

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ ИНТЕГРАЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ

А.А.Эргашев-магистрант, к.т.н.

А.Г.Салиев- Научный руководитель

Ташкентский Государственной Технических Университет.

Аннотация

В этой статье проведено анализ основных параметров фотоэлемента и их характеристики: вольт-амперной, световой(энергетической) и спектральной. При интеграции фотоэлектрической системы в электрическую сеть должна контролироваться отклонение значений всех параметров качества генерируемой электроэнергии и реагировать соответствующем образом для обеспечения синхронизации между фотоэлектрической системой электrorаспределительной сетью.

Ключевые слова: Фотоэлектрические элементы, фотоэффект, энергетических уровни, р-п переход, точка максимальной мощности(ТММ), коэффициент поглощения, запрещенная энергетическая зона.

Фотоэлектрический или солнечный элемент позволяет прямое преобразование солнечной энергии на электрическую энергию с помощью фотоэлектрического эффекта. Природа явления основана на воздействии света, который заставляет электрон вытесняться с орбиты фотоном солнечного света. Взаимодействие полупроводника и солнечного излучения приводит к поглощению фотонов и выпуску электронов.

Элемент солнечной батареи представляет собой пластинку кремния n-типа, окруженную тонким слоем кремния р-типа толщиной около одного микрона, с контактами для присоединения к внешней цепи (рис. 1).

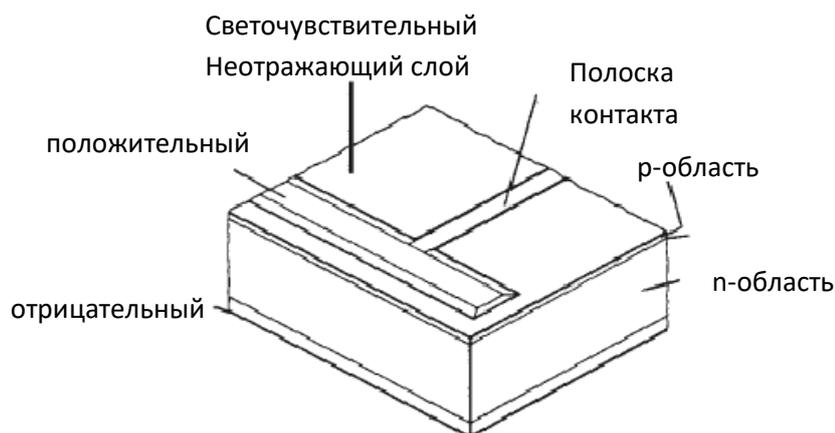


Рис. 1. Устройство кремниевой солнечной ячейки с р-п переходом

Отрицательному полюсу источника тока соответствует n-слой, а p-слой положительному.

Сущность фотоэффекта заключается в освобождении электронов в результате взаимодействия света с веществом. Освобожденные светом электроны называют фотоэлектронами. Условия возникновения фотоэлектронов и явления, которые наблюдаются при их появлении, могут быть различными. Рассмотрим некоторые из них.

Внешний фотоэффект – явление освобождения электронов с поверхности тела, наблюдается при освещении любых тел. В результате внешнего фотоэффекта изменяется электропроводность окружающей тело среды.. Впервые внешний фотоэффект был обнаружен Герцем, а детально исследован Столетовым.

Экспериментально установлены следующие основные законы внешнего фотоэффекта.[2]

1 Число электронов (фототок), вырываемых с поверхности тела за единицу времени, пропорционально интенсивности светового потока, падающего на поверхность тела (при условии неизменного спектрального состава света и условий освещения) – закон Столетова.

2 Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с частотой падающего света и не зависит от его интенсивности – закон Эйнштейна.

3 Для каждого вещества при определенном состоянии его поверхности (определяющем работу выхода) и температуре $T > 0$ К существует граничная частота ν_0 (минимальная частота) или длина волны λ_0 (максимальная длина волны), за которой фотоэффект не наблюдается. Граничную частоту и соответствующую ей длину волны называют красной границей фотоэффекта.

