

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

R. A. Muminov, E. Z. Imamov, R. Kh. Rakhimov, M. A. Askarov, Факторы эффективной генерации электричества в солнечном элементе с наногетеропереходами, *Comp. nanotechnol.*, 2023, том 10, выпуск 1, 119–127

DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-1-119-127

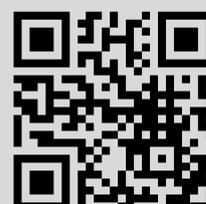
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

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

Параметры загрузки:

IP: 3.21.244.240

28 декабря 2024 г., 17:35:09



Factors of Efficient Generation of Electricity in a Solar Cell with Nanohetero Junctions

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

¹ Institute of Materials Science of the SPA “Physics-Sun”
of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, Republic of Uzbekistan

² 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

³ 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: detector@uzsci.net

^b E-mail: erkinimamov@mail.ru

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

^d E-mail: asqarovm@list.ru

Abstract. The question of using non-crystalline silicon as a substrate of an effective solar cell is considered. It is shown that the creation of an effective solar cell from non-crystalline silicon is possible only at high densities of localized states in the depth of the silicon band gap. It is shown that a particularly effective conversion of solar energy into electricity is possible when non-crystalline silicon and lead chalcogenides are combined as components of hetero junctions in the nano-dimensional state. It is shown that the use of non-crystalline silicon as a substrate for an effective solar cell is possible only when combined with nanoscale lead chalcogenides. It is shown that the effects of multiexciton generation and carrier multiplication are especially characteristic of lead chalcogenides. The ranges of the effects of carrier multiplication and multi-exciton generation in nanoclusters of lead chalcogenides (PbS, PbSe) have been determined.

Key words: non-crystalline silicon, carrier multiplication, multiexciton generation, localized state, carrier tunneling

FOR CITATION: Muminov R.A., Imamov E.Z., Rakhimov R.Kh., Askarov M.A. Factors of Efficient Generation of Electricity in a Solar Cell with Nanohetero Junctions. *Computational Nanotechnology*. 2023. Vol. 10. No. 1. Pp. 119–127. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-1-119-127

INTRODUCTION

Currently, research is underway on the conditions for increasing the efficiency of silicon solar cells, when the absorption of each photon is accompanied by the appearance of light electricity. This multifactorial problem is solved taking into account the peculiarities of solar radiation, as well as the various properties and structures of the solar cells themselves.

The radiation factors are the solar constant equal to 1353 W/m^2 and its maximum value on the territory of Uzbekistan (at latitude $41\text{--}43^\circ$) about 900 W/m^2 . The constants have a different energy distribution, that is, they have a strong influence on the frequency dependence of the photocurrent. The value of $900 \text{ J/(s} \cdot \text{m}^2)$ corresponds to the light transmitted through a dense atmosphere and its energy absorbed by a unit of the surface per unit of time, in clear weather at noon. At the same time, the atmospheric

mass (AM) is also taken into account, which determines the spectral characteristic of solar radiation on the earth's surface corresponding to the relative thickness of visible light transmission. The minimum daily average annual value of AM corresponding to the local astronomical noon for Uzbekistan compose to AM-1.5 (for Belarus AM-2.2; for Germany AM-2.0; for Russia AM-1.6; for California AM-1.3 [1]).

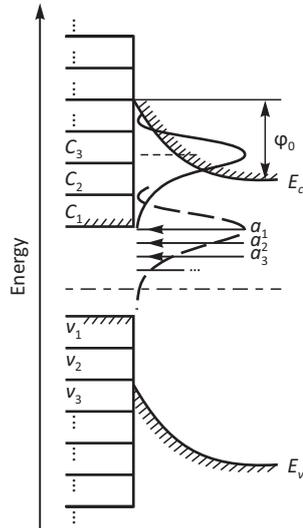


Fig.1. The scheme of formation of the nanohetero junction: NHJ <PbX:Si>

As for the properties of materials and structures of solar cells, the paper considers the use of non-crystalline silicon as a substrate for an effective solar cell. It is proposed to implement this task in combination with the creation of nanohetero junctions (NHJ) from another semiconductor on the surface of the substrate.

NON-CRYSTALLINE SILICON IN A SOLAR CELL

Non-crystalline materials maintain a near order at distances comparable to the sizes of crystallites, that is, of the order of several tens to hundreds of angstroms. The electrical conductivity of such structures, in addition to the insignificant contribution of free carriers, is determined to a large extent by the tunneling of carriers through local states, accompanied by transitions from one atom to another [2; 3]. The density of localized states in the forbidden zone (both donor and acceptor properties) can be $10^{25}-10^{26} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$, although the Fermi level is usually located closer to the middle of the forbidden zone. It is due to such large densities of localized states in non-crystalline materials that tunneling of current carriers is possible through them.

