ТЕМПЕРАТУРНОЕ СТИМУЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Алиев Р., Икрамов Р. Г., Алиназарова М.А.

Яримўтказгичли қуёш элементи токининг зичлигига хароратнинг таъсири ўрганилган. Фотогальваник характеристиканинг хароратга боғлиқлигини тушунтирувчи янги тенглама олинган.

***Калит сўзлар**: яримўтказгичли қуёш элементи, эффектив ток зичлиги, ВАХнинг ноидеаллик коэффициенти, хароратга боғлиқлик.*

Исследовано влияние температуры на эффективное значение плотности тока полупроводникового солнечного элемента. Получено новое выражение, объясняющее зависимость фотогальванической характеристики от температуры.

***Ключевые слова**: полупроводниковый солнечный элемент, эффективное значение тока, коэффициент неидеальности ВАХ, температурная зависимость.*

The influence of temperature on effective value of density of the current of a semiconductor solar cell is investigated. New equation explaining the dependence of photogalvanic characteristics on temperature is obtained.

***Keywords**: semiconductor solar cell, effective value of current, non ideality of I-V, temperature dependence.*

Влияние температуры окружающей среды и, следовательно, самого солнечного элемента (СЭ) на его фотогальванические характеристики и эффективность фотоэлектрического преобразования полупроводниковыми структурами является наиболее важным объектом экспериментального и теоретического исследования. Известно, что одной из основных фотогальванических характеристик солнечных элементов (СЭ), определяющих эффективность преобразования солнечной энергии, является эффективная мощность, которая традиционно выражается в виде [1]:

$$P_{эф} = j_{эф} U_{эф}, \quad (1)$$

где $j_{эф}$- и $U_{эф}$- являются эффективными значениями соответственно плотности тока и напряжения СЭ.

Экспериментальные результаты показывают, что эффективные значения плотности тока СЭ зависят от температуры. Но в научной литературе почти не представлены выражения, позволяющие предварительно определить эти зависимости.

Поэтому в данной работе излагаются результаты проведенного нами исследования по определению полуэмпирическим методом зависимости эффективного значения плотности тока СЭ от температуры.

На рис. 1 представлен качественный метод определения точки эффективной мощности из экспериментальной фотоэлектрической ВАХ (3-кривая) СЭ. Для этого сначала определяют прямую, проходящую через две точки ВАХ, откуда выявляются напряжения холостого хода и плотность тока короткого замыкания, т. е. (U_{xx}; 0) и (0; $j_{кз}$) (1-прямая линия). Параллельным сдвигом этой линии до точки касания с ВАХ СЭ можно получить 2-прямую линию. Именно из этой точки касания определяют эффективную мощность СЭ. Основываясь на этом методе, можно вывести формулу, определяющую эффективное значение плотности тока, вырабатываемого СЭ.

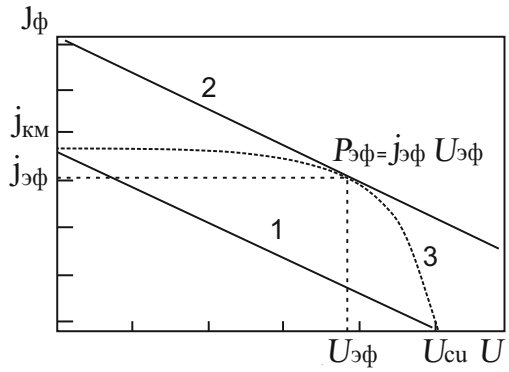

***Рис. 1.** Метод определения точки эффективной мощности из экспериментальной фотоэлектрической ВАХ солнечного элемента*

Как известно, уравнение для прямой линии, проходящей через две точки имеет следующий вид

$$\frac{j-j_1}{j_2-j_1}=\frac{U-U_1}{U_2-U_1}. \quad (1)$$

Из этого уравнения можно получить для 1-прямой линии (рис. 1):

$$j=\frac{j_{кз}}{U_{xx}}U+j_{кз}. \quad (2)$$

Видно, что угловой коэффициент этой прямой имеет значение $a=\frac{j_{кз}}{U_{xx}}$. Уравнение для 2-прямой линии также имеет вид $j=aU+b$. Так как, 2-прямая линия является касательной на ВАХ СЭ, поэтому угловой коэффициент этой линии можно определить из ВАХ СЭ

$$j_ф=j_0\left(\exp\left(\frac{eU}{nkT}\right)-1\right)-j_{кз}, \quad (3)$$

где $j_ф$ - плотность фототока, j_0-плотность тока насыщения, e- заряд электрона, k- постоянная Больцмана, T-температура.