Явление фотоэффекта и его закономерности можно объяснить, пользуясь квантовой теорией света. Элементарный акт внешнего фотоэффекта можно представить состоящим из трех процессов: поглощение фотона электроном, движение электрона, обладающего избыточной энергией, к поверхности тела и прохождение его через потенциальный барьер. В металлах внешний фотоэффект в видимой и ультрафиолетовой областях спектра связан с поглощением света электронами проводимости. Электрон, поглотив фотон, получает энергию $h\nu$, достаточную для преодоления связей, удерживающих его в веществе, и вылетает за пределы поверхности тела. Вероятность одновременного

поглощения двух фотонов одним электроном ничтожно мала, и, следовательно, каждый электрон заимствует энергию только у одного фотона, поэтому число вылетающих с поверхности электронов пропорционально числу падающих на поверхность фотонов, то есть пропорционально световому потоку (закон Столетова).

Для того, чтобы электрон мог покинуть поверхность металла, он должен иметь энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера, величина которого определяется работой выхода A , то есть $h\nu \geq A$. И, следовательно, граничная частота фотоэффекта равна:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}; \quad \lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{hc}{A}; \quad (1)$$

Используя закон сохранения энергии, можно определить максимальную энергию электрона, вылетевшего с поверхности металла:

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = h\nu - A \quad (2)$$

Это соотношение было получено Эйнштейном и носит название уравнения Эйнштейна. Его можно записать следующим образом:

$$h\nu = A + \frac{mv_{max}^2}{2} \quad (3)$$

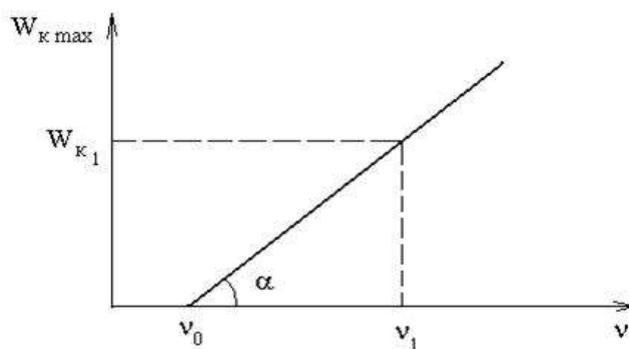


Рис.1.1. Зависимость кинетической энергии фотоэлектронов от частоты

Из уравнения Эйнштейна следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты падающего света. На рисунке 1.1 представлен график этой зависимости.

Как видно из графика, фотоэффект начинается при частоте ν_0 – красной границе фотоэффекта. Тангенс угла наклона α равен постоянной Планка h . Действительно,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{w_{k1}}{v_1 - v_0} \quad (4)$$

Используя уравнение Эйнштейна (1.2) и определение красной границы фотоэффекта ($V_0 = \frac{A}{h}$), получим:

$$w_k = hv_1 - hv_0 \quad (5)$$

$$\frac{w_{k1}}{v_1 - v_0} = h \quad (6)$$

Максимальную энергию получают не все электроны, а только те, которые вылетают непосредственно с поверхности. Электроны, поглотившие фотон на некоторой глубине, при подходе к поверхности часть энергии теряют и вылетают с меньшими скоростями или не вылетают совсем, поэтому с ростом частоты вероятность вылета таких электронов возрастает.

Внутренний фотоэффект – изменение электропроводности полупроводников или возникновение фото-ЭДС в р-п переходах за счет перераспределения электронов по энергетическим состояниям в полупроводниках, происходящее при поглощении света.

В отличие от внешнего внутренний фотоэффект обнаруживается по изменению концентрации носителей заряда внутри среды, т.е. по появлению фотопроводимости. Как и при внешнем фотоэффекте, поглощение одного фотона приводит к возбуждению одного атома, поэтому фототок зависит от интенсивности падающего светового потока. При небольшой интенсивности светового потока выполняется закон Столетова.

Механизм внутреннего фотоэффекта можно пояснить с помощью зонной теории. На рисунке 2 приведены схемы расположения энергетических уровней для идеального (без примесей) и реального (с примесями) полупроводника. При абсолютном нуле валентные электроны полупроводника и диэлектрика полностью заполняют валентную зону.