In combination with nanosized components of lead chalcogenides as a substrate, non-crystalline silicon with a high probability of tunneling forms an efficient solar cell with many nanohetero transitions (NHJ <PbX:Si>, where X can be S, Se, Te) [4–6].

Schematically, this process of formation of NHJ <PbX:Si> is presented in Fig. 1, in which, for simplicity, a hump-shaped curve of the “tails” of the density of states of only donor nature is depicted.

The energy levels of electrons and holes in lead PbX nanoscale chalcogenides are discrete [7; 8]. The process of forming a hetero junction between PbX and Si with a single Fermi level is accompanied by electron transitions from Si to PbX nanoclusions. From the levels $a_1 a_2 a_3 \dots$ formed by the density “tails” of local silicon states lying deep in the band gap (dotted density curve), electrons can tunnel to multi exciton levels of nanoclusions $c_1 c_2 c_3 \dots$ only when these levels coincide (for example, a transition of type $a_1 \rightarrow c_1$). Then there is a second transition ($a_2 = c_1$) when a_2 coincides with the c_1 level. And so on until the Fermi energies of both contacting materials are aligned as a result of tunneling transitions of silicon electrons from deep-lying a_i levels to multi-exciton states of nano inclusions.

The transition of each electron causes the appearance of a contact potential and a corresponding shift of the hump-shaped curve of localized silicon states upward in energy. In the figure, the position of the curve with a solid line corresponds to the establishment of a single Fermi level and the final value of ϕ_0 – the contact potential difference of the formed NHJ <PbX:Si>.

This is the physical nature of using non-crystalline silicon as a substrate for an efficient solar cell with many nanosized lead chalcogenides.

THE STRUCTURE OF SOLAR PANELS

The main component of the technical devices of solar energy is the solar panel (Fig. 2, 1). In turn, the solar panel consists of many solar cells connected in parallel and in series with each other (Fig. 2, 2), on which solar electricity is generated. The main conversion process in solar cells goes to numerous diode or contact structures ($p-n$ -junctions or hetero junctions).

The paper proposes a solar cell with many nanohetero junctions on the silicon surface (NHJ <PbX:Si>), in which the second contact material is nanosized lead chalcogenides (PbX).

The formation of NHJ on the Si surface can be carried out by the method of molecular beam epitaxy [2] based on the principle of self-organization of matter [3–5].

The solar cell in the panel, highlighted shown in Fig. 2, 1 in a circle, consists of many NHJs, an enlarged one of which in the form of a parallelepiped in a circle is shown in Fig. 2, 3, the frontal square profile of the NHJ with an area of a^2 , with a silicon section $b^2 - a^2$ adjacent to it, is represented by in Fig. 2, 4. The thickness of the NHJ and the length of its sides are equal respectively to d and a , the thickness and length of the sides of the parallelepiped, respectively, are equal to L and b , the thickness of the spatial charge region is equal to R_0 .

