

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Е. Георгия и др. Структура примесного центра Мп в антимолибдате галлия// ФТП. 1992. Т.26. Вып.1. С.89-91.
2. Г.С. Куликов Влияние Мп на диффузионные распределения Ni в Si//ФТП.1995. Т. 3. С. 469.
3. А.А. Таскин, Е.Г. Тишковский. Образование квазимолекул Se₂ в кремнии, легированном селеном //ФТП.1998. Т.32. № 11. С. 1306–1312.
4. M.K. Bakhdyrhanov, B.K. Ismaylov, S.A. Tachilin, K.A. Ismaylov, N.F. Zikrillayev. Influence of Electrically Neutral Atoms on Electrical and Recombination Parameters of Silicon. // Semiconductor Physics. Quantum Electronics Optoelectronics. 2020. Vol.23. Issue 4. pp. 361–365.
5. Б.И. Болтакс. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. // Наука. Ленинград.1972. С. 384.
6. М.К. Бахадырханов, З.Т. Кенжаев, С.В. Ковешников, А.А. Усмонов, Г.Х. Мавлонов. Образование комплексов примесных атомов фосфора и бора в кремнии. // Неорганические материалы. 2022. Том. 58. Вып.1. С. 3–9.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНОГО ПОЛЯ НАНО-ГЕТЕРО-ПЕРЕХОДА <Si:PbX>

Э. З. Имамов¹, Р. А. Муминов², Х. Н. Каримов¹, А. Э. Имамов³, М. А. Аскарлов⁴

¹⁾ *Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммеда аль-Хорезми (ТУИТ), Министерство цифровых технологий Республики Узбекистан, Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: erkinimatov@mail.ru*

²⁾ *Физико-технический институт, НПО “Физика-Солнце” Академии наук Узбекистана, Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: detector@uzsci.net*

³⁾ *Академия МВД Республики Узбекистан – Ташкент, Республика Узбекистан, e-mail: imatovaziz@mail.ru*

⁴⁾ *Каракалпакский государственный университет имени Бердаха Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан, Нукус, Республика Каракалпакстан, Узбекистан, e-mail: asqarovm@list.ru*

В настоящей работе концепция многопереходности легла в основу построения модели принципиально новой контактной структуры: «нанообъект–полупроводник». Это не традиционный сплошной p – n -переход со сплошным контактом двух типов полупроводниковых материалов. Это контакт между нанесенным нанообъектом и однородной полупроводниковой подложкой. При соприкосновении нанообъекта с подложкой между ними устанавливается термодинамическое равновесие, сопровождающееся выравниванием уровней Ферми и возникновением контактного поля особой геометрии, поскольку возникает между точечным объектом (10–40 нм) и свободной подложкой. По аналогии с теорией полупроводникового тонкого p – n -перехода [1–11] рассчитано контактное поле нано-гетеро-перехода <Si:PbX>.

Ключевые слова: нано-гетеро-переход; контактное поле; нанокристал <Si:PbX>; область пространственного заряда.

DETERMINATION OF THE CONTACT FIELD OF THE <Si:PbX> NANO-HETERA JUNCTION

E. Z. Imamov¹, R. A. Muminov², Kh. N. Karimov¹, A. E. Imamov³, M. A. Askarov⁴

¹⁾ Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khorezmi (TUIT), Ministry of Digital Technologies of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

²⁾ Physicotechnical Institute, Scientific and Production Association "Physics-Sun" of the Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

³⁾ Academy of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Uzbekistan - Tashkent, Republic of Uzbekistan

⁴⁾ Karakalpak State University named after Berdakh Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Republic of Uzbekistan, Nukus, Republic of Karakalpakstan, Uzbekistan
Corresponding author: E. Z. Imamov (erkinimamov@mail.ru)

In this paper, the concept of multijunction formed the basis for constructing a model of a fundamentally new contact structure: "nanoobject-semiconductor". This is not a traditional continuous p - n -junction with continuous contact between two types of semiconductor materials. This is a contact between the deposited nanoobject and a homogeneous semiconductor substrate. When the nanoobject comes into contact with the substrate, thermodynamic equilibrium is established between them, accompanied by equalization of the Fermi levels and the emergence of a contact field of special geometry, since it arises between a point object (10–40 nm) and a free substrate. By analogy with the theory of a semiconductor thin p - n -junction [1–11], the contact field of the nano-hetero-junction <Si:PbX> was calculated.