Известно, что значение коэффициента неидеальности (n) ВАХ СЭ определяется типом электрического тока [2]. Поэтому можно предположить, что выходящее напряжение СЭ не зависит от этого параметра. Определяем производную по напряжению от ВАХ СЭ и найдем его значение при $U=U_{эф}$, тогда для a получим:

$$a=j_ф^{'})U_{эф}\ \left(=j_0\frac{e}{nkT}\exp\left(\frac{eU_{эф}}{nkT}\right)\right). \quad (4)$$

Из условия параллельности двух прямых линий, угловой коэффициент этих линий должен быть одинаковым:

$$\frac{j_{кз}}{U_{xx}}=j_0\frac{e}{nkT}\exp\left(\frac{eU_{эф}}{nkT}\right). \quad (5)$$

Из равенства (5) для эффективного значения напряжения ($U_{эф}$) СЭ получим:

$$U_{эф}=\frac{nkT}{e}\ln\left(\frac{j_{кз}}{j_0}\frac{nkT}{eU_{xx}}\right) \quad (6)$$

Подставляя выражению определяющее эффективное значение напряжения ВАХ СЭ, получаем для эффективного значения плотности тока:

$$j_{эф}=j_0\left(\exp\left(\frac{eU_{эф}}{nkT}\right)-1\right)-j_{кз}. \quad (7)$$

$$j_{эф}=j_{кз}\left(\frac{nkT}{eU_{xx}}-1-\frac{j_0}{j_{кз}}\right). \quad (8)$$

Как известно, и j_0-ток насыщения, и $j_{кз}$-ток короткого замыкания, и U_{xx}-напряжение холостого хода зависят от температуры [3, 4]:

$$j_0=j_{00}\exp\left(-\frac{e\varphi}{k}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right), \quad (9)$$

$$j_{кз}=j_{00}\exp\left[\frac{e\varphi}{k}\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)\right]\left[\exp\left[\frac{e\varphi}{nkT_0}\left(\frac{U_{0xx}}{\varphi}-1+\frac{T_0}{T}\right)\right]-1\right], \quad (10)$$

$$U_{xx}=(U_{0xx}-\varphi)\frac{T}{T_0}+\varphi. \quad (11)$$

Как показано в работе [5], коэффициент неидеальности ВАХ СЭ почти не зависит от температуры в интервале 100<T<500 К.

С другой стороны, зависимость высоты потенциального барьера *ц* от температуры СЭ при не очень низких температурах можно описать в виде:

$$\varphi = \varphi_0 - \gamma T, \quad (12)$$

где $ц_o$ - высота потенциального барьера при температуре *T*=0, *г*-температурный коэффициент высоты потенциального барьера, имеющий одинаковый смысл с температурным коэффициентом ширины запрещенной зоны [2]. Значение $ц_o$ можно определить из формулы (11), экстраполируя зависимость напряжения холостого хода от температуры ($U_{xx}(T)$) на *T*=0 К. Из температурной зависимости ширины запрещенной зоны известно, что значение температурного коэффициента высоты потенциального барьера лежит в интервале 10^{-3}ч10^{-5} В/К [6].

На рис.2 представлены результаты эксперимента (кривая-1) и расчета (кривая-2), полученные по (10) температурной зависимости тока короткого замыкания СЭ, изготовленного на основе *AlGaAs-GaAs* [1]. Соответствие результатов эксперимента и расчета (участок *Б*) получено при: *n*=1,0028; $ц_0$=1,42 В и г=5,10^{-5} В/К. Из рисунка видно, что выражение (10) не только объясняет результаты опытов, но и дополняет их (участки *А* и *В*). Расчеты показали, что токи короткого замыкания этих СЭ при *T*=500 К имеют слабый максимум ($J_{кз}$≈122 мА), при температурах ниже *T*=120 К и выше *T*=620 К начинают сильно уменьшаться. Определено также, что токи короткого замыкания при температурах *T*<110 К и *T*>770 К будут равны нулю ($J_{кз}$=0). Эти результаты еще раз показывают правильность выражений, полученных в работах [3, 4].