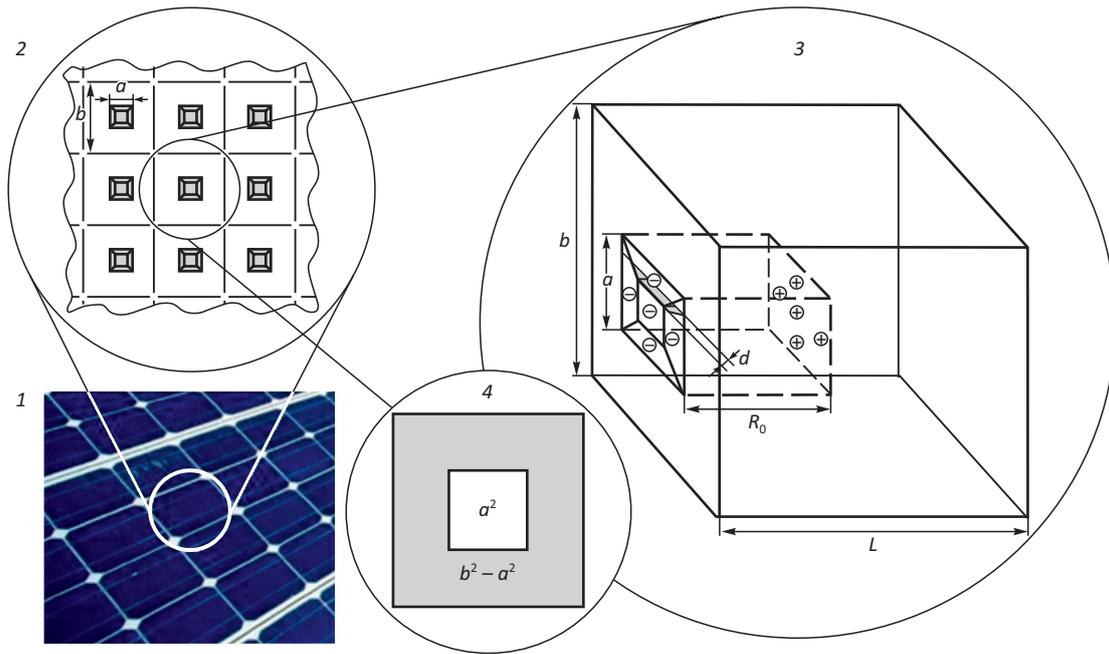


Fig. 2. The multicomponent structure of solar panels

THE PROCESS OF GENERATING SOLAR ELECTRICITY

The efficiency of the photo-conversion process (that is, when the absorption of photons is accompanied by the appearance of light electricity) is determined by the physical properties of the NHJ materials in contact: Si – silicon and lead chalcogenide. Light electricity in nanohetero junctions is largely determined by various quantum effects [6; 7], many of which are especially strongly manifested in lead chalcogenides (PbX). Being nano-sized PbX make a special contribution to the efficiency of the photo conversion process. In particular, we are talking about the quantum effect of multi-exciton generation (MEG) and the effect of multiplication of current (EMC) carriers [8–12]. These effects determine the process of effective absorption of light by the illuminated surface (Fig. 2, 4) with the area a^2 at different values of the quantum yield (β) in the corresponding intervals of the solar radiation spectrum.

According to [6; 9], in the range of solar radiation, β takes 4 values for PbS and 7 – for PbSe. For example, Table 1 for

PbS shows the ranges of the effects of carrier multiplication and a lot of exciton generation at different four values of β . For NHJ <PbS:Si> N_{PbS} – the number of effectively absorbed photons by the frontal part of the NHJ with an area of a^2 in PbS is determined by multiplying the peak light intensity on the territory of Uzbekistan (900 W/m^2) by β and the fraction of absorbed radiation energy, as well as subsequent division by the average photon energy values in the corresponding β ranges. It is determined by summing over all four ranges (β runs from 1 to 4 in PbS and from 1 to 7 in PbSe):

$$N_{\text{PbS}} = \sum N_{\text{PbS}}^i = a^2 \cdot 5,26 \cdot 10^{21}. \quad (1)$$

In the silicon region of NHJ <PbS:Si> the number of effectively absorbed photons N_{Si} characterizes the spectrum of effective light absorption in the area $b^2 - a^2$ and is determined by the fraction of absorbed radiation energy in the range of 1.1÷1.8 eV (excluding impurity absorption):

$$N_{\text{Si}} = (b^2 - a^2) \cdot 1,2 \cdot 10^{22}. \quad (2)$$

Table 1

Ranges of the effects of carrier multiplication and multi-exciton generation in nanoclusions PbS

| Intervals (eV) in the effective absorption spectrum of PbS with different β – quantum outputs | 0,3÷1,2 $\beta \leq 1$ | 1,2÷1,8 $\beta \leq 2$ | 1,8÷2,4 $\beta \leq 3$ | 2,4÷3 $\beta \leq 4$ |
|--|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Share of light absorption energy, % | 16,0 | 18,0 | 20,0 | 18,0 |
| The average value of the radiation energy, eV | 1,05 | 1,55 | 2,25 | 2,55 |
| The number of effectively absorbed photons by the front part of the NHJ in PbS, $\text{phot}/(\text{s} \cdot \text{m}^2) - N_{\text{PbS}}^i$ | $a^2 \cdot 8,6 \cdot 10^{20}$ | $a^2 \cdot 13 \cdot 10^{20}$ | $a^2 \cdot 15 \cdot 10^{20}$ | $a^2 \cdot 16 \cdot 10^{20}$ |

The average area of the silicon substrate adjacent to the NHJ (b^2) can effectively absorb a maximum of 25% of solar radiation, that is, when $a^2 \ll b^2$ (or $b^2/a^2 \gg 1$) the contribution of this average area will be small. In the opposite case ($b^2/a^2 \ll 1$), when a is large, the dimensional effects may disappear [11]. Therefore, in order to find the most optimal size of the NHJ area, it is only necessary to increase its area within reasonable limits (a^2).

From the obtained ratios (1) and (2) for the two components of the NHJ (PbS and Si), we have for the total number of absorbed photons in both parts (N_{PbS} and N_{Si}), the value

$$N = N(a, b) = N_{PbS} + N_{Si} = a^2 \cdot 4,06 \cdot 10^{21} \cdot [1 + (b^2/a^2) \cdot (1,2/4,06)]. \quad (3)$$

It can be seen that almost the entire range of incident solar radiation is effectively absorbed both due to the effects of multiplication of current (EMC) carriers in PbX, and due to the absorption in Si of radiation in the 1.0÷1.7 eV range.

