



Общероссийский математический портал

Э. З. Имамов, Р. А. Муминов, Р. Х. Рахимов, Х. Н. Каримов, М. А. Аскарлов, Моделирование электрических свойств солнечного элемента с многими наногетеропереходами, *Comp. nanotechnol.*, 2022, том 9, выпуск 4, 70–77

DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-4-70-77

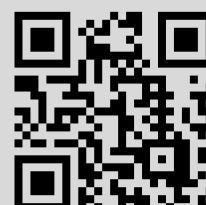
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 44.210.149.218

3 ноября 2024 г., 15:25:40



Моделирование электрических свойств солнечного элемента с многими наногетеро-переходами

Э.З. Имамов^{1, a} ©, Р.А. Муминов^{2, b} ©, Р.Х. Рахимов^{3, c} ©,
Х.Н. Каримов^{1, d} ©, М.А. Аскарлов^{4, e} ©

¹ Ташкентский университет информационных технологий
имени Мухаммеда аль-Хорезмий (ТУИТ) Министерства по развитию
информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

² Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце” Академии наук Узбекистана,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

³ Институт материаловедения Академии наук Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

⁴ Каракалпакский государственный университет имени Бердаха
Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан,
г. Нукус, Республика Каракалпакстан, Республика Узбекистан

^a E-mail: erkinimamov@mail.ru

^b E-mail: detector@uzsci.net

^c E-mail: rustam-shsul@yandex.com

^d E-mail: karimov@tuit.uz

^e E-mail: asqarovm@list.ru

Аннотация. Параметры роста, оптимальные электрофизические и оптические свойства, обеспечивающие достаточно высокие скорости преобразования солнечного излучения в электричество и предсказуемый и контролируемый характер значения КПД, определяются компьютерным моделированием полупереходной модели гетероконтактной структуры и ее вольтамперной характеристики.

Ключевые слова: предположительно катастрофический рост, парниковый эффект, углекислый газ, вольтамперная характеристика, математическое моделирование

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Имамов Э.З., Муминов Р.А., Рахимов Р.Х., Каримов Х.Н., Аскарлов М.А. Моделирование электрических свойств солнечного элемента с многими наногетеро-переходами // Computational Nanotechnology. 2022. Т. 9. № 4. С. 70–77. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-4-70-77

Modeling of the Electrical Properties of a Solar Cell with Many Nano-hetero Junctions

E.Z. Imamov^{1, a} ©, R.A. Muminov^{2, b} ©, R.Kh. Rakhimov^{3, c} ©,
Kh.N. Karimov^{1, d} ©, M.A. Askarov^{4, e} ©

¹ Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi (TUIT)
of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications
of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, Republic of Uzbekistan

² Physical-Technical Institute of the SPA “Physics-Sun”
of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, Republic of Uzbekistan

³ Institute of Materials Science of the SPA “Physics-Sun”
of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, Republic of Uzbekistan

⁴ Karakalpak State University named after Berdakh of the Ministry of Higher
and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan

Nukus, Republic Karakalpakstan, Republic of Uzbekistan

^a E-mail: erkinimamov@mail.ru

^b E-mail: detector@uzsci.net

^c E-mail: rustam-shsul@yandex.com

^d E-mail: karimov@tuit.uz

^e E-mail: asqarovm@list.ru

Abstract. The growth parameters, optimal electro physical and optical properties that ensure sufficiently high rates of conversion of solar radiation into electricity and a predictable and controlled nature of the efficiency value are determined by computer modeling of a semi-phenomenological model of a heterocontact structure and its volt-ampere characteristics.

Key words: presumably catastrophic growth, greenhouse effect, carbon dioxide, volt-ampere characteristic, mathematical modeling

FOR CITATION: Imamov E.Z., Muminov R.A., Rakhimov R.Kh., Karimov Kh.N., Askarov M.A. Modeling of the Electrical Properties of a Solar Cell with Many Nano-hetero Junctions. *Computational Nanotechnology*. 2022. Vol. 9. No. 4. Pp. 70–77. (In Rus.) DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-4-70-77

ВВЕДЕНИЕ

Процесс производства электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приобрел в XXI в. всемирный размах.