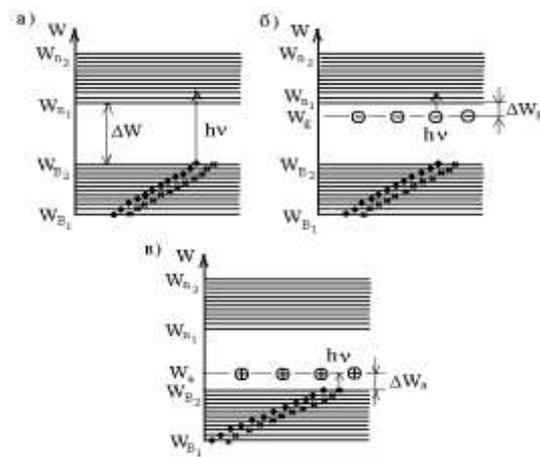


Рис.2. Схема расположения энергетических уровней:

а) в собственном п/п; б) в донорном п/п; в) в акцепторном п/п

где $(W_{B1} - W_{B2})$ - валентная зона разрешенных значений энергии, полностью заполненная электронами. Следующая разрешенная зона энергий, зона проводимости $(W_{n1} - W_{n2})$, разделена с валентной зоной запрещенным участком, запрещенной зоной ΔW . Для перехода из валентной зоны в зону проводимости электрону необходимо сообщить энергию, равную или несколько большую ширины запрещенной зоны. Поглотив фотон с энергией $h\nu \geq \Delta W$, электрон переходит в зону проводимости и становится свободным, а на его месте образуется «дырка». Возникает биполярная проводимость (электронная и дырочная), которая возрастает с увеличением числа свободных электронов и дырок.

Если ввести в кристалл полупроводника (или диэлектрика) акцепторные или донорные примеси, то фотоэффект может возникнуть при облучении светом меньшей частоты, так как энергетическое расстояние от валентной зоны до акцепторного W_a и от донорного уровня W_d до зоны проводимости W_{n1} меньше ширины запрещенной зоны данного полупроводника. В этом случае возникает многополярная (электронная или дырочная) проводимость.

Для каждого полупроводника (и диэлектрика), собственного или примесного, существует минимальная частота (красная граница), при которой еще возможен фотоэффект:

$$V_0 = \frac{\Delta W}{h}; \quad V_0 = \frac{\Delta W_a}{h}; \quad v_0 = \frac{\Delta W_d}{h}, \quad (7)$$

Вентильный фотоэффект (фотоэффект запирающего слоя) – возникновение ЭДС при поглощении света системой, содержащей контакт двух полупроводников с разным типом проводимости (p – n переход) или полупроводника и металла.

Чтобы понять, как возникает фото – ЭДС, рассмотрим сначала, что происходит на границе между двумя областями полупроводника с различным типом примесной проводимости, р и n. В р – области основными носителями заряда являются дырки, образовавшиеся в результате захвата электронов атомами примеси (акцепторы при этом становятся отрицательно заряженными ионами – см. рисунок 3). Кроме основных, в р – области имеется небольшое число неосновных носителей (для данного типа проводимости) – электронов, возникающих вследствие перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости за счет теплового движения. В n – области основные носители заряда – электроны, отданные донорами в зону проводимости (доноры при этом превращаются в положительно заряженные ионы). И в этой области за счет перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, вследствие теплового движения, образуется небольшое число дырок – неосновных носителей (для данного типа проводимости).

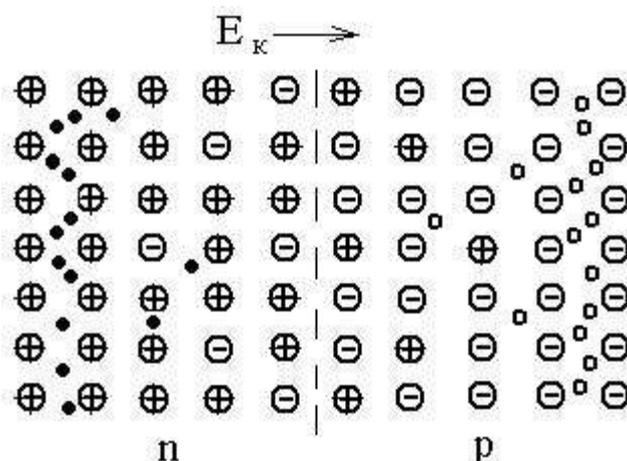


Рис.3 р – n переход: · – электроны; □ – дырки; ⊕ ⊖ – ионы

Диффундируя во встречных направлениях через пограничный слой, р – n переход, дырки и электроны рекомбинируют друг с другом, вследствие чего р – n переход оказывается сильно обедненным носителями заряда и приобретает большое сопротивление. Одновременно на границе между областями возникает двойной электрический слой, образованный отрицательными ионами акцепторной примеси, заряд которых не компенсируется дырками, и положительными ионами донорной примеси, заряд которых не компенсируется электронами (см. рисунок 3). Электрическое поле этого слоя E_k (р – n перехода) препятствует дальнейшему переходу основных носителей, т.е. дырок в n – область и электронов в р – область. В области р – n перехода возникает потенциальный барьер eU_k . Равновесие достигается при такой высоте

потенциального барьера eU_k , когда уровни Ферми E_F обеих областей располагаются на одной высоте (см. рисунок 4).