Key words: nano-hetero-junction; contact field; nanocrystal <Si:PbX>; space charge region.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные элементы (СЭ) массового производства состоят из диодных структур с одним сплошным макро p - n -переходом (с площадью нескольких сотен мм²). Коэффициент полезного действия (КПД), например, серийных образцов СЭ на кремниевой основе подложки относительно мал – порядка 14–16 % (в лучших мировых научно-исследовательских центрах – не превосходит 25 %). Одной из главных причин этого является относительная узость спектра эффективного поглощения солнечного излучения (эффективно преобразовывается в электричество только излучение с энергией соизмеримой ширине запрещенной зоны полупроводника подложки). Поэтому весьма актуален на сегодняшний день поиск технологий, позволяющих решить проблемы расширения спектра поглощения света, снижения себестоимости, повышения добротности и срока службы. Концентрирование солнечного излучения; выбор подходящих материалов; создание пленочных фотоэлементов; создание фотоэлементов каскадного типа – вот ряд современных методов решения вышеуказанных проблем для СЭ с одним сплошным p - n -переходом (или с каскадом последовательно соединенных нескольких тандемных p - n -переходов) [1].

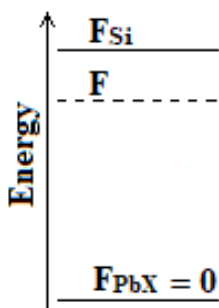


Рис. 1. Схема формирования контактного поля

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Формирования контактного поля сопровождается переходами N электронов из Si в $c\text{-PbX}$ ($F_{\text{Si}} > F_{\text{PbX}}$). Они прекращаются, когда уровни Ферми сравниваются, при котором контактный потенциал $\phi_0 = (F_{\text{Si}} - F_{\text{PbX}})/e$.

Согласно теории текучести возникновение направленного потока частиц между двумя объемами осуществляется из материала с большей W – объёмной плотности энергии (размерность Дж/м³ или Па) в меньшую W .

В дальнейшем начало отсчета энергии перенесено в положение $F_{\text{PbX}} = 0$. В этом случае (см. рис. 1) начальная энергия всех N электронов, переходящих из Si в $c\text{-PbX}$, равна: $F_{\text{Si}} = q\phi_0$. Полное формирование контактного поля сопровождается:

- перетеканием электронов в нанокристалл ($c\text{-PbX}$) за счет некоторой части объёмной плотности энергии кремния, равной: $(F_{\text{Si}} - F)/(\epsilon_{\text{Si}} \cdot R \cdot b^2)$;
- увеличением на эту же величину $F/(\epsilon_{\text{PbX}} \cdot a^2 \cdot d)$ – объёмной плотности энергии в нанокристалле $c\text{-PbX}$ из-за притока N энергонасыщенных электронов из кремния;
- установлением равновесного состояния всего нано-гетеро-перехода с единым окончательным уровнем энергии F .

КОНТАКТНОЕ ПОЛЕ НАНО-ГЕТЕРО-ПЕРЕХОДА

По аналогии с теорией полупроводникового тонкого $p\text{-}n$ -перехода [1–11] рассчитано контактное поле нано-гетеро-перехода $\langle \text{Si:PbX} \rangle$.

Интегрирование одномерного уравнения Пуассона:

$$d^2\phi/dx^2 = -\rho/(\epsilon_{\text{Si}} \cdot \epsilon_0),$$

определяет величину вектора напряженности электрического поля $E(x)$ контактного поля и его потенциал $\phi(x)$. Для $\phi(x)$ и $d\phi/dx$ с учетом граничных условий и условий непрерывности, решения $E(x)$ и $\phi(x)$ уравнения Пуассона (в интервале $0 < x < R$ и с ρ – плотностью объемного заряда) имеют вид:

$$E(x) = \rho \cdot (x-R)/(\epsilon_{\text{Si}} \cdot \epsilon_0) \text{ и } \phi(x) = -\rho \cdot (R-x)^2/(2\epsilon_{\text{Si}} \cdot \epsilon_0).$$

Амплитудные значения (при $x = 0$) параметров контактного поля (E_0 – модуля вектора напряженности и ϕ_0 – разности потенциалов) в конце завершения процесса формирования нано-гетеро-перехода равны соответственно:

$$E_0 = \rho \cdot R/(\epsilon_{\text{Si}} \cdot \epsilon_0); \phi_0 = -\rho \cdot R^2/(2\epsilon_{\text{Si}} \cdot \epsilon_0). \quad (1)$$