Актуальность и целесообразность перехода на возобновляемые источники энергии в основном обоснована тремя причинами:

- постепенное истощение запасов органического ископаемого топлива;
- быстрый рост населения мира с соответствующим увеличением его энергопотребления;
- катастрофический рост «парникового эффекта» из-за накопления углекислого газа (CO₂) на планете.

Тем не менее, однако, она все еще во много раз превышает стоимость углеводородной электроэнергии из-за высокой стоимости, как производства самих солнечных элементов, так и стоимости составляющих их материалов. Поэтому в настоящее время все страны мира, учитывая необходимость обеспечения комфортной жизни и современный характер энергопотребления для будущих поколений людей на планете, ведут поиск технологий и подходящих материалов, способных значительно повысить эффективность солнечных элементов и снизить стоимость продукции солнечной энергии.

Все вышесказанное относится, в частности, к солнечной энергетике, которой посвящена данная работа.

СОЛНЕЧНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Процесс массового внедрения солнечной энергии происходит в больших масштабах и в больших объемах [1–5] с учетом многих существующих глобальных сопутствующих тенденций и препятствующих проблем. Научное обоснование перспектив его использования и совершенствования осуществляется с помощью фотовольтаики, в которой рассматриваются и 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. Поэтому перспективы развития солнечной энергетики и ее эффективность в научном плане 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.

Солнечный элемент с высокоэффективным разделяющим нано гетеро *p-n*-переходами на полупроводниковой подложке более эффективен по ряду причин:

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

Достижение таких эксплуатационных преимуществ требует активных исследований, новых технологий и материалов для их производства, непрерывного поиска новых нетрадиционных подходов и методов, как для выбора полупроводниковой подложки, так и для создания гетероконтактного перехода.

Ранее нами [6–10] предлагались необычные и нетрадиционные два технологических подхода по разработке эффективного солнечного элемента:

- создание наногетероконтактного перехода на поверхности кремниевой подложки осуществлять за счет роста методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) нанокристаллов (NCs) халькогенидов свинца (PbX: PbS, PbTe и PbSe);
- использование в качестве подложки солнечного элемента дешевого, неупорядоченного и слабо кристаллического кремния [11–13].

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НОВШЕСТВ

Кристаллические тела отличаются идеальным порядком в расположении их атомов, а тела с неупоря-

доченными структурами, например аморфные тела, в физической модельной абстракции обладают идеальным дальним беспорядком. В реальности же любое тело, будь это кристаллическое или аморфное, имеет в своей структуре многочисленные дефекты и другие нарушения однородности или мелкие упорядоченные кристаллические включения и другие упорядоченные участки. В кристаллах – это точечные, линейные, объемные дефекты, а в аморфных телах – это различные цепочечные или слоистые структуры, локальные неоднородности размерами до 10 нм.

Таким образом, можно с уверенностью констатировать, что реальные неупорядоченные бесструктурные полупроводники всегда обладают локальными областями, отличающимися от соседних областей своей упорядоченной структурой и имеющие с ними некоторую границу раздела. На этих границах могут возникать контактные потенциальные электрические поля для электронов и дырок, барьеры Шоттки (как на границе полупроводник–металл), а также нано размерные гетеропереходы (НГП). Достаточно сильные проявления электрических свойств у этих нано включений связаны отличием на несколько порядков подвижности носителей заряда в кристаллической фазе (или удельной электропроводности) от величины подвижности в неупорядоченных соседних областях.

Дешевый, неупорядоченный, слабо кристаллический, технический, аморфный (α -Si) и другие модификации кремния можно, в нашем случае, использовать в качестве подложки солнечного элемента.

Создание наногетероконтактных структур на основе нанокристаллов халькогенидов свинца (NCs PbX) осуществляется выращиванием методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на поверхности дешевого серийного технического кремния отдельных «островков» высоко электроемких халькогенидов свинца [11] основано на принципе самоорганизации вещества [12; 13]. В результате возможно образование многочисленных (сотни миллионов на 1 см^2), прочных и стабильных наноразмерных контактных гетероструктур. Параметры роста, оптимальные электрофизические и оптические свойства, которые обеспечивают достаточно высокие скорости преобразования солнечного излучения в электричество и предсказуемый и контролируемый характер значения КПД, определяются путем моделирования на основе полуфеноменологической модели гетеро контактной структуры и ее электрических характеристик.