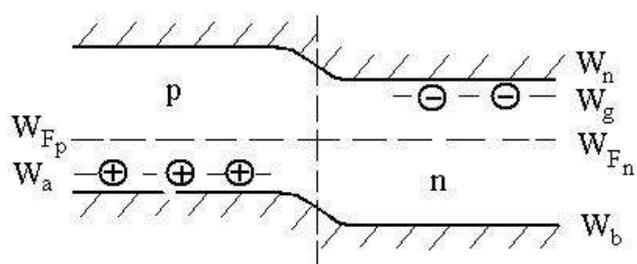


Рис.4 Расположение энергетических зон в области p – n перехода

Изгиб энергетических зон в области p – n перехода вызван тем, что потенциал p – области в состоянии равновесия ниже, чем потенциал n – области, соответственно потенциальная энергия электрона $W_{pэ}$ в p – области больше, чем в n – области (см. сплошную кривую на рисунке 5). Так как заряд дырок положителен, то их потенциальная энергия W_{pd} больше там, где меньше потенциальная энергия электронов, т.е. в n – области, и наоборот меньше там, где потенциальная энергия электронов больше, т.е. p – области (см. пунктирную кривую на рисунке 5)

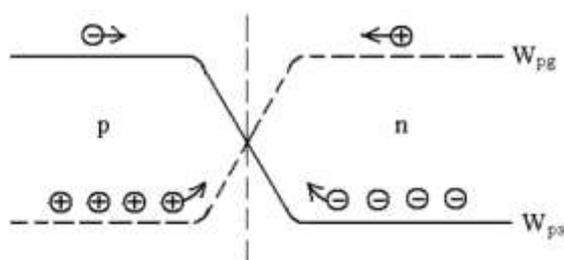


Рис.5. Потенциальная энергия электронов и дырок в области p – n перехода.

В состоянии равновесия некоторому количеству основных носителей удается преодолеть потенциальный барьер, вследствие чего через переход идет ток $I_{осн.}$. Этот ток компенсируется встречным током неосновных носителей $I_{неосн.}$. Неосновных носителей очень мало, но они легко проникают через p – n переход, «скатываясь» с потенциального барьера (см. рисунок 5). Сила тока неосновных носителей $I_{неосн.}$ определяется числом рождающихся каждую секунду неосновных носителей и от высоты потенциального барьера почти не зависит. Сила тока основных носителей сильно зависит от высоты потенциального барьера. Равновесие устанавливается при такой высоте потенциального барьера, когда оба тока $I_{осн.}$ и $I_{неосн.}$ компенсируют друг друга.

Осветим $p - n$ переход со стороны, например, $n -$ области. В области, прилегающей к $p - n$ переходу, под действием света генерируются пары «электрон – дырка», которые в следствие диффузии подходят к переходу, где они разделяются под действием контактного поля. Дырки, как неосновные носители в n полупроводнике переходят в p полупроводник, так как контактное поле способствует их переходу (E_k направленно из $n -$ области в $p -$ область).

Электроны не могут преодолеть потенциальный барьер, отталкиваются полем и диффундируют в $n -$ область. В результате этого электронный полупроводник заряжается отрицательно, а дырочный – положительно; появляется дополнительное электрическое поле, вектор напряженности которого E_ϕ противоположен вектору напряженности контактного поля E_k (см. рисунок 6). Возникающая при этом разность потенциалов и представляет фото-ЭДС ε_ϕ .

Возникшая фото-ЭДС уменьшает потенциальный барьер $p - n$ перехода на величину ε_ϕ , что приводит к появлению дополнительных потоков основных носителей, направленных навстречу друг другу. При этом токи направлены в одну сторону: из p в $n -$ область, по своему характеру они подобны току, протекающему через $p - n$ переход в прямом направлении.