Конечная разность потенциалов контактного поля (или амплитудное значение $\phi_0 = E_0 \cdot R/2$), установившийся при завершении процесса формирования нано-гетеро-перехода, определяется разностью равновесных значений энергий Ферми исходных материалов (Si и PbX): $\phi_0 = (F_{\text{Si}} - F_{\text{PbX}})/e$. Длина контактного поля $R = N \cdot b_0$ определяется N – количеством электронов, переход которых из Si в $c\text{-PbX}$ формируют контактное поле, а также b_0 – средней длиной хаотических термических прыжков электрона, что одновременно является также средним расстоянием между соседними локальными дефектными энергетическими состояниями (ЛДЭС) в запрещенной зоне Si.

Рассматривая нанокристалл $c\text{-PbX}$ в виде плоской пластины толщиной d и площадью a^2 , согласно теореме Гаусса, для проводящей и заряженной ($q = e \cdot N$) плоскости, в конце завершения процесса формирования нано-гетеро-перехода величины E_0 и φ_0 приобретут следующий вид:

$$E_0 = q/(2 \cdot a^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{PbX}}), \quad \varphi_0 = q \cdot R/(4 \cdot \epsilon_{\text{PbX}} \cdot \epsilon_0 \cdot a^2). \quad (2)$$

Здесь ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, а ϵ_{Si} и ϵ_{PbX} – диэлектрические проницаемости Si и PbX. Объемная плотность зарядов $\rho = q/R \cdot b^2_0$ формируется за счет переходов в нанокристалл N электронов (электронов или дырок в зависимости от соотношения исходных значений F_{Si} и F_{PbX} , далее предполагается, что $F_{\text{Si}} > F_{\text{PbX}}$) с локализованных дефектных энергетических состояниях (ЛДЭС) в Si. Область пространственного заряда в Si имеет форму параллелепипеда с квадратным основанием a^2 и высотой R . Основание a^2 расположено в центре b^2 , прилегающей к нанокристаллу освещаемой квадратной поверхности кремния. Пространственными расстояниями между заряженными ЛДЭС (нейтральность нарушен переходом электронов в $c\text{-PbX}$), формирующие в кремнии контактное поле нано-гетеро-перехода, определяют стороны b и b_0 : b – расстоянием между двумя поверхностными кристаллитами ($b = N_{\Sigma}^{-1/3}$ – поверхностная их концентрация); b_0 – расстоянием между двумя объемными кристаллитами ($b_0 = N_{\Omega}^{-1/3}$ – их объемная концентрация). Геометрическая форма нано-гетеро-перехода в Si имеет вид вставленных по центру друг в друга двух квадратов: b^2_0 внутри b^2 ($b > b_0$ – см. рис. 2). Объем контактного поля в виде параллелепипеда равен $R \cdot b^2_0$.

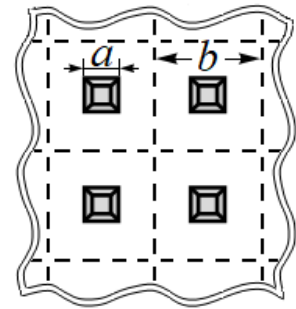


Рис. 2. Геометрическая форма нано-гетеро-перехода в Si

Для удобства обсуждения проблемы введем некоторые безразмерные коэффициенты, значения которых будут характеризовать параметры нано-гетеро-перехода:

$$\langle \text{Si}:c\text{-PbX} \rangle: k = b/a, \quad \alpha = b_0/b, \quad \epsilon^* = \epsilon_{\text{Si}}/\epsilon_{\text{PbX}}, \quad z = a/d.$$

Из сравнения двух верных соотношений (1) и (2) для амплитудного значения напряженности электрического поля E_0 находится количество электронов N , переход которых из Si в $c\text{-PbX}$ формирует окончательную величину контактного поля нано-гетеро-перехода. Действительно, учитывая соотношения $E_0 = 2 \cdot \varphi_0/R$; $b_0 = \alpha \cdot a \cdot k$; $q = e \cdot N$; $R = N \cdot b_0$; $k = b/a$; $\varphi_0 = (F_{\text{Si}} - F_{\text{PbX}})/e$ можно получить:

$$N^2 = 4 \cdot \varphi_0 \cdot a \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{PbX}}/e \cdot \alpha \cdot k \quad (3)$$