Использование дешевого бесструктурного кремния в качестве подложки для солнечного элемента позволяет [14–16] значительно продлить время его эффективного функционирования в открытой атмосфере с резкими метеорологическими изменениями погоды.

Эффективность солнечного элемента с многими наногетеро-переходами (НГП) на бесструктурной

подложке обоснована некоторыми экспериментами, опубликованными и запатентованными в работах:

- об улучшении преобразующих свойств и КПД одиночного СЭ с уменьшением его размера [17; 18];
- о положительной роли нанокристаллов халькогенидов свинца (NCs PbX) на поверхности аморфного кремния (гибридные солнечные батареи на аморфной кремниевой подложке α -Si/PbS показали внешнюю квантовую эффективность $\sim 7\%$ для ИК энергий и $\sim 50\%$ в видимой области, то есть фотоэлектрический отклик простирается от видимой до ближней инфракрасной области. Это означает достаточно большой вклад в фотопреобразовании (вносит эффект многоэкситонной генерации) [14; 19];
- о поведении нанокристаллов халькогенидов свинца в процессе роста на кремниевой подложке методом молекулярно лучевой эпитаксии [15], при котором в соответствии с явлением самоорганизации [11–13] наиболее вероятно формирование «островков» NCs PbX происходит в местах кристалличности контактирующих объектов (халькогениды свинца – это кристаллы, а реальная бесструктурная кремниевая подложка всегда содержит определенную долю беспорядочно расположенных кристаллических зерен Si, на которых наиболее вероятен рост нанокристаллов халькогенидов свинца на кремниевой подложке).

СВЕТОВАЯ ВАХ ОДИНОЧНОГО СЭ

В идеале многочисленные нано гетеро структуры на поверхности подложки солнечного элемента рассматриваются как система независимых отдельных нано гетеро переходов (НГП) со своими электрическими и оптическими свойствами. Рост нано гетеро структур методом МЛЭ и в соответствии с принципом самоорганизации приводит к геометрически строгому и достаточно друг от друга далекому их расположению на поверхности подложки [11]. В силу этого свойства такой сложной системы (солнечный элемент с многими НГП) целесообразно начать с рассмотрения свойств одиночного НГП и только потом на его основе провести обобщение на весь комплекс СЭ. При этом каждый одиночный наногетеро-переход рассматривается самостоятельно как независимый и идентичный с другими контактная структура. Световая вольтамперная характеристика (ВАХ) одиночного НГП описывается эквивалентной схемой (рис. 1), функционирование которого зависит от I_s – величины тока насыщения диода, R_s и R_p – последовательно и параллельного (шунтирующего) сопротивления диода, A – так называемого коэффициента неидеальности, T – температуры среды, а также от I и U – соответствующие величины тока и падения напряжения на нагрузке R .

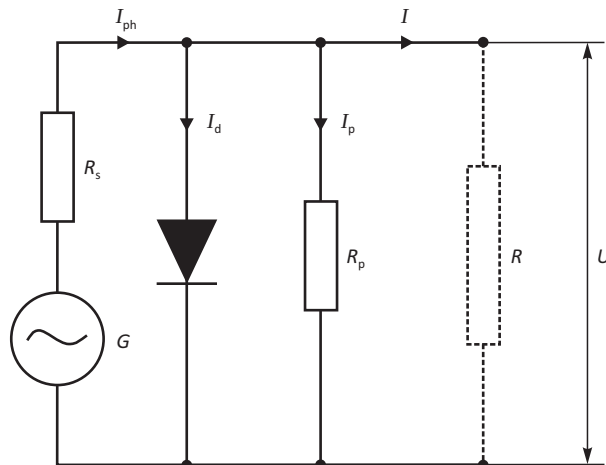


Рис. 1. Эквивалентная схема одиночного СЭ

Fig. 1. The equivalent scheme of a single solar cell (SC)

В представленной эквивалентной схеме вольтамперная характеристика описывается классически [20] и определяется световым током I_{ph} , генерируемого генератором (G):

$$I - I_{sc} = I_{ph} - I_{sc} \left(\exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p}. \quad (1)$$

В левой части вместо тока через нагрузку I стоит разность этого тока и тока короткого замыкания ($I - I_{sc}$). Как это показано на рис. 2 при этом в отличие от ВАХ в темноте (кривая 1) исследуемый световой ток (кривая 2), когда $U = 0$, будет равен ($-I_{sc}$), а при $U = U_{oc}$ световой ток становится, как и положено, равным нулю.

