

Измерение вольтамперной характеристики солнечного элемента.

Цель работы:

1. Изучить устройство и принцип действия солнечных элементов.
2. Экспериментально построить вольтамперную и нагрузочную характеристики батареи солнечных элементов.
3. Определить ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, максимальную мощность, отдаваемую батареей солнечных элементов в нагрузку.

Теоретические сведения

Преобразование солнечной энергии в электрическую.

Большинство фотоэлементов представляют собой кремниевые полупроводниковые фотодиоды (рис. 1). Первые фотодиоды были изготовлены в 1954 г. Технология их изготовления быстро совершенствуется. В настоящее время с помощью солнечных полупроводниковых батарей обеспечиваются энергией искусственные спутники Земли.

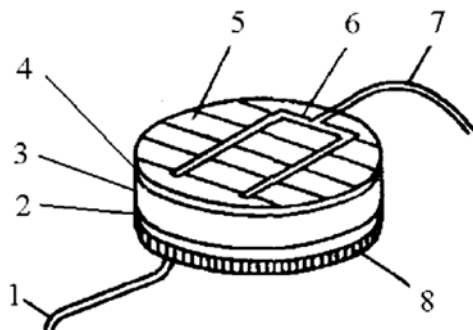


Рис. 1. Типичная структура солнечного элемента с p-n-переходом (стеклянная или пластиковая крышка элемента и фильтр между элементом и крышкой не показаны).

1 — контакт от лицевой поверхности предыдущего элемента; 2 — добавочный потенциальный барьер $p+-Si$ толщиной 0.2 мкм; 3 — слой $p-Si$ толщиной 250÷400 мкм; 4 — слой $n-Si$ толщиной 0.2÷1.0 мкм; 5 — противоотражательное покрытие; 6 - лицевой контакт; 7 — к тыльному контакту следующего элемента; 8 — металлический контакт с тыльной стороны.

Метод преобразования солнечной энергии в электрическую с помощью полупроводниковых солнечных элементов (СЭ) является в настоящее время наиболее разработанным в научном и практическом плане. Он широко используется в системах энергопитания космических аппаратов и получает все большее применение в наземных условиях для обеспечения электроэнергией автономных потребителей (переносная аппаратура, маяки, метеостанции, освещение остановок автотранспорта и т.п.).

Очевидным недостатком солнечного излучения, как источника энергии, является неравномерность его поступления на земную поверхность, определяемая суточной и сезонной цикличностью, а также погодными и климатическими условиями. Другим, еще более существенным недостатком солнечного излучения как источника энергии является

его низкая плотность. Нужно отметить также высокую стоимость технологии получения материалов для создания солнечных элементов.

В настоящее время, благодаря разработке прогрессивных технологий получения СЭ на основе монокристаллического кремния их стоимость снижена до величины менее 10 долларов за 1 Вт установленной пиковой мощности при коэффициенте полезного действия около 15%. На основе ленточного поликристаллического, а также тонкопленочного аморфного кремния, созданы СЭ с КПД до 13 %. Такие же значения КПД достигнуты в тонкопленочных СЭ на основе гетеропереходов $CuInSe_2-CdS$.

ВАХ солнечного элемента. Фотоэлектрические свойства p-n-перехода.

Солнечная батарея это полупроводниковый прибор, преобразующий солнечный свет в электрическую энергию. Она представляет собой p-n-переход с омическими контактами (рис. 2).

Если энергия квантов света больше ширины запрещенной зоны полупроводников p-n-перехода, то под действием света генерируются электрон-дырочные пары. Они разделяются полем потенциального барьера в области перехода и движутся в n- и p-области, где они являются основными носителями. В результате, электронов в n-области и дырок в p-области становится в избытке и эти области приобретают отрицательный и положительный заряды, соответственно. При отсутствии внешней цепи, накопление зарядов вызывает понижение и даже исчезновение потенциального барьера. Как следствие, разделение пар прекращается. Наступает состояние равновесия – насыщение. Напряжение возникающее в таком состоянии на p-n-переходе называют *напряжением размыкания* или *холостого хода* U_{xx} . Подключив к прибору внешнюю цепь, можно отбирать электроэнергию.