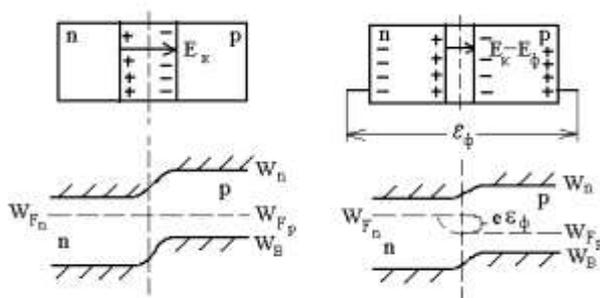


Рис.6. Потенциальная энергия электронов и дырок в области $p - n$ перехода: а) при термодинамическом равновесии; б) при освещении

Стационарное состояние устанавливается тогда, когда число создаваемых светом пар «электрон – дырка» сравняется с числом носителей заряда, уходящих за счет тока через $p - n$ переход во внешнюю цепь. Если внешнюю цепь разомкнуть, то ток продолжается до тех пор, пока встречные потоки электронов и дырок не сравняются и ток станет равным нулю.

Величина фото – ЭДС зависит от интенсивности светового потока. При малых интенсивностях светового потока фото – ЭДС прямо пропорциональна световому потоку, при больших – достигает насыщения.

Максимальное значение фото – ЭДС определяется контактной разностью потенциалов p – n перехода, т.е.

$\varepsilon_{\text{фmax}} = (W_{\text{Fp}} - W_{\text{Fn}}) / e$, и может принимать значения от сотых долей до одного вольта.

Электрические параметры фотоэлектрических системы и их характеристики

Солнечная батарея представляет собой источник тока, т.е. они могут поддерживать протекание в проводнике тока определенной силы. Им не страшно короткое замыкание и они переносят его совершенно безболезненно. В остальном использовать энергию, получаемую от солнечных модулей можно использовать также как и энергию, получаемую из других источников. Но мощность генерируемая этим источником тока находится в большой зависимости от освещения. В большей степени это касается величины тока, напряжение меньше подвержено зависимости от освещенности. Набежавшее облако может существенно уменьшить мощность, генерируемую фотоэлементом. Зависимость тока, а следовательно и мощности фотоэлемента от освещенности близка к линейной. Даже серийно производимые элементы не могут быть полностью идентичны, В последовательной цепочке один элемент с током отличающимся от тока остальных элементов в меньшую сторону по причине затененности или дефекта качества может уменьшить мощность всего изделия. Ситуация аналогична ситуации с засорившимся участком водопроводной трубы. Именно поэтому элементы перед сборкой подвергаются сортировке. Характеристики ФЭП из кристаллического кремния нелинейны и закон Георга Ома для их описания не подходит. Кривая для описания их характеристик носит название **вольтамперной характеристики (ВАХ), рис.7.[5]**

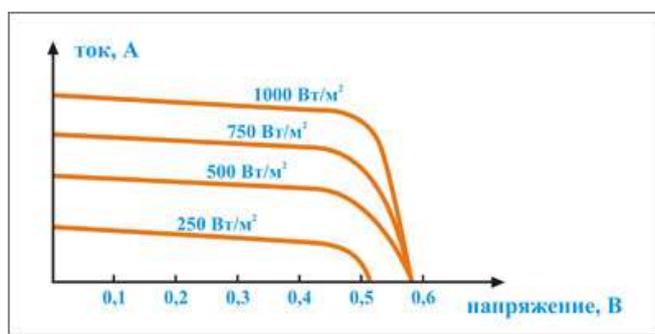


Рис.7 вольтамперной характеристики (ВАХ)

Где, W_p -максимальная мощность, Вт;

U_{xx} – напряжение холостого хода, В;

U_p – рабочее напряжение, В;

U_n – номинальное напряжение

$I_{кз}$ - ток короткого замыкания, А;

I_p – рабочий ток, А.

Вольт – амперная характеристика выражает зависимость фототока I_{Φ} (при постоянном световом потоке) от приложенного напряжения U . Для большинства фотосопротивлений в рабочем режиме эта зависимость линейна. При этом под фототоком понимают разность между световым I_C и темновым I_T током:

$$I_{\Phi} = I_C - I_T.$$

Напряжение при котором ток равен 0, называется напряжении холостого хода (U_{xx}). С другой стороны, ток при котором напряжение равно 0, называется током короткого замыкания ($I_{кз}$). В этих крайних точках мощность батареи (модуля) рав-

но 0. На практике, система работает при комбинации тока и напряжения, когда вырабатывается достаточный мощность. Лучшее сочетание называется точкой максимальной мощности (ТММ).