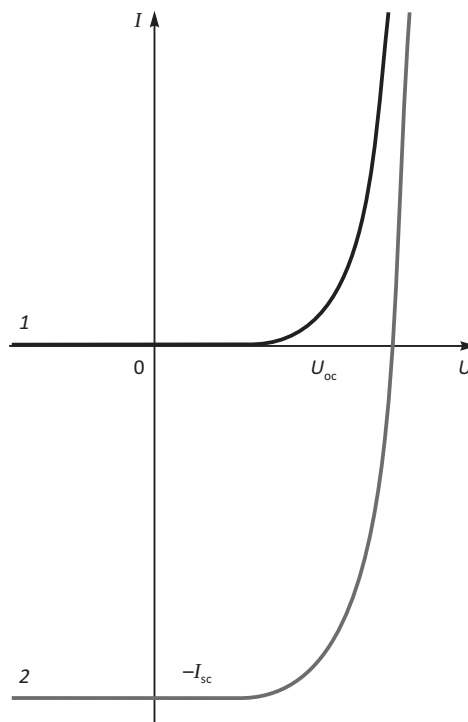


Рис. 2. Световая ВАХ СЭ

Fig. 2. Light VAC SC

Граничные условия $U = 0$ и $U = U_{oc}$ позволяют из (1) определить R_p и R_s в зависимости от I_{ph} – светового тока, ε – генерируемой светом фотоЭДС, U_{oc} – напряжения холостого хода и при $U = U_{oc}$ величины диодного тока

$$I_d^* = I_s \left(\exp\left(\frac{eU_{oc}}{AkT}\right) - 1 \right).$$

Они равны:

$$R_p = \frac{U_{oc}}{I_{ph} - I_d^*}; \quad (2a)$$

$$R_s = \frac{\varepsilon}{I_{ph}} \text{ при } U = 0; \quad R_s = \frac{\varepsilon - U_{oc}}{I_{ph}} \text{ при } U = U_{oc}. \quad (2b)$$

Из (2b) видно, что R_s по мере роста светового тока изменяется (уменьшается) от ε/I_{ph} до $(\varepsilon - U_{oc})/I_{ph}$. Столь резкое уменьшение роли R_s связано с тем, что при наличии R – внешней нагрузки с сопротивлением ($R \ll R_p$) гораздо меньшим, чем R_p основная доля светового тока протекает через нагрузку.

Величина последовательного сопротивления диода R_s нами рассматривается как внутреннее сопротивление генератора G , который совместно со всеми другими сопротивлениями электрической цепи (U/I_d , R , R_p) определяет величину I_{ph} – светового тока.

$$I_{ph} = \frac{\varepsilon}{R_s + \rho}, \quad (3)$$

где $\rho^{-1} = R_p^{-1} + R^{-1} + (U/I_d)^{-1}$.

Важной отличительной чертой эквивалентной схемы одиночного солнечного элемента (см. рис. 1)

от всех других подобных схем СЭ [20; 21] является то, что последовательное сопротивление диодной части (R_s) расположено в одном ряду с условным «генератором» G . Его рассматриваем как внутреннее сопротивление, оказывающее влияние на вентиляльные свойства диода и характеризующий долю потери генерируемых носителей за счет поверхностной рекомбинации. При этом величина I_{ph} – светового тока определяется долей генерируемых электронно-дырочных пар, благополучно дошедших до p - n -перехода без рекомбинации.