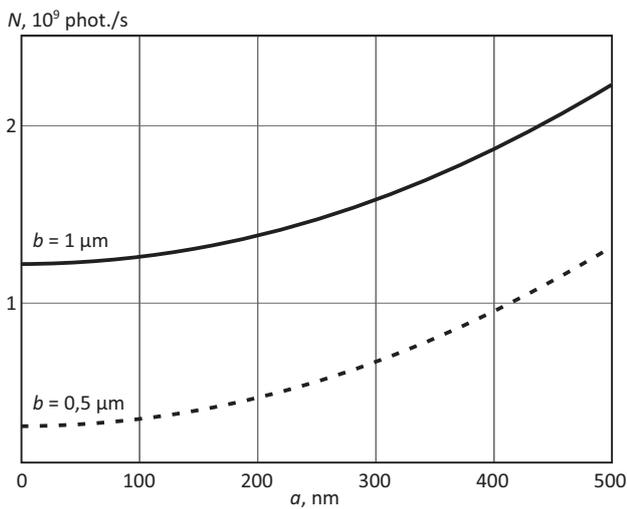


Fig. 3. Graph of dependence $N = N(a, b)$

Figure 3 shows a graph of the dependence $N = N(a, b)$, according to which the variations of the arguments of the function $N(a, b)$ increases $N(a, b)$ both with the growth of a and with the growth of b . However, an excessive increase in b is accompanied by an undesirable decrease in the number of NHJs on the surface, and an increase in a can significantly reduce the effective life of the solar panel due to the risk of coagulation of dispersed nano-

associations. Therefore, the choice of optimal values a and b is determined by the specific operating conditions of the solar panel.

Thus, using the example of NHJ <PbS:Si>, it is shown that the generation of solar electricity is determined only by the effective absorption of photons, that is, when the absorption of photons is accompanied by a photocurrent. In all other cases, absorption only causes heating of the solar cell and greatly impairs its efficiency.

References

1. Gremenok V.F., Tivanov M.S., Zalessky V.B. Solar cells based on semiconductor materials. Minsk: Publishing House of the BSU Center, 2007. 222 p.
2. Gubanov A.I. Quantum-electronic theory of amorphous and liquid semiconductors. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963.
3. Mott N., Davis E. Electronic processes in crystalline substances. Moscow: Mir, 1974.
4. Imamov E.Z., Muminov R.A., Rakhimov R.H. et al. Modeling of electrical properties of a solar cell with many nano-hetero transitions. *Computational Nanotechnology*. 2022. Vol. 9. No. 4. Pp. 70–77. (In Rus.)
5. Askarov M.A., Imamov E.Z., Muminov R.A., Ismaylov K.A. Formation of a highly efficient silicon solar cell with nano heterojunctions based on lead chalcogenides. *Science and Education in Karakalpakstan*. 2022. No. 4-2. Pp. 226–230.
6. Askarov M.A., Imamov E.Z., Muminov R.A. Formation of a solar cell based on nano heterojunctions. *Science and Innovation International Scientific Journal*. 2023. Vol. 2. Issue 2. Pp. 226–230. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7677363>.
7. Schaller R.D., Klimov V.I. *Phys. Rev. Lett.* 2004. No. 92. P. 186601.
8. Klimov V.I. *J. Phys. Chem. B*. 2006. No. 110. Pp. 16827–16845.
9. Gusev A.I. Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies. Moscow: Fizmatlit, 2005. 416 p.
10. 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.
11. Prigozhin I.R., Stengers I. Time, chaos, quantum. To solve the paradox of time. Moscow, 2000.
12. Haken H. Synergetics. Springer, Berlin-Heidelberg, 1997.
13. Wolf M., Brendel R., Werner J.H., Queisser H.J. *J. Appl. Phys.* 1998. No. 83. P. 4213.
14. Ellingson R., Beard M.C., Johnson J.C. et al. *Nano Lett.* 2005. No. 5. P. 865.
15. 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.