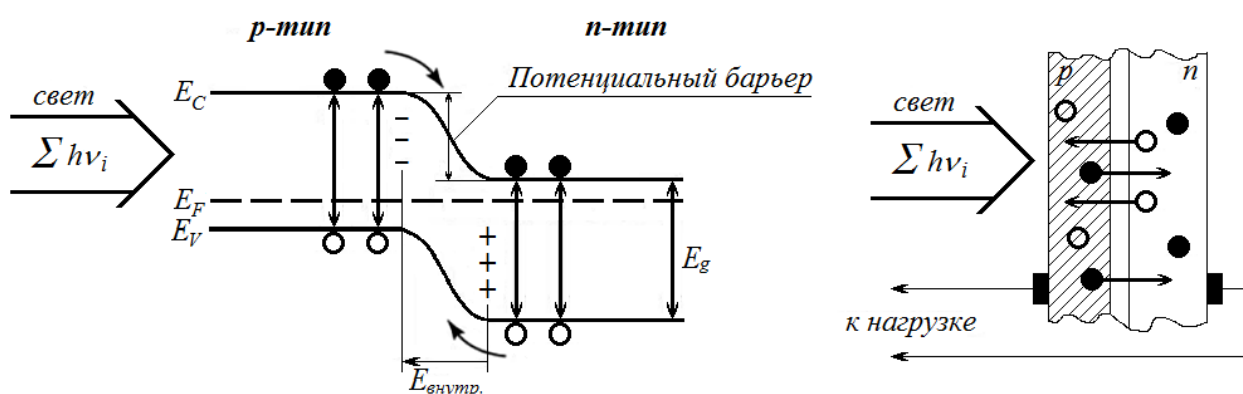


Рис. 2. Диаграмма энергетических уровней и структура солнечной батареи

Для солнечных батарей желательно применять материалы с шириной запрещенной зоны $1.0 \div 2.2$ эВ. Кроме того, материалы должны быть с долгоживущими носителями и малой скоростью поверхностной рекомбинации. Кристаллический кремний – не самый подходящий материал, но обилие сырья и накопленный технологический опыт делают его удобным для широкого применения. Широко используются аморфный кремний и соответствующие p-n-переходы на базе $\alpha-Si$ и $\alpha-SiC$.

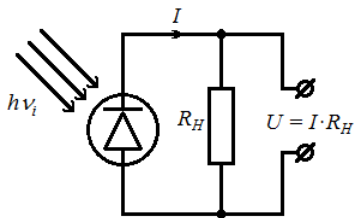


Рис. 3.

При освещении солнечного элемента на базе р-п-перехода, в последнем возникает обратный фототок I_ϕ от электрода с большим отрицательным зарядом (катода) к электроду с большим положительным зарядом (аноду) через нагрузочное сопротивление R_H , на котором падает напряжение нагрузки $U = I \cdot R_H$ (рис. 3).

Прямой ток через р-п-переход в режиме разомкнутой внешней цепи (без нагрузочного сопротивления R_H) составляет величину

$$J_T = J_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{AeU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

Тогда суммарный ток при выключенной нагрузке будет

$$J_H = J_T - J_\phi = J_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{AeU}{kT}\right) - 1 \right) - J_\phi, \quad (2)$$

так как внутренний ток р-п-перехода и фототок противоположных знаков. В режиме холостого хода, когда нагрузка отсутствует и цепь разорвана $J_H = 0$ и

$$U \equiv U_{xx} = \frac{kT}{Ae} \cdot \ln\left(\frac{J_\phi}{J_0} + 1\right), \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $0.86 \cdot 10^{-4}$ эВ/К), e – элементарный заряд ($e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Если снять ВАХ элемента солнечной батареи в темновом режиме и при освещении, то получится два графика зависимости тока от напряжения (рис. 4).

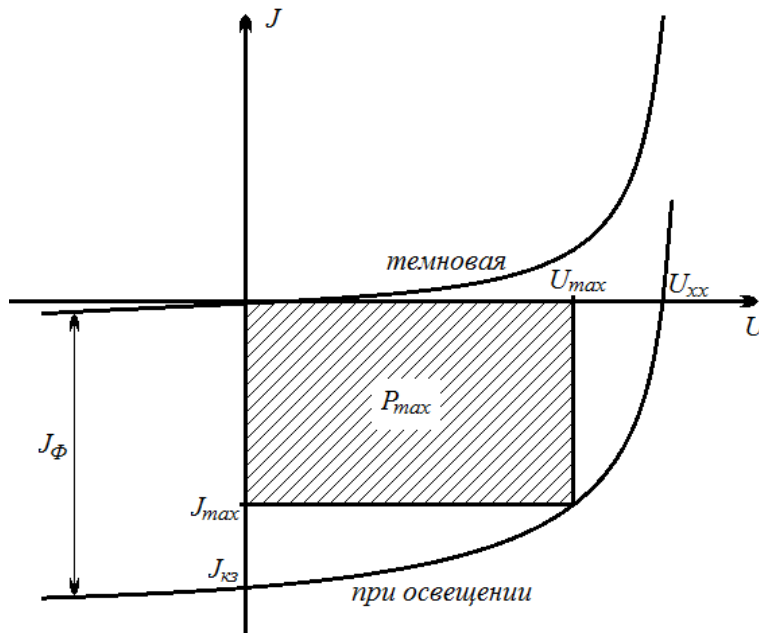


Рис. 4. ВАХ солнечного элемента в темноте и при освещении.

U_{xx} – напряжение холостого хода (размыкания);

$J_{кз}$ – ток короткого замыкания контактов в цепи без участия нагрузочного сопротивления;

J_ϕ – обратный фототок.

