappa 3} - I_{mp})}{I_{\kappa 3}} \right) \right). \quad (14)$$

В режиме генерации максимальной мощности:

$$\left(\frac{dP}{dI} \right)_{\substack{I=I_{mp} \\ U=U_{mp}}} \approx 0 \quad (15)$$

и

$$\left(\frac{dP}{dI} \right)_{\substack{I=I_{mp} \\ U=U_{mp}}} \approx -\frac{U_{mp}}{I_{mp}}. \quad (16)$$

Здесь P - мощность, вырабатываемая СЭ; I_{mp} и U_{mp} - ток и напряжение при максимальной мощности. Из уравнения (8) следует, что:

$$\frac{dU}{dI} = - \left(R_n + \left(\frac{1}{AU_t} \left(I_{\Phi} + I_0 - 1 - \frac{U + IR_n}{R_{uu}} \right) + \frac{1}{R_{uu}} \right)^{-1} \right). \quad (17)$$

Правые части уравнений (16) и (17) равны между собой, поэтому

$$\frac{U_{mp}}{I_{mp}} = \left(R_n + \left(\frac{1}{AU_t} \left(I_\Phi + I_0 - I_{mp} - \frac{U + IR_n}{R_{ш}} \right) + \frac{1}{R_{ш}} \right)^{-1} \right), \quad (18)$$

где А соответствует точке ВАХ, в которой $I=I_{mp}$ и $U=U_{mp}$.

Полагая, что значение $R_{ш}$ бесконечно велико и справедливы соотношения $I_\Phi=I_{кз}$ и $I_0 < 10$ А, а также решая совместно уравнения (14) и (18), можно получить следующее выражение для R_n :

$$R_n = \frac{U_{mp}}{I_{mp}} \cdot \frac{(1/U_t)(I_{кз} - I_{mp})[U_{xx} + U_t \ln(1 - (I_{mp}/I_{кз}))] - I_{mp}}{I_{mp}(1/U_t)(I_{кз} - I_{mp})[U_{xx} + U_t \ln(1 - (I_{mp}/I_{кз}))] + I_{mp}}. \quad (19)$$

После введения обозначения

$$i = \frac{1}{U_t} (I_{кз} - I_{mp})(U_{xx} + U_t \ln(1 - \frac{I_{mp}}{I_{кз}})), \quad (20)$$

выражение для последовательного сопротивления СЭ приводится к окончательному виду:

$$R_n = \frac{U_{mp}}{I_{mp}} \cdot \frac{i - I_{mp}}{i + I_{mp}}. \quad (21)$$

Таким образом, расчет R_n выполняется с помощью соотношений (20) и (21). Затем из уравнения (14) можно вычислить значение диодного коэффициента А.

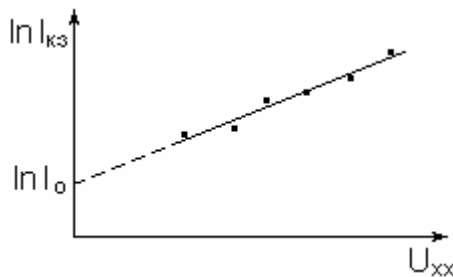


Рис.5. К определению I_0

Для определения обратного тока насыщения I_0 воспользуемся зависимостью $I_{кз}=f(U_{xx})$. Для этого снимем данную зависимость при освещении образца через наборы светофильтров, изменяющих уровень мощности падающего излучения $P_{пад}$, и построим график, по оси абсцисс которого отложим значения U_{xx} в линейном масштабе, а по оси ординат значения $I_{кз}$ в логарифмическом масштабе (рис.5).

Экстраполируя полученную прямую к $U_{xx}=0$ находим, значение I_0 .

РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ:

1. Ознакомиться с измерительной установкой.
2. Подключить исследуемый СЭ.
3. Произвести запись ВАХ в режиме меняющейся нагрузки.
4. Определить $I_{кз}$, U_{xx} , I_{mp} , U_{mp} , $P_{пад}$, P_{max} , ξ , η , R_p , A , I_0 .
5. Снять зависимость $I_{кз}=f(U_{xx})$ в режиме меняющейся освещенности и построить соответствующий график.
6. Определить из графика значение обратного тока насыщения I_0 .

Контрольные вопросы:

1. Чем ограничено максимальное значение фотоЭДС фотоэлемента?
2. Какова зависимость величины фототока и фотоЭДС от величины светового потока, падающего на фотоэлемент?
3. Что такое коэффициент собирания?
4. Каково влияние последовательного и шунтирующего сопротивлений на вид ВАХ?
5. Какие факторы влияют на КПД фотоэлемента?

ЛИТЕРАТУРА:

1. А.Амброзяк. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов. М., "Сов. радио", 1970 г.
2. А.М.Васильев, А.П.Ландсман. Полупроводниковые фотопреобразователи. М., "Сов. радио", 1971г.
3. INT.J.ELEKTRONICS, 1982, VOL52, 6,p.589-595.