СВЕТОВАЯ ВАХ СЭ СО МНОГИМИ НГП

Самопроизвольный рост на поверхности кремниевой подложки СЭ методом молекулярно-лучевой эпитаксии многочисленных идентичных пирамидальных полупроводниковых нано кристаллических образований (n равно нескольким сот миллионам на 1 см^2) и последующее формирование при них наногетеро-переходов позволяет рассматривать образующие отдельные контактные структуры абсолютно идентичными и независимыми друг от друга.

Такая независимость отдельных электрических систем и их ВАХ дает возможность представить весь солнечный элемент как сумму n наногетеро-переходов (рис. 3). При этом параметры I_{ph} , I_d и I_p – одиночного наногетеро-перехода суммируются и становятся равными $I_L = nI_{ph}$, $I_{sc} = nI_{sc}$, $I_D = nI_d$, $I_p = nI_p$. Обобщенный и просуммированный световой ток при этом равен $I_L = I_{sc}$, а I – характеризует суммарный ток через нагрузку от всех одиночных НГП.

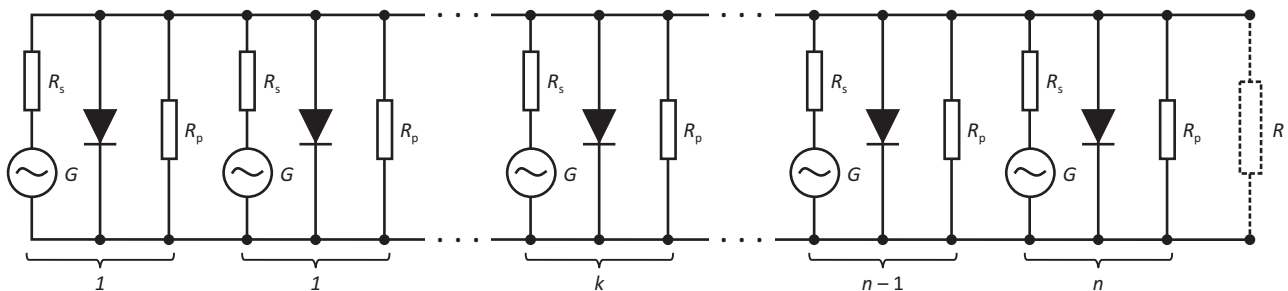


Рис. 3. Эквивалентная схема солнечного элемента с n наногетеро-переходами

Fig. 3. Equivalent scheme of a solar cell with n nano-hetero junctions

С учетом этих преобразованных обобщенных параметров уравнение, описывающее световую ВАХ СЭ со многими НГП, будет иметь вид:

$$I - I_{sc} = I_L - nI_s \left(\exp\left(\frac{eU}{AkT}\right) - 1 \right) - \frac{nU}{R_p} \quad (4)$$

или в безразмерном виде (разделив все слагаемые на $I_L = I_{sc}$) получим:

$$f = 1 + (1 - y)(1 + \gamma) - \gamma(e^{\gamma u} - ye^{\mu}), \quad (4a)$$

где $f = I/I_L$; $\gamma = nI_s/I_L$; $y = U/U_{oc}$; $\mu = eU_{oc}/(AkT)$.

Из определений видно, что диапазон изменения f и y одинаков:

$$1 \leq f \leq 0; \quad 1 \leq y \leq 0.$$

Эффективность СЭ в нашем случае из-за линейной зависимости мощности от напряжения ($P = IU$) находится, приравнявая к нулю производную от мощности:

$$\begin{aligned} dP/dU = I_{sc} [1 + (1 - 2y)(1 + \gamma) + \\ + 2\gamma ye^{\mu} - \gamma e^{\gamma u} (1 + \mu y)] = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Используя (5), получим методом математического моделирования значения максимальных величин: P_{\max} , I_{\max} , U_{\max} – максимума мощности P_{\max} , значения тока I_{\max} и напряжения U_{\max} :

$$I_{\max} = I_{sc} [0,5\gamma e^{\mu y_{\max}} (\mu y_{\max} - 1) + 0,5\gamma + 1]; \quad (6a)$$

$$U_{\max} = y_{\max} U_{oc}; \quad (6b)$$

$$P_{\max} = I_{\max} U_{\max} = (U_{oc} I_{sc}) y_{\max} [0,5\gamma e^{\mu y_{\max}} (\mu y_{\max} - 1) + 0,5\gamma + 1]. \quad (6c)$$