Факторы эффективной генерации электричества в солнечном элементе с наногетеропереходами

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

¹ Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце” Академии наук Узбекистана,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

² Ташкентский университет информационных технологий
имени Мухаммеда аль-Хорезмий (ТУИТ)
Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций
Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Республика Узбекистан

³ Каракалпакский государственный университет имени Бердаха
Министерства высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан,
г. Нукус, Республика Каракалпакстан, Республика Узбекистан

^a E-mail: detector@uzsci.net

^b E-mail: erkinimamov@mail.ru

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

^d E-mail: asqarovm@list.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос об использовании некристаллического кремния в качестве подложки эффективного солнечного элемента. Показано, что создание эффективного солнечного элемента из некристаллического кремния возможно только при больших плотностях локализованных состояний в глубине запрещенной зоны кремния. Показано, что особенно эффективное преобразование солнечной энергии в электричество возможно при сочетании в качестве компонентов гетеропереходов некристаллического кремния и халкогенидов свинца в нано размерном состоянии. Показано, что использование некристаллического кремния в качестве подложки эффективного солнечного элемента возможно только при сочетании его с наноразмерными халкогенидами свинца. Показано, что особенно халкогенидам свинца свойственны проявления эффектов многоэкситонной генерации и умножения носителей. Определены диапазоны проявления эффектов умножения носителей и много экситонной генерации в нановключениях халкогенидов свинца (PbS, PbSe).

Ключевые слова: некристаллический кремний, умножение носителей, многоэкситонная генерация, локализованное состояние, туннелирование носителей

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Муминов Р.А., Имамов Э.З., Рахимов Р.Х., Аскарлов М.А. Факторы эффективной генерации электричества в солнечном элементе с наногетеропереходами // Computational Nanotechnology. 2023. Т. 10. № 1. С. 119–127. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-1-119-127

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся исследования условий повышения эффективности кремниевых солнечных элементов, когда поглощение каждого фотона сопровождается появлением светового электричества. Эта многофакторная проблема решается с учетом особенностей солнечного излучения, а также различными свойствами и структурами самих солнечных элементов.

Факторами излучения являются солнечная постоянная, равная 1353 Вт/м^2 и ее максимальная величина на территории Узбекистана (на широте $41\text{--}43^\circ$)

порядка 900 Вт/м^2 . Постоянные имеют различное распределение по энергиям, то есть они оказывают сильное влияние на частотную зависимость фототока. Величина $900 \text{ Дж/(с} \cdot \text{м}^2)$ соответствует пройденному сквозь плотную атмосферу свету и поглощенной его энергии единицей поверхности в единицу времени, в ясную погоду в полдень. При этом учитывается также величина атмосферной массы (АМ), которая определяет спектральную характеристику солнечного излучения на поверхности земли, соответствующей относительной толщине прохождения видимого света. Минимальное суточное среднегодовое значение АМ,

соответствующее местному астрономическому полудню для Узбекистана составляет AM-1,5 (для Беларуси AM-2,2; для Германии AM-2,0; для России AM-1,6; для Калифорнии AM-1,3 [1]).

Что касается свойств материалов и структур солнечных элементов, то в работе рассматривается вопрос об использовании некристаллического кремния в качестве подложки эффективного солнечного элемента. Предлагается эту задачу реализовать в сочетании с созданием на поверхности подложки нано гетеропереходов (НГП) из другого полупроводника.

НЕКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ В СОЛНЕЧНОМ ЭЛЕМЕНТЕ

Некристаллические материалы сохраняют ближний порядок на расстояниях сравнимых с размерами кристаллитов, то есть порядка от нескольких десятков до сотен ангстрем. Электропроводность таких структур помимо незначительного вклада свободных носителей определяется в большей степени туннелированием носителей по локальным состояниям, сопровождающимися переходами с одного атома на другой [2; 3]. Плотность локализованных состояний в запрещенной зоне (как донорного, так и акцепторного свойства) может составлять $10^{25}-10^{26} \text{ м}^{-3} \cdot \text{эВ}^{-1}$, хотя уровень Ферми располагается, как правило, ближе к середине запрещенной зоны. Именно за счет таких больших плотностей локализованных состояний в некристаллических материалах по ним возможны туннелирование носителей тока.

В сочетании с нано размерными компонентами из халкогенидов свинца в качестве подложки некристаллический кремний с высокой вероятностью туннелирования образует эффективный солнечный элемент с многими нано гетеро переходами (НГП $\langle \text{PbX}:\text{Si} \rangle$, где X может быть S, Se, Te) [4–6]. Схематически этот процесс формирования НГП $\langle \text{PbX}:\text{Si} \rangle$ представлен на рис. 1, в котором для простоты изображена горбообразная кривая «хвостов» плотности состояний только донорной природы.

В наноразмерных халкогенидах свинца PbX энергетические уровни электронов и дырок имеют дискретный характер [7; 8].