Соответствующие напряжение и ток обозначаются как U_n (номинальная напряжение) и I_n (номинальный ток). Именно для этой точки определяются номинальная мощность и КПД солнечного модуля. КПД представляет собой отношение максимальной мощности, которую можно получить от фотоэлемента, к полной мощности светового потока, подающего на рабочую поверхность фотоэлемента. $\eta = \frac{P_{max}}{P}$ к основным процессам, приводящим к уменьшению КПД фотоэлемента, относят: отражение от поверхности полупроводника, фотоэлектрическим неактивное поглощение квантов света (поглощение без образования пар носителей электрон-дырка) рекомбинацию неравновесных носителей ещё до их разделения электрическим полем p-n переходы, а также потери мощности при прохождении тока через объемное сопротивление базы фотоэлемента.

Световая характеристика выражает зависимость фототока от падающего на фотосопротивление светового потока постоянного спектрального состава при постоянном приложенном напряжении. Световые характеристики фотосопротивления, как правило, нелинейны. С другой стороны световые характеристики фотоэлемента – это зависимости

фото - ЭДС и тока короткого замыкания фотоэлемента от освещенности фотоэлемента.[6]

а) при малой освещенности зависимости $I_{к.з} \sim J$ линейна, т.к. ток прямо пропорционален количеству родившихся электронно–дырочных пар:

$$I_{к.з} \sim g,$$

а количество появившихся электронного – дырочных пар, в свою очередь, прямо пропорционально количеству поглощенных квантов свете:

$$\rho = \eta \alpha J,$$

где α - показатель поглощения, J – интенсивность света, η - внутренний квантовый выход. Для кремневых фотодиодов η -100%. Квантовый выход можно определить по экспериментальной зависимости $I_{кз}(J)$.

Пропорциональность $I_{кз} \sim g$ обусловлена тем, что р-область конструктивно изготовлена так, чтобы ее толщина была значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда. Поэтому практически все неосновные носители, возникшие в р-области в результате световой генерации, доходят до р-п перехода и принимают участие в образовании фототока. Во всяком случае потери неосновных носителей на рекомбинацию в р-области и на поверхности практически не зависят от освещенности, т.к. исходный полупроводник содержит малое количество неконтролируемых примесей, которые могли бы выполнять роль рекомбинационных ловушек и ловушек захвата. Отклонение световых характеристик от линейной зависимости связано с уменьшением высоты потенциального барьера при накоплении избыточного заряда электронов рп-области и дырок в р-области.

б) По мере увеличения освещенности возрастает накопление зарядов, и дополнительная разность потенциалов все сильнее понижает потенциальный барьер. За счет этого увеличивается вклад прямого тока, и зависимость становится сублинейной. (рис 8)

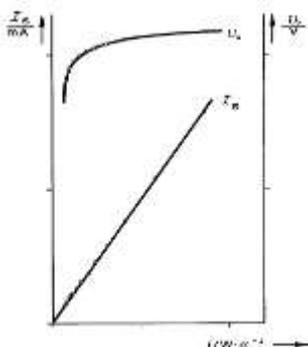


Рис.8. Ток короткого замыкания I_s и напряжение холостого хода U_o как функция интенсивности света J .

Спектральная характеристика – выражает зависимость чувствительности фотосопротивления от длины волны света при постоянной величине светового потока и при постоянном приложенном напряжении.

Наиболее важным параметром любого фотоэлемента является его чувствительность. При определении чувствительности фотоэлемента (фотосопротивление) необходимо учитывать зависимость фототока от спектральной состава излучения и величины падающего светового потока, а также от величины приложенного напряжения. При этом различают удельную, спектральную, интегральную, чувствительность и крашнит изменения фотосопротивления.