Принята характеризовать эффективность СЭ так называемым фактором заполнения ff (fill factor) [20, 21], который определяется значениями: максимальной мощности P_{\max} , тока короткого замыкания и напряжения холостого хода:

$$ff = \frac{I_{\max} U_{\max}}{I_{sc} U_{oc}} = y_{\max} [0,5\gamma e^{\mu y_{\max}} (\mu y_{\max} - 1) + 0,5\gamma + 1]. \quad (7)$$

На рис. 4 представлены в относительных единицах математическим моделированием графики ВАХ и зависимости мощности СЭ со многими НГП от напряжения при различных значениях относительной величины I_s/I_{ph} – тока насыщения диода (в вставной рамке на рис.4). Видно, что величина максимума мощности P_{\max} , как и в целом ВАХ СЭ с многими НГП существенно зависит от I_s – величины тока насыщения диода: чем меньше его величина тем выше максимум мощности P_{\max} и фактор заполнения ff , то есть эффективность СЭ. Например, при $I_s/I_{ph} = 0,001$ достигается наибольшее значение максимальной мощности и фактора заполнения $ff = 0,63$.

Отметим также, что указанные на рис. 4 четыре точки на графике максимальной мощности показывают довольно сильную зависимость ее максимального значения (и фактора заполнения ff) от тока насыщения диода (I_s/I_{ph}):

$$\text{при } I_s/I_{ph} = 0,001 \quad ff = 0,63;$$

$$\text{при } I_s/I_{ph} = 0,05 \quad ff = 0,5.$$

Литература

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. ISBN: 5-98888-004-5.
2. Kozlov S.I. Hydrogen energy: Current state, problems, prospects. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2009. 520 p. ISBN: 5-89754-062-4.
3. Kuzyk B.N., Yakovets Yu.V. Russia: The strategy of transition to hydrogen energy. Moscow: Institute of Economic Strategies, 2007. 400 p. ISBN: 978-5-93618-110-8.
4. Ametistova E.V. Under the general editorship of the corresponding member. In 2 vols. Vol. 1: Fundamentals

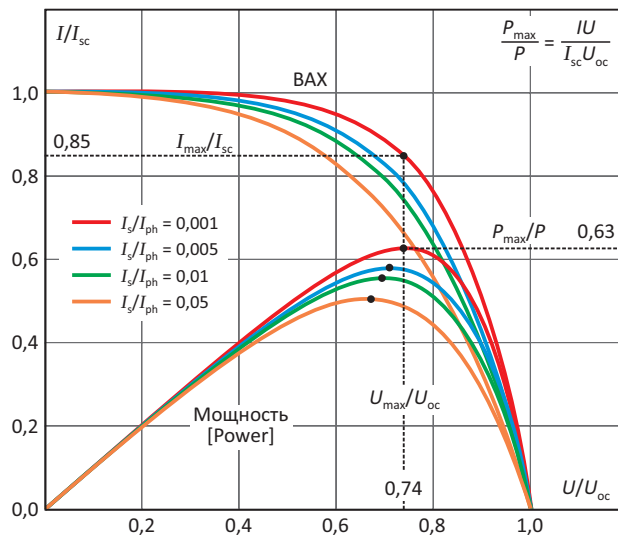


Рис. 4. ВАХ СЭ со многими (n) параллельно соединенными между собой НГП и зависимость его мощности от напряжения, отн. ед.

Fig. 4. VAC SC with many (n) parallel connected NGPs find its dependence of power on voltage, rel. units

Выводы

1. Обоснована актуальность и целесообразность перехода в настоящее время на возобновляемые источники энергии, в частности, к солнечной энергетике.
2. Показан и обоснован, что процесс массового производства солнечного электричества наиболее эффективен при использовании солнечных элементов со многими нано гетеро переходами на полупроводниковой подложке.
3. В работе на основе математического моделирования и рассмотрения свойств одиночного СЭ проведено обобщение этих результатов применительно к СЭ с многими наногетеро-переходами на поверхности подложки.
4. Теоретически рассчитана величина максимума мощности СЭ с многими НГП и значение его фактора заполнения при различных величинах тока насыщения диода.