Процесс формирования гетероперехода между PbX и Si с единым уровнем Ферми сопровождается переходами электронов из Si в нановключения PbX. Из уровней $a_1 a_2 a_3 \dots$, образованных «хвостами» плотности глубоко лежащих в запрещенной зоне локальных состояний кремния (пунктирная кривая плотности) электроны могут туннелировать на мульти экситонные уровни нановключений $c_1 c_2 c_3 \dots$ только при совпадении этих уровней (например, переход типа $a_1 \rightarrow c_1$). Затем происходит второй переход ($a_2 \rightarrow c_1$), когда a_2 совпадет с уровнем c_1 . И так, до тех пор пока не выровняются энергии Ферми обоих контактирующихся материалов в результате туннельных переходов электронов кремния с глубоко лежащих уровней a_i на мульти экситонные состояния нановключения.

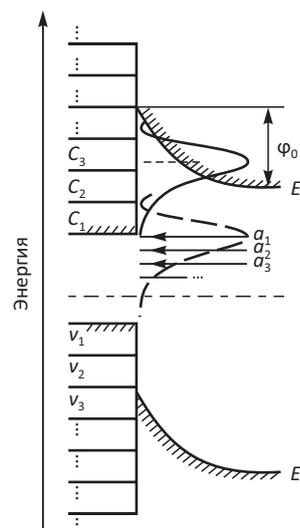


Рис. 1. Схема формирования НГП $\langle \text{PbX}:\text{Si} \rangle$

Переход каждого электрона вызывает появление контактного потенциала и соответствующий сдвиг горбообразной кривой локализованных состояний кремния вверх по энергии. На рис. 1 положение кривой сплошной линии соответствует установлению единого уровня Ферми и конечной величины ϕ_0 – контактной разности потенциала сформированного НГП $\langle \text{PbX}:\text{Si} \rangle$.

Такова физическая природа применения некристаллического кремния в качестве подложки эффективного солнечного элемента с многими нано размерными халкогенидами свинца.

СТРУКТУРА СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Основным компонентом технических устройств солнечной энергетики является солнечная панель (рис. 2, 1). В свою очередь, солнечная панель состоит из многих параллельно и последовательно между собою соединенных солнечных элементов (рис. 2, 2), на которых происходит генерация солнечного электричества. Основной процесс преобразования в солнечных элементах идет в многочисленных диодных или контактных структурах (p - n -переходах или гетеропереходах).

В работе предлагается солнечный элемент с многими нано гетеро переходами на поверхности кремния (НГП $\langle \text{PbX}:\text{Si} \rangle$), в котором вторым контактным материалом являются нано размерные халкогениды свинца (PbX).

Формирование НГП на поверхности Si может осуществляться методом молекулярно-лучевой эпитаксии [9] на основе принципа самоорганизации материя [10–12].

Солнечный элемент в панели, выделено показанный на рис. 2, 1 в кружочке, состоит из многих НГП, увеличенный один из которых в виде параллелепипеда в кружочке изображен на рис. 2, 3, фронтальный

квадратный профиль НГП площадью a^2 , с прилегающей к нему участку кремния $b^2 - a^2$, представлен на рис. 2, 4. Толщина НГП и длина его сторон равны

соответственно d и a , толщина и длина сторон параллелепипеда, соответственно, равны L и b , толщина области пространственного заряда равна R_0 .

