

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Э. З. Имамов¹, Р. А. Муминов², М. А. Аскарров³, Х. Н. Каримов¹

¹⁾ *Ташкентский университет информационных технологий*
e-mail: erkinimamov@mail.ru

²⁾ *Физико-технический институт, НПО «Физика-Солнце»*
e-mail: detector@uzsci.net

³⁾ *Каракалпакский государственный университет*
e-mail: asqarovm@list.ru

Параметры роста, оптимальные электрофизические и оптические свойства, обеспечивающие достаточно высокие скорости преобразования солнечного излучения в электричество, а также предсказуемый и контролируемый характер значения КПД, определяются компьютерным моделированием полуфеноменологической модели гетероконтактной структуры и ее вольтамперных характеристик.

Ключевые слова: преобразование солнечного излучения; парниковый эффект; углекислый газ; вольтамперная характеристика; математическое моделирование.

ELECTRICAL PROPERTIES OF A SOLAR CELL

E. Z. Imamov¹, R. A. Muminov², M. A. Askarov³, Kh. N. Karimov¹

¹⁾ *Tashkent University of Information Technologies*

²⁾ *Physical-Technical Institute, NPO "Physics-Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan*

³⁾ *Karakalpak State University*

Corresponding author: E. Z. Imamov (erkinimamov@mail.ru)

Growth parameters, optimal electrical and optical properties that provide sufficiently high rates of conversion of solar radiation into electricity and predictable and controllable nature of the efficiency value are determined by computer simulation of a semiphenomenological model of a heterocontact structure and its current-voltage characteristics.

Key words: conversion of solar radiation; greenhouse effect; carbon dioxide; current-voltage characteristic; mathematical modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс производства электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приобрел в 21 веке всемирный масштаб. Актуальность и целесообразность перехода на возобновляемые источники энергии обоснованы следующими основными причинами: постепенное истощение запасов органического ископаемого топлива; быстрый рост численности населения мира с соответствующим увеличением его энергопотребления; катастрофический рост «парникового эффекта» вследствие накопления углекислого газа (CO₂) на планете.

В настоящее время все страны мира, учитывая современный характер энергопотребления и необходимость обеспечения комфортной жизни будущих поколений людей на планете, ведут поиск технологий и подходящих материалов, способных значительно повысить эффективность солнечных элементов и снизить стоимость продукции солнечной энергетики.

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ

Процесс массового внедрения солнечной энергии происходит в широких масштабах и больших объемах [1–5] с учетом многих сопутствующих глобальных тенденций и препятствующих проблем. Научное обоснование перспектив его использования и совершенствования осуществляется с помощью фотовольтаики, в которой рассматриваются проблемы и противоречия солнечной энергетики с учетом социально-экономических и научно-технологических аспектов.

Основную функцию в процессе преобразования энергии излучения в электричество выполняет солнечный элемент. Перспективы развития солнечной энергетики и ее эффективность в научной сфере зависят от качества солнечного элемента и характеристик его полупроводникового гетероструктурного контактного поля (или $p-n$ -перехода). Прямое преобразование солнечного излучения в электричество осуществляется именно в контактном поле, в котором генерируемые электронно-дырочные пары разделяются на электрон и дырку, а также происходит перенос их на соответствующие электроды.

Солнечные элементы с высокоэффективным разделяющим гетеро- $p-n$ -переходом на полупроводниковой подложке обладают следующими свойствами:

- низкая стоимость технологии их производства;
- общедоступность материалов, используемых при их создании;
- долгосрочное и стабильное функционирование в суровых климатических условиях;
- расширенный спектр поглощения света;
- увеличенная добротность и срок службы солнечного элемента.

В связи с этими характерными особенностями создание эффективных солнечных элементов требует активных исследований, новых технологий и материалов для их производства. Кроме того, необходимо поиск новых, нетрадиционных подходов и методов, как для выбора полупроводниковой подложки, так и для создания гетероконтактного перехода.

В выполненных нами работах [6–10] предлагается применение двух нетрадиционных подходов для повышения эффективности солнечных элементов:

1. Выращивание халькогенидов свинца (PbS , $PbTe$ и $PbSe$), используемых для создания гетероконтактного перехода на поверхности подложки, с применением метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

2. Использование в качестве подложки недорогого материала серийного производства – неупорядоченного, слабокристаллического технического кремния [12, 13].

Выращивание методом МЛЭ на поверхности технического кремния отдельных «островков» высокеемких халькогенидов свинца [11] основано на процессе самоорганизации вещества [12, 13], в результате которого на поверхности площадью 10^{-4} м^2 образуются многочисленные ($>10^7$) стабильные наноразмерные контактные гетероструктуры.