Из этого соотношения видно, что количество электронов N существенно определяется параметрами материалов нано-гетеро-перехода, то есть Si и $c\text{-PbX}$: F_{Si} , F_{PbX} , a , α , k . Зная φ_0 , а также предполагая заданными F_{Si} , F_{PbX} , ϵ^* , k , α , z (то есть, считая их априори известными), с помощью вычисленного N (3) находятся все параметры контактного поля нано-гетеро-перехода $\langle \text{Si}:c\text{-PbX} \rangle$:

- $N(\varphi_0)$ – число переходов электронов из Si в $c\text{-PbX}$;
- $E_0(\varphi_0)$ – амплитуду модуля вектора напряженности электрического поля;
- $q(N(\varphi_0))$ – число электронов на поверхности (a^2) нано-кристалла;
- $R(N(\varphi_0))$ – длину области пространственного заряда в кремнии;
- F – равновесный уровень Ферми в сформированном нано-гетеро-переходе.

Варьируя по k , α и z , определяются наиболее оптимальные параметры контактного поля нано-гетеро-перехода и соответствующие им физические условия преобразования солнечного излучения в электричество.

Как отмечалось выше, для определения наиболее оптимальных параметров контактного поля нано-гетеро-перехода необходимо знать N – количество перешедшего в PbX из кремния электронов. Оно определяется величиной работы в единице объема по формированию потенциала ϕ_0 . В нашем случае эта объемная плотность энергии кремния. Она расходуется на два типа работы:

– первая часть A_k – на работу по «сдвигу» электрона с первоначально нейтрально-го ЛДЭС на соседний свободный дефектный уровень (или «толчок» для отрыва электрона с нейтрального дефекта и придание ему скорости). Используя закон Кулона, получим следующую величину:

$$A_k = e \cdot \phi_0 \cdot N / (2 \cdot R \cdot b_0^2) = e^2 / (4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \alpha^4 \cdot a^4 \cdot k^4 \cdot \epsilon_{Si}^2);$$

– вторая часть A_r – доля объемной плотности энергии, расходуемая на работу по преодолению электроном (на пути до контакта с нанокристаллом c -PbX) электрического сопротивления кремниевой среды. Используя закон Джоуля–Ленца, величина A_r определена в виде:

$$A_r = I^2 \cdot R \cdot t / (N \cdot b_0^3 \cdot a^2 \cdot \epsilon_{Si} \cdot \sigma) = \epsilon^* \cdot \pi \cdot (2N^2 - 3N + 1) \cdot A_k / 3.$$

Из вышесказанного следует равенство:

$$F / (\epsilon_{PbX} \cdot a^2 \cdot d) = (F_{Si} - F) / (\epsilon_{Si} \cdot R \cdot b_0^2),$$

позволяющее определить F – значение единого для всего нано-гетеро-перехода окончательно установившегося уровня энергии:

$$F = F_{Si} / (1 + \gamma) = q\phi_0 / (1 + \gamma), \text{ где } \gamma = \epsilon_{Si} \cdot R \cdot b_0^2 / \epsilon_{PbX} \cdot a^2 \cdot d = \alpha \cdot k^3 \cdot z \cdot N / \epsilon^* \quad (4).$$

Таким образом в результате выполнения работы по переводу N электронов из кремния в PbX, объемная плотность энергии кремния уменьшилась на величину:

$$(A_k + A_r) = A_k (1 + \epsilon^* \cdot \pi \cdot (2N^2 - 3N + 1) / 3).$$

На это же количество увеличилась объемная плотность энергии нано-кристалла халькогенида свинца. Приравняв их между собой и полагая $(1 + \gamma) / \gamma = y$, получим уравнение для определения N , учитывающее изменения величин объемных плотностей энергии нано-кристалла халькогенида свинца и некристаллического кремния:

$$N = (3 + \epsilon^* \cdot \pi \cdot (2N^2 - 3N + 1)) \cdot y / (3 \cdot \epsilon^* \cdot \pi \cdot \alpha^2 \cdot k^2). \quad (5)$$