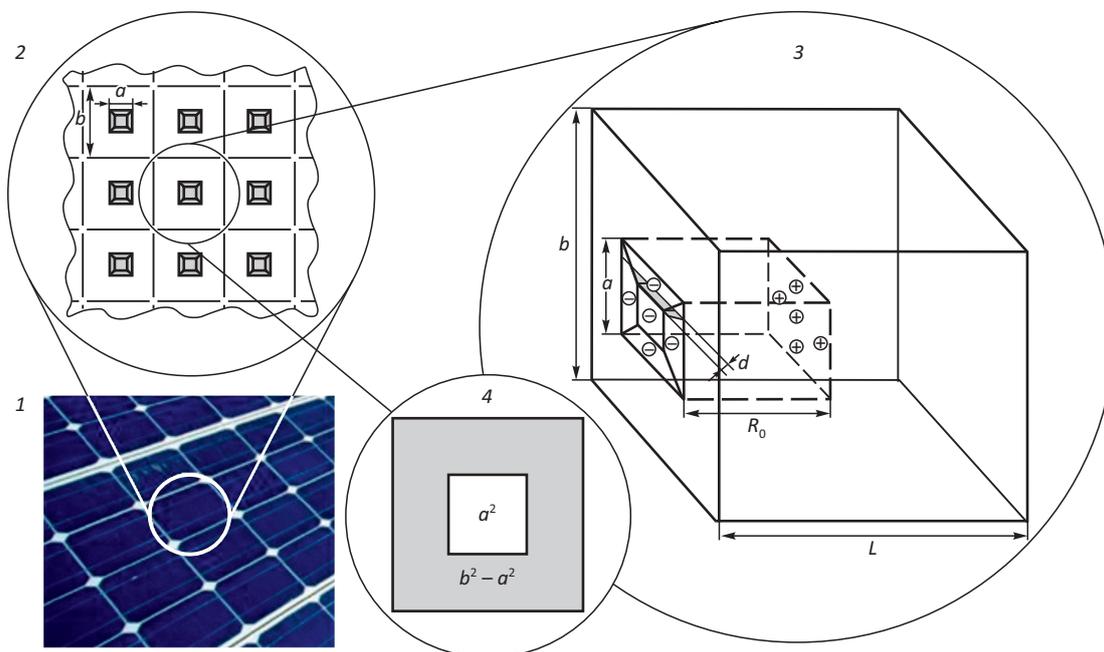


Рис. 2. Многокомпонентная структура солнечных панелей

ПРОЦЕСС ГЕНЕРАЦИИ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Эффективность процесса фото преобразования (то есть когда поглощение фотонов сопровождается появлением светового электричества) определяется физическими свойствами контактируемых материалов НГП: Si – кремнием и халкогенидом свинца. Световое электричество в наногетеропереходах во многом определяется различными квантовыми эффектами [7; 8], многие из которых особенно сильно проявляются в халкогенидах свинца (PbX). Будучи нано размерным PbX вносят особый вклад в эффективность процесса фото преобразования. В частности, речь идет о квантовом эффекте многоэкситонной генерацией (МЭГ) и эффектом умножения носителей тока (ЭУН) [5; 6; 13–15]. Этими эффектами определяется процесс эффективного поглощения света освещаемой поверхностью (рис. 1, 4) площадью a^2 при различных значе-

ниях квантового выхода (β) в соответствующих интервалах спектра солнечного излучения.

Согласно [7; 8] в диапазоне солнечного излучения β принимает 4 значения для PbS и 7 – для $PbSe$. Например, в табл. 1 для PbS указаны диапазоны проявления эффектов умножения носителей и много экситонной генерации при различных четырех значениях β . Для НГП $\langle PbS:Si \rangle$ N_{PbS}^i – число эффективно поглощенных фотонов фронтальной частью НГП площадью a^2 в PbS определяется умножением пиковой интенсивности света на территории Узбекистана (900 Вт/м^2) на β и долю поглощенной энергии излучения, а также последующим делением на средние значения энергии фотонов в соответствующих β -диапазонах. Оно определяется суммированием по всем четырем диапазонам (β пробегает от 1 до 4 в PbS и от 1 до 7 в $PbSe$):

$$N_{PbS} = \sum N_{PbS}^i = a^2 \cdot 5,26 \cdot 10^{21}. \quad (1)$$

Таблица 1

Диапазоны проявления эффектов умножения носителей и много экситонной генерации в нановключениях PbS

| Интервалы (эВ) в спектре эффективного поглощения PbS с различными β – квантовыми выходами | 0,3÷1,2 $\beta \leq 1$ | 1,2÷1,8 $\beta \leq 2$ | 1,8÷2,4 $\beta \leq 3$ | 2,4÷3 $\beta \leq 4$ |
|--|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Доля энергии поглощения света, % | 16,0 | 18,0 | 20,0 | 18,0 |
| Среднее значение энергии излучения, эВ | 1,05 | 1,55 | 2,25 | 2,55 |
| Число эффективно поглощенных фотонов фронтальной частью НГП в PbS , фот./($c \cdot m^2$) – N_{PbS}^i | $a^2 \cdot 8,6 \cdot 10^{20}$ | $a^2 \cdot 13 \cdot 10^{20}$ | $a^2 \cdot 15 \cdot 10^{20}$ | $a^2 \cdot 16 \cdot 10^{20}$ |

В кремниевой области НГП <PbS:Si> число эффективно поглощенных фотонов N_{Si} характеризует спектр эффективного поглощения света на площади $b^2 - a^2$ и определяется долей поглощенной энергии излучения в диапазоне 1,1÷1,8 эВ (без учета примесного поглощения):

$$N_{Si} = (b^2 - a^2) \cdot 1,2 \cdot 10^2. \quad (2)$$

Средняя площадь кремниевой подложки, прилегающая к НГП (b^2) эффективно может поглотить максимум 25% солнечного излучения, то есть когда $a^2 \ll b^2$ (или $b^2/a^2 \gg 1$) вклад этой средней площади окажется небольшим. В противоположном случае ($b^2/a^2 \ll 1$), когда a велико размерные эффекты могут исчезнуть [11]. Поэтому для поиска наиболее оптимальной величины площади НГП нужно только в разумных пределах увеличивать его площадь (a^2).