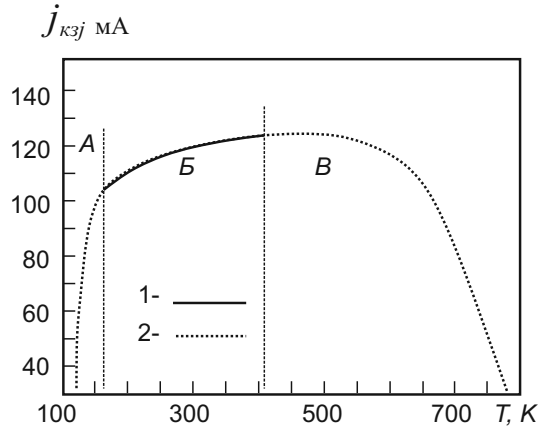

Рис.2. *Зависимость плотности тока короткого замыкания от температуры СЭ. 1-эксперимент [1] и 2-результаты расчета из выражения (10), когда n=1,0028; $ц_0$=1,42 В и г=5,10^{-5} В/К.*

Теперь перейдем к расчету температурной зависимости эффективного значения плотности тока СЭ. Поставляя выражения для плотности токов j_0-насыщения и $j_{кз}$ – короткого замыкания и U_{xx}- напряжение холостого хода в (8) можно получить формулу, определяющую температурную зависимость эффективного значения плотности тока СЭ.

На рис. 3 приведены результаты эксперимента (кривая-1) и расчета (кривая-2), полученные по этой формуле для СЭ на основе *AlGaAs-GaAs* [1]. Соответствия этих результатов (участок *Б*) получены при значениях *n*=2,5; $ц_0$=1,42 В и г=5,10^{-5} В/К. Видно, что в выражениях, полученных для температурной зависимости плотностей тока короткого замыкания и эффективного значения тока СЭ от температуры имеет различие только в значениях коэффициента неидеальности ВАХ (*n*) СЭ. Это говорит о том, что типы электрического тока в этих точках ВАХ отличаются друг от друга. Из рисунка видно, что, как плотность, так и ток короткого замыкания, и эффективное значение плотности тока СЭ имеют слабый максимум при *T*=200 К ($J_{эф}$≈119 мА). Значение этой фотогальванической характеристики в температурах ниже *T*=120 К (участок *А*) и выше *T*=470 К (участок *В*) начинают сильно уменьшаться. Расчёты также показали, что при *T*<110 К и *T*>540 К значение эффективной плотности тока равняется нулю ($J_{эф}$=0).

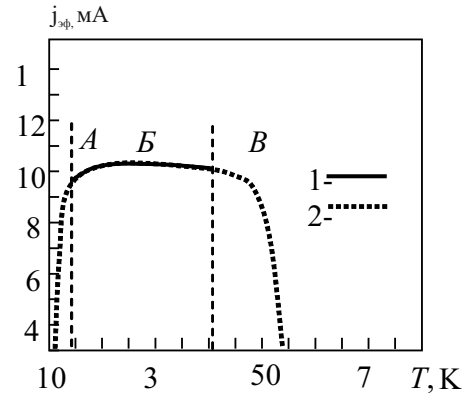

Рис.3. *Зависимость эффективного значения плотности тока СЭ от температуры. 1-эксперимент [1] и 2-результаты расчета, полученные при помощи выражения (8) при n=2,5; ц$_0$=1,42 В и г=2,10^{-4} В/К.*

В заключение можно отметить, что в научном плане исследовано влияние температуры на эффективное значение плотности тока полупроводниковых СЭ. Получено новое выражение, позволяющее более приближенно объяснить экспериментальную зависимость фотогальванической характеристики СЭ от температуры. С практической точки зрения установлено, что СЭ, изготовленные на основе полупроводниковых соединений *AlGaAs-GaAs*, не целесообразно использовать при температурах ниже *T*=110 K и выше *T*=540 K (что вытекает из-за равенства нулю эффективного значения плотности тока таких СЭ).

Литература:

1. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы (теория и эксперимент), М.: Энергоатомиздат, 1987.- 278 с.

2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Книга 1.- М.: Мир, 1984.- 456 с.

3. Зайнобиддинов С., Икрамов Р.Г., Алиев Р., Исманова О.Т., Ниязова О., Нуритдинова М.А. // Гелиотехника.- 2003.- №3.- С.19-22.

4. Алиев Р., Зайнобиддинов С., Икрамов Р.Г., Исманова О.Т., Нуритдинова М.А.//Гелиотехника.- 2003.-№1.- С. 18-22.

5. Алиев Р. Алиназарова М. А., Икрамов Р.Г., Исманова О.Т. // Гелиотехника.- 2009.- № 3.- С. 15-20.

6. Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления.- М.: Мир, 1980.- 208 с.

Андижон давлат университети,
Наманганский муҳандислик-технология институт,
Наманган давлат университети
2018 йил 4 сентябрда қабул қилинган
(Тақризчи: академик С.Зайнобидинов)