Наиболее простой физический смысл имеет интегральная чувствительность. Из первого закона фотоэффекта (закон Столетова) известно, что величина фототока пропорциональна световому потоку. Если ввести коэффициент пропорциональности γ , то можно записать равенство:

$$I_{\phi} = \gamma \Phi$$

Этот размерный коэффициент γ и представляет интегральную чувствительность, его размерность равна МКА/лм.

$$I_{\phi} = I_c - I_T = \gamma \Phi \quad \text{то :} \quad I_c = \gamma \Phi + I_T \quad (8)$$

т.е в узком интервале освещенностей величины вида $\gamma = kx + b$, представляющем уравнение прямой, заданной с помощью углового коэффициента. Этот коэффициент определяется как частная производный :

$$k = \frac{dy}{dx} \quad \text{или} \quad \gamma = \frac{\Delta I_c}{\Delta \Phi} \quad (9)$$

где ΔI_c - изменение тока через фотосопротивление при изменение светового потока на величину $\Delta \Phi$. Если задать $\Delta \Phi = 1$ лм, то интегральная чувствительность характеризует силу тока, вызывает под действием излучений в узком интервале длин волн.

Коэффициент поглощения материала показывает, насколько глубоко в материал может проникнуть световая волна определенной длины до полного поглощения. Маленький коэффициент поглощения означает, что свет не поглощается материалом. Коэффициент поглощения света солнечного элемента зависит от двух факторов: материала, из которого сделан в том, что солнечный свет, энергия которого ниже запрещенной энергетической зоны (щели) материала, не может освободить электрон. Поэтому этот свет не поглощается.

Запрещенная энергетическая зона полупроводникового материала – это минимальная количество энергии, необходимой для переводы электрона в свободное состояние. В свободном состоянии электрон может быть вовлечен в

процесс проводимости. Нижний энергетический уровень полу проводника называется “ валентной зона”. Верхний энергетическом уровень (на котором электрон может свободного перемещается) называется “ зона проводимости”.

Запрещенная энергетическая зона – это разница между зоной проводимости и валентной зоной.

Параметры и характеристики фотоэлементов подвержены изменениям под влиянием температуры, что обычно отражает в виде зависимости параметров фотоэлементов от температуры или температурных коэффициентов.

Температура является основным фактором в работе фотоэлектрических элементов. С повышением температуры наблюдается небольшое увлечение тока короткого замыкания $I_{кз}$ и значительно снижение величины напряжения холостого $U_{хх}$. Падения напряжения $U_{хх}$ приводит к изменению величины напряжения U_{max} и сдвигу положения рабочей точки (ТММ). В результате это отрицательно влияет на производительность и снижает эффективность устройства.

Параметры тока короткого замыкания $I_{кз}$ и последовательное сопротивление $R_{посл}$ будут пропорционально увеличиваться при повышении температуры. Для остальных параметров, т.е напряжения $U_{хх}$ разомкнутой цепи и параллельного сопротивления $R_{парал.}$, с повышением температуры значения уменьшается.

Выводы

Интеграции в фотоэлектрической системы к электрораспределительной сети; является процессом соединения фотоэлектрической системы к электрическую сеть для параллельной работа, с учётом их параметров.[7]

Используемые в фотоэлектрических системах инверторы предназначены для преобразования постоянного тока, вырабатываемого фотоэлектрической батареей, в переменный ток для питания нагрузок объекта, для электроснабжения которого установлена фотоэлектрическая система, и использования в электрораспределительной сети.

Фотоэлектрическая система должна контролировать отклонения значений всех параметров качества генерируемой электроэнергии и реагировать соответствующим образом для обеспечения синхронизации между фотоэлектрической системой и электрораспределительной сетью.

Параметры распределительной электрической сети, выходные параметры фотоэлектрической системы и их допустимые отклонения должны быть указаны в документации на подключение.[7]

Литературы

- 1.Л. А. Липницкий, Н. Д. Сирисько, А. А. Быкова, А. А. Бутько «ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ», Минск, Республике Беларусь, 2020. Стр.399-402.
- 2.Лабораторная работа 4.8 <https://mydocx.ru/1-50198.html>
- 3.Внутренний фотоэффект <https://mydocx.ru/4-80357.html>
- 4.Вентельные фотоэффект <https://mydocx.ru/4-80358.html>
- 5.Солнечные элементы фотоэлектрических систем
<https://solbat.su/solelt/general/>
6. Световая характеристика фотоэлемента.
<https://studfile.net/preview/424485/page:4/>
7. Системы фотоэлектрические. Подключение к распределительным электрическим сетям. ГОСТ.Р МЭК 61727-2016