Из полученных соотношений (1) и (2) для двух компонент НГП (PbS и Si) имеем для суммарного количества поглощенных фотонов в обеих частях (N_{PbS} и N_{Si}), значение

$$N = N(a, b) = N_{PbS} + N_{Si} = a^2 \cdot 4,06 \cdot 10^{21} \cdot [1 + (b^2/a^2) \cdot (1,2/4,06)]. \quad (3)$$

Видно, что эффективно поглощается почти весь диапазон падающего солнечного излучения как за счет эффектов умножения носителей тока (ЭУН) в PbX, так и за счет поглощения в Si излучения 1,0÷1,7 эВ диапазона.

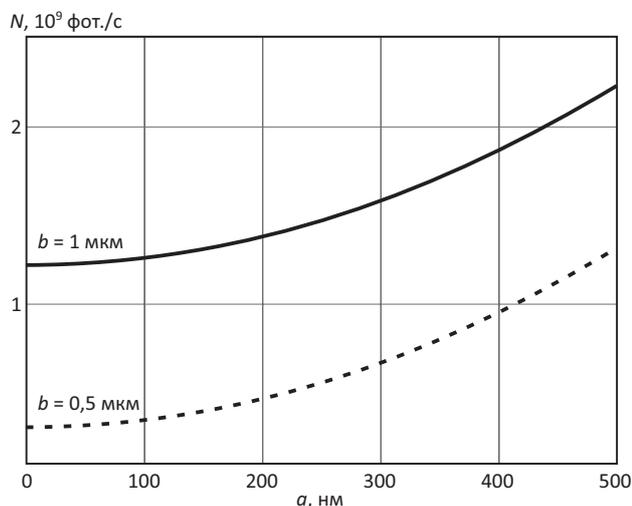


Рис. 3. График зависимости $N = N(a, b)$

На рис. 3 дан график зависимости $N = N(a, b)$, согласно которой вариации аргументов функции $N(a, b)$ увеличивает $N(a, b)$ как при росте a , так и при росте b . Однако излишнее увеличение b сопровождается с не-

желательным уменьшением количества НГП на поверхности, а увеличение a может значительно сократить эффективный срок функционирования солнечной панели из-за риска коагуляции диспергированных нанобъединений. Поэтому выбор оптимальных величин a и b определяется конкретными эксплуатационными условиями солнечной панели.

Таким образом, на примере НГП <PbS:Si> показано, что генерация солнечного электричества определяется только эффективным поглощением фотонов, то есть когда поглощение фотонов сопровождается фототоком. Во всех остальных случаях поглощение вызывает только нагрев солнечного элемента и сильно ухудшает его эффективность.

Литература

1. Гременок В.Ф., Тиванов М.С., Залесский В.Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов. Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. 222 с.
2. Губанов А.И. Квантовоэлектронная теория аморфных и жидких полупроводников. М.: Изд. АН СССР, 1963.
3. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в кристаллических веществах. М.: Мир, 1974.
4. Имамов Э.З., Муминов Р.А., Рахимов Р.Х. и др. Моделирование электрических свойств солнечного элемента с многими наногетеро-переходами // Computational Nanotechnology. 2022. Т. 9. № 4. С. 70–77.
5. Askarov M.A., Imamov E.Z., Muminov R.A., Ismaylov K.A. Formation of a highly efficient silicon solar cell with nano heterojunctions based on lead chalcogenides // Science and Education in Karakalpakstan. 2022. No. 4-2. Pp. 226–230.
6. Askarov M.A., Imamov E.Z., Muminov R.A. Formation of a solar cell based on nano heterojunctions // Science and Innovation International Scientific Journal. 2023. Vol. 2. Issue 2. Pp. 226–230. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7677363>.
7. Schaller R.D., Klimov V.I. // Phys. Rev. Lett. 2004. No. 92. P. 186601.
8. Klimov V.I. J. // Phys. Chem. B. 2006. No. 110. Pp. 16827–16845.
9. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
10. Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А. и др. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры // ФТП. 1998. Т. 32. № 4. С. 385–410.
11. Пригожин И.П., Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. М., 2000.
12. Haken H. Synergetics. Springer, Berlin-Heidelberg, 1997.
13. Wolf M., Brendel R., Werner J.H., Queisser H.J. // J. Appl. Phys. 1998. No. 83. P. 4213.
14. Ellingson R., Beard M.C., Johnson J.C. et al. // Nano Lett. 2005. No. 5. P. 865.
15. 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.

Статья проверена программой Антиплагиат

Р е ц е н з е н т: 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 15.02.2023, принята к публикации 21.03.2023
The article was received on 15.02.2023, accepted for publication 21.03.2023

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Имамов Эркин Зуннунович, доктор физико-математических наук, профессор; Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммеда аль-Хорезми (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

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

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

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

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 of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8580-222>; E-mail: erkinimamov@mail.ru

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

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