МЕТОД КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Метод математического моделирования, зависящий от выбора изучаемой задачи, сравним по своей универсальности с фундаментальными законами физики. В физике многие сложные явления могут быть объяснены и решены с помощью, так называемого вариационного принципа, согласно которому в качестве вариационного параметра рассматривается определенный коэффициент, характеризующий изучаемую

закономерность достаточно сложного объекта (системы, явления). Изменяя его значение, становится возможным достижение максимального приближение к известной экспериментальной зависимости. Совпадение типа зависимости достигается путем подбора исследуемого «паттерна» довольно сложного объекта, как можно более близкого к известному «паттерну», характерному для более простого варианта этого объекта. Например, вольтамперная характеристика (ВАХ) фотоэлемента со множественными наноразмерными $p-n$ -переходами должна быть очень похожа на ВАХ идеального $p-n$ -перехода, который всесторонне изучался в течение длительного времени, но с другим характеристическим коэффициентом. В данном примере сходство закономерностей отдельных проявлений как у самого простого, так и у довольно сложного объекта, демонстрирует правильность выбора вариационного метода (компьютерного моделирования) для решения данной задачи. Реализуется принцип «от простого к сложному», когда следующий шаг в изучении сложных процессов делается после достаточно детального изучения простой модели. Таким образом, применяя общие утверждения о рассматриваемом объекте (системе, явлении), из всех возможных вариантов его проявления выбираются только те, которые удовлетворяют определенному условию. Согласно этому условию, в качестве переменного параметра сложной системы выбирается определенный параметр, связанный с идеальным объектом и достаточно корректно описывающий экспериментальные проявления, варьируя который, достигается максимальное приближение расчетных значений к экспериментальным данным [15].

СВЕТОВАЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Световая ВАХ солнечного элемента (СЭ) демонстрирует зависимость выходного тока, генерируемого при освещении СЭ и протекающего через подключенную нагрузку, от падения напряжения на этой нагрузке. Уравнение, описывающее световую ВАХ СЭ с наноразмерным гетеропереходом (НРГП), можно представить в следующем виде:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right] - \frac{U}{R_p}, \quad (1)$$

где I – величина тока, протекающего через нагрузку, U – падение напряжения на нагрузке, I_{ph} – величина генерируемого фототока, I_s – величина тока насыщения диода, A – диодный коэффициент (коэффициент неидеальности), e – модуль заряда электрона, k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура, R_p – параллельное (шунтирующее) сопротивление, R_s – последовательное сопротивление.

При исследовании электрических и оптических свойств солнечного элемента с наноразмерными гетеропереходами каждый из них рассматривается как идеальный $p-n$ -переход.

На рисунке представлены ВАХ и эквивалентная схема СЭ с НРГП, соответствующие уравнению (1). ВАХ является важнейшей характеристикой СЭ, поскольку определяет эффективность преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию – КПД СЭ [16, 17]:

$$\eta = \frac{P_m}{P} = \frac{ff \cdot I_{sc} U_{oc}}{P}, \quad (2)$$

где P – мощность падающего на СЭ излучения, P_m – максимальная выходная мощность СЭ, ff – фактор заполнения ВАХ, I_{sc} – ток короткого замыкания и U_{oc} – напряжение холостого хода;

$$ff = \frac{I_m U_m}{I_{sc} U_{oc}}, \quad (3)$$

где I_m и U_m – величины тока и напряжение, соответствующие точке наибольшей мощности P_m .

В силу того, что КПД СЭ зависит от формы его ВАХ, параметры СЭ, входящие в уравнение ВАХ (1), определяют эффективность СЭ. Зная легко измеряемые величины U_{oc} и I_{sc} , можно из этого равенства оценить R_p – величину параллельного сопротивления и R_s – последовательное сопротивление диодной части эквивалентной схемы.

Главными показателями эффективности СЭ являются параметры максимума мощности: I_m , U_m и P_m . Определив напряжение U_m , можно легко найти I_m и P_m . Положение максимума определяется из условия равенства нулю dP/dU – первой производной от мощности СЭ по напряжению U .

Анализируя рассмотренные зависимости, можно сделать вывод о том, что данным методом можно получить требуемые значения параметров СЭ с НРГП, предварительно введя ожидаемые результаты.

Эффективность солнечного элемента со множественными нано-гетеропереходами на бесструктурной подложке подтверждается работами известных научных групп [18–22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

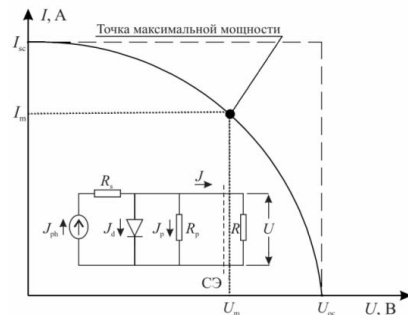
В работе рассмотрены некоторые проблемные аспекты возобновляемых источников энергии и определена целесообразность их активного внедрения.