References

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. ISBN: 5-98888-004-5.
2. Kozlov S.I. Hydrogen energy: Current state, problems, prospects. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2009. 520 p. ISBN: 5-89754-062-4.
3. Kuzyk B.N., Yakovets Yu.V. Russia: The strategy of transition to hydrogen energy. Moscow: Institute of Economic Strategies, 2007. 400 p. ISBN: 978-5-93618-110-8.
4. Ametistova E.V. Under the general editorship of the corresponding member. In 2 vols. Vol. 1: Fundamentals

- of modern energy. Prof. A.D. Trukhnia (ed.) Moscow: Publishing House of MEI, 2008. ISBN: 978-5-383-00162-2.
5. *Rezvanov R.* Russia in the global hydrogen market // *Business Economic Magazine "Invest-Foresight"* (March 30, 2021).
 6. *Imamov E.Z., Muminov R.A., Jalalov T.A., Karimov Kh.N.* Ilmiy xabarnoma // *Scientific Bulletin*. 2019. No. 1. Pp. 25–27.
 7. *Imamov E.Z., Muminov R.A., Jalalov T.A.* et al. // *Uzbek Journal of Physics*. 2019. No. 3. Pp. 173–179.
 8. *Imamov E.Z., Muminov R.A., Jalalov T.A., Karimov Kh.N.* // *Physics of Semiconductors and Microelectronics*. 2019. No. 4. Pp. 14–21.
 9. *Imamov E.Z., Muminov R.A., Rakhimov R.Kh.* // *Scientific-technical Journal (STJ FerPI)*. 2020. Vol. 24. No. 5. Pp. 31–36.
 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. No. 4. Pp. 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. *Sun B., Findikoglu A.T., Sykora M.* et al. Hybrid photovoltaics based on semiconductor nanocrystals and amorphous silicon // *Nano Lett.* 2009. Vol. 9. No. 3. Pp. 1235–1241.
 15. *Stancu V., Pentia E., Goldenblum A.* et al. // *Romanian Journal of Information Science and Technology*. 2007. Vol. 10. No. 1. Pp. 53–66.
 16. *Шендрей К., Гомуля В., Ярема М.* и др. // Нанокристаллические солнечные элементы PbS с высокой эффективностью и коэффициентом заполнения // *Appl. Phys. Lett.* 2010. № 97. С. 203501.
 17. *Цой Б.* Патент в Евразийском патентном ведомстве. EP2405487 A1. 30.08.2012.
 18. *Цой Б.* Патент во всемирной организации интеллектуальной собственности. №WO 2011/040838 A2 04.07.2011.
 19. *Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б.* Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. С. 222.
 20. *Пикус Г.Е.* Основы теории полупроводниковых приборов М.: Наука, 1965. 448 с.
 21. *Зимин С.П., Горлачев Е.С.* Наноструктурированные халькогениды свинца. Ярославль: ЯрГУ, 2011. 232 с. ISBN: 978-5-8397-0861-7.
- of modern energy. Prof. A.D. Trukhnia (ed.) Moscow: Publishing House of MEI, 2008. ISBN: 978-5-383-00162-2.
5. *Rezvanov R.* Russia in the global hydrogen market. *Business Economic Magazine "Invest-Foresight"* (March 30, 2021).
 6. *Imamov E.Z., Muminov R.A., Jalalov T.A., Karimov Kh.N.* Ilmiy xabarnoma. *Scientific Bulletin*. 2019. No. 1. Pp. 25–27.
 7. *Imamov E.Z., Muminov R.A., Jalalov T.A.* et al. *Uzbek Journal of Physics*. 2019. No. 3. Pp. 173–179.
 8. *Imamov E.Z., Muminov R.A., Jalalov T.A., Karimov Kh.N.* *Physics of Semiconductors and Microelectronics*. 2019. No. 4. Pp. 14–21.
 9. *Imamov E.Z., Muminov R.A., Rakhimov R.Kh.* *Scientific-technical Journal (STJ FerPI)*. 2020. Vol. 24. No. 5. Pp. 31–36.
 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. No. 4. Pp. 47–56.
 11. *Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Shchukin V.A.* et al. Heterostructures with quantum dots: Production, properties, lasers. *FTP*. 1998. Vol. 32. No. 4. Pp. 385–410. (In Rus.)
 12. *Prigozhin I.R., Stengers I.* *Time, chaos, quantum. To solve the paradox of time M., 2000.*
 13. *Haken H.* *Synergetics.* Springer, Berlin-Heidelberg, 1997.
 14. *Sun B., Findikoglu A.T., Sykora M.* et al. Hybrid photovoltaics based on semiconductor nanocrystals and amorphous silicon. *Nano Lett.* 2009. Vol. 9. No. 3. Pp. 1235–1241.
 15. *Stancu V., Pentia E., Goldenblum A.* et al. *Romanian Journal of Information Science and Technology*. 2007. Vol. 10. No. 1. Pp. 53–66.
 16. *Shendrey K., Gomulya V., Yarema M.* et al. Nanocrystalline PbS solar cells with high efficiency and fill factor. *Appl. Phys. Lett.* 2010. No. 97. P. 203501. (In Rus.)
 17. *Tsoi B.* Patent in the Eurasian Patent Office. EP2405487 A1. 30.08.2012.
 18. *Tsoi B.* Patent in the World Intellectual Property Organization. № WO 2011/040838 A2 04.07.2011.
 19. *Gremenok V.F., Tivanov M.S., Zalesky V.B.* Solar cells based on semiconductor materials. Minsk: Publishing House of the BSU Center, 2007. P. 222.
 20. *Pikus G.E.* *Fundamentals of the theory of semiconductor devices.* Moscow: Nauka, 1965. 448 p.
 21. *Zimin S.P., Goralchev E.S.* Nanostructured lead chalcogenides. Yaroslavl: YarSU, 2011. 232 p. ISBN: 978-5-8397-0861-7.