При отсутствии внешнего напряжения активный режим ВАХ солнечного элемента будет соответствовать отрицательной области тока и положительной области напряжения. Здесь же указаны характеристические точки напряжения холостого хода U_{xx} , тока короткого замыкания $J_{кз}$ и значения обратного фототока J_ϕ .

Мощность P , выделяющаяся на нагрузке R_H :

$$P = I \cdot U = \left(J_0 \cdot \left(\exp\left(\frac{AeU}{kT}\right) - 1 \right) + J_\phi \right) \cdot U, \quad (4)$$

На рис. 4. мощность P соответствует площади прямоугольника с некоторыми значениями J и U . В крайних точках $J_{кз}$, U_{xx} мощность $P = 0$, а, следовательно, кривая мощности $P(J, U)$, описываемая уравнением (4) будет иметь максимум в зависимости от тока или напряжения. Другими словами,

$$\left(\frac{dP}{dU} \right) \Big|_{J=J_{кз}, U=U_{xx}} = 0.$$

Решая это уравнение, можно получить:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{\max} = -\frac{J_\phi}{1 + \frac{1}{A \cdot U_{\max}}} \approx -J_{кз} \cdot \left(1 - \frac{1}{A \cdot U_{\max}} \right) \\ U_{\max} = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{\frac{J_\phi}{J_0} + 1}{1 + A \cdot U_{\max}} \right) \approx U_{xx} - \frac{kT}{e} \cdot \ln(1 + A \cdot U_{\max}) \\ P_{\max} \approx J_{кз} \cdot \left[U_{xx} - \frac{kT}{e} \cdot \ln(1 + A \cdot U_{\max}) - \frac{kT}{e} \right] \end{array} \right. \quad (5)$$

Анализ системы уравнений и график ВАХ позволяют установить ограничения параметров: $J_{\max} < J_{кз}$, $U_{\max} < U_{xx}$, $P_{\max} < J_{кз} \cdot U_{xx}$. В соответствии с этим, $P_{\max} \approx (0.7 \div 0.8) \cdot J_{кз} \cdot U_{xx}$.

Схема установки

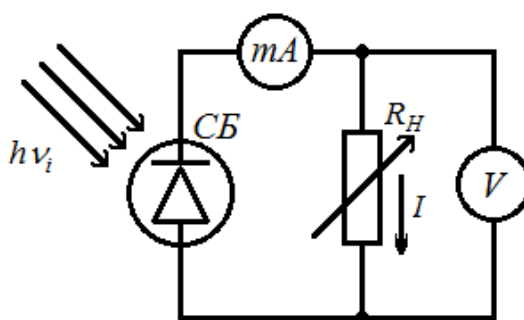


Рис. 5. Схема экспериментальной установки.

СБ – солнечная батарея на основе $Si-H$;

R_H – нагрузочное переменное сопротивление – магазин сопротивлений измерительный Р33 с пределом измерения до 99999.9 Ом;

mA – миллиамперметр $0 \div 50$ мА;

V – многопредельный стрелочный измерительный прибор, который в схеме измеряет постоянное напряжение на пределе 30 В на нагрузочном сопротивлении R_H .

Порядок измерений

1. Установить нагрузку $R_H = 5 \text{ Ом}$.
2. Включить освещение солнечной батареи.
3. С помощью магазина сопротивлений Р-33, установить величину тока $J_{\max} = 25 \text{ мА}$, близкую к значению тока короткого замыкания $J_{кз}$.
4. Измерить величину падения напряжения на нагрузочном сопротивлении с помощью милливольтметра (V), предварительно определив цену деления $V(\text{V/дел.})$ для предела измерения 30 В .
5. Занести в таблицу значения $R_H, \text{ мА}, V$.
6. Определить ток через сопротивление R_H , как отношение падения напряжения к величине сопротивления.
7. Увеличивая нагрузочное сопротивление, повышать падение напряжения на R_H на $\Delta U = 1 \text{ мВ}$. Заносить в таблицу значения показаний приборов согласно п.5.
8. Проводить измерения до тех пор, пока изменения показаний V не прекратятся.
9. Увеличивая сопротивление R уменьшать показания мА с шагом $\Delta I = 1 \text{ мА}$, записывая показания $R, V, \text{ мА}$ до тех пор, пока показания миллиамперметра не будут близки к нулю. Значение падения напряжения в этом случае соответствует U_{\max} и близко к напряжению холостого хода.
10. Используя полученные значения токов и напряжений, построить вольт-амперную характеристику при освещении солнечного элемента.
11. Для 5 – 6 значений напряжений на R_H для сопротивлений $R_1 = 0.1 \text{ Ом}, R_2 = 1 \text{ Ом}, R_3 = 10 \text{ Ом}$ рассчитать по закону Ома ток и построить на ВАХ нагрузочные прямые.
12. По U_{\max} и J_{\max} рассчитать P_{\max} .

Литература

1. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: Учеб. Пособие – 3-е изд., Москва. Техносфера. 2008 г. 512 с.