Показано, что при использовании современных нанотехнологических методов в сочетании с принципом самоорганизации вещества возможно достижение значительного повышения эффективности солнечных элементов и, следовательно, снижение стоимости продуктов солнечной энергетики.

Показано, что математическое моделирование полуфеноменологических вольт-амперных характеристик солнечного элемента позволяет определить его оптимальные эффективные параметры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Rifkin J. If there is no more oil. Who will lead the global energy revolution? = The Hydrogen Economy: The Creation of the World-Wide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth. – Moscow: Secret of the firm, 2006. – 416 p.
2. Kozlov S. I. Hydrogen energy: current state, problems, prospects. – Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2009. – 520 p.



ВАХ и эквивалентная схема СЭ с НРГП:

I_{sc} – ток короткого замыкания,
 U_{oc} – напряжение холостого хода

3. Kuzyk B. N., Yakovets Yu. V. Russia: the strategy of transition to hydrogen energy. – M.: Institute of Economic Strategies, 2007. – 400 p.
4. Under the general editorship of the corresponding member. RAS Ametistova E. V. Vol. 1 edited by Prof. Trukhnia A. D. // Fundamentals of modern energy. In 2 volumes. – Moscow: Publishing House of MEI, 2008.
5. Rezmanov R. Russia in the global hydrogen market. Business economic magazine "Invest-Foresight" (March 30, 2021). Accessed: April 28, 2021. Archived on April 27, 2021.
6. Imamov E. Z., Muminov R. A., Jalalov T. A., Karimov X. N. Ilmiy Xabarnoma-Scientific Bulletin. №1 p. 25–27 (2019).
7. Imamov E.Z., Muminov R.A., Jalalov T.A., Karimov X.N., Ergashev G. Uzbek journal of physics. No. 3. pp. 173–179 (2019).
8. Imamov E. Z., Muminov R. A., Jalalov T. A., Karimov X. N.. Physics of semiconductors and microelectronics. No. 4 Pp. 14–21 (2019).
9. Imamov E. Z., Muminov R. A., Rakhimov R. Kh. Scientific-technical journal (STJ FerPI, 2020, T. 24, №5) pp 31–36 (2020).
10. Imamov E. Z., Muminov R. A. Rakhimov R. Kh. / Analysis of the efficiency of a solar cell with nano-dimensional hetero transitions. Computational nanotechnology. – 2021. – Vol. 5. – P. 47–56.
11. Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Шукин В. А. и др. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. ФТП.1998. Т. 32. №4. –С. 385–410.
12. Пригожин И. Р., Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. – М.,2000.
13. Haken H. // Synergetics // Springer, Berlin-Heidelberg, 1997.
14. Гременок В. Ф., Тиванов М. С., Залесский В. Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2007, – С. 222.
15. Звонарев С. В.. Основы математического моделирования Учебное пособие Из-во Уральского университета, 2019.
16. Рейкви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / Пер. с англ. В. В. Высоцкой и др.; год ред. С. Н. Горина. М., 1984.
17. Васильев А. М., Ландсман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М., 1971.
18. Цой Б. Патент в Евразийском патентном ведомстве. EP2405487 A1. 08.30. 2012.
19. Цой Б. Патент во всемирной организации интеллектуальной собственности. № WO 2011/040838 A2 07. 04.2011.
20. Зимин С. П. Горлачев Е. С. // Наноструктурированные халькогениды свинца /Ярославль :ЯрГУ, 2011. – 232 с.
21. Sun B., Findikoglu A. T., Sykora M., Werder D. J., Klimov V. I. Hybrid photovoltaics based on semiconductor nanocrystals and amorphous silicon // Nano Lett. – 2009. – Vol. 9, № 3. – P. 1235–1241.
22. Stancu V., Pentia E., Goldenblum A., Buda M., Iordache G., Botila T. Romanian Journal of Information Science and Technology. Vol.10, №1, - P. 53–66, 2007.

ЗНАЧЕНИЕ ПРОВЕРОЧНЫХ ВОПРОСОВ И ЗАДАЧ В ПРЕПОДАВАНИИ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СТУДЕНТАМ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Р. А. Аметов

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза, Республика Узбекистан, г. Нукус, e-mail: ruslan.physic@mail.ru

В данной статье представлена информация о важности преподавания физики полупроводников студентам высших учебных заведений с использованием тестовых вопросов и задач на практических занятиях.

Ключевые слова: задача; тестовые вопросы; полупроводник; логическое мышление; самостоятельное мышление.