Статья проверена программой Антиплагиат

Р е ц е н з и я: *Раджапов С.А.*, доктор физико-математических наук; главный научный сотрудник лаборатории полупроводниковых высокочувствительных датчиков Физико-технического института Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан

Статья поступила в редакцию 14.11.2022, принята к публикации 18.12.2022
The article was received on 14.11.2022, accepted for publication 18.12.2022

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Имамов Эркин Зуннунович, доктор физико-математических наук, профессор; Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммеда аль-Хорезмий (ТУИТ) Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8580-222>; E-mail: erkinimamov@mail.ru

Муминов Рамизулла Абдуллаевич, академик, доктор физико-математических наук, профессор; Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» Академии наук Узбекистана. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7243-595X>; E-mail: detector@uzsci.net

Рахимов Рустам Хакимович, доктор технических наук; заведующий лабораторией № 1 Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-9260>; E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Каримов Хасан Нарзуллаевич, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммеда аль-Хорезмий (ТУИТ) Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0849-2092>; E-mail: karimov@tuit.uz

Аскарлов Мардон Аमतжанович, PhD докторант Каракалпакского государственного университета имени Бердаха Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан, Нукус, Республика Каракалпакстан, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4627-3170>; E-mail: asqarovm@list.ru

ABOUT THE AUTHORS

Erkin Z. Imamov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor; Department of Physics of the Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi (TUIT) of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8580-222>; E-mail: erkinimamov@mail.ru

Ramizulla A. Muminov, Academician, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor; Physical-Technical Institute of the SPA “Physics-Sun” of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7243-595X>; E-mail: detector@uzsci.net

Rustam Kh. Rakhimov, Dr. Sci. (Eng.); Head at the Laboratory No. 1 of the Institute of Materials Science of the SPA “Physics-Sun” of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-9260>; E-mail: rustam-shsul@yandex.com

Khasan N. Karimov, Department of Physics of the Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi (TUIT) of the Ministry for Development of Information Technologies and Communications of the Republic Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0849-2092>; E-mail: karimov@tuit.uz

Mardon A. Askarov, PhD student; Department of Semiconductors Physics of the Karakalpak State University named after Berdakh of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan. Nukus, Republic of Karakalpakstan, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4627-3170>; E-mail: asqarovm@list.ru