Относительно числа электронов получено, на первый взгляд, довольно сложное уравнение. Однако, если $(1 + \gamma) / \gamma = y$ положить почти равным единице (так как γ – отношение объемных плотностей энергии кремния и нано-кристалла халькогенида свинца значительно больше единицы), то при таком упрощении (5) сводится к квадратному уравнению относительно N :

$$2 \cdot N^2 - 3 \cdot N \cdot (1 + y \cdot \alpha^2 \cdot k^2) + (1 + 3 / (\epsilon^* \cdot \pi)) = 0. \quad (5')$$

Найденное число электронов N , формирующие контактное поле нано-гетеро-перехода, зависит, в основном, от трёх параметров: α , k и ϵ^* . Например, при $\alpha = b_0 / b = 2/3$, $k = b / a = 3$ и $\epsilon^* = \epsilon_{Si} / \epsilon_{PbX} = 12/176$, величина $N = 7$. Это означает, что при $\phi_0 = 0,2$ В и $N = 7$, длина контактного поля в кремнии:

$$R(N(\phi_0)) = 7 \cdot 20/3 = 46 \text{ нм};$$

на поверхности 11 нм^2 число электронов:

$$q(N(\varphi_0)) = 7 \cdot e;$$

амплитуда напряженности электрического поля:

$$E_0(\varphi_0) = 9 \cdot 10^6 \text{ В/м};$$

уровень Ферми в сформированном нано-гетеро-переходе:

$$F = 0,03 \text{ эВ}.$$

Как отмечалось выше для определения наиболее оптимальных параметров контактного поля нано-гетеро-перехода необходимо знать число перешедших в PbX электронов:

$$N = (3 + \varepsilon^* \cdot \pi \cdot (2N^2 - 3N + 1)) \cdot \gamma / (3 \cdot \varepsilon^* \cdot \pi \cdot \alpha^2 \cdot k^2).$$

Вариация (3) или (5) по k , α и z позволяет определить наиболее оптимальные параметры нано-гетеро-перехода и соответствующие им физические условия преобразования солнечного излучения в электричество.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом в результате выполнения работы по переводу N электронов из кремния в PbX, установлено, что объемная плотность энергии кремния уменьшилась на величину $(A_K + A_T) = A_K(1 + \varepsilon^* \cdot \pi \cdot (2N^2 - 3N + 1)/3)$. На это же количество увеличилась объемная плотность энергии нано-кристалла халькогенида свинца. Полученное уравнение для определения N , учитывает изменения величин объемных плотностей энергии нано-кристалла халькогенида свинца и некристаллического кремния. Показано, что специфика нового типа контакта определяется нановключениями, т.е. параметрами нано-гетеро-перехода, а по структуре, и по протяженности принципиально отличается от аналогичных контактных структур типа барьеров Шоттки, сплошных p - n -переходов и обычных гетеропереходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. E. Z. Imamov, T. A. Dzhalalov, and R. A. Muminov // Electrophysical Properties of the «Nano-object-semiconductor» new contact structure/ Technical physics, 2015, Vol. 60, No. 5, pp. 740–745.
2. Т.А. Джалалов, Lisa M.Porter, Э.З.Имамов, Р.А.Муминов // Теория электростатического поля в наноразмерных p - n -переходах // UzJPh - Uzbek Journal of Physics //Vol.17(№3) 2015 PP.131–139.
3. E.Z. Imamov, T.A. Jalalov, R.A. Muminov, H.Kh. Rakhimov // The theoretical model of new contact structure “nanoobject-semiconductor” // J.”Computational nanotechnology”. December 2015, №4. Pp. 58–63.
4. Т. А. Dzhalalov, E. Z. Imamov, and R. A. Muminov// The Electrical Properties of a Solar Cell with Multiple Nanoscale p - n Transitions // Applied Solar Energy, 2014, Vol. 50, No. 4, pp. 228–232.
5. Imamov E. Z., Djalalov T. A., Muminov R. A., Rakhimov R. Kh. //The Difference Between the Contact Structure with Nanosize Inclusions from the Semiconductor Photodiodes// J.”Computational nanotechnology”. №3-2016, p.p. 203–207.
6. Imamov E. Z., Djalalov T. A., Muminov R. A., Rakhimov R. Kh. //Unique opportunity to create cheap but effective silicon solar cells // J.”Computational nanotechnology”. №1-2017, p.p.61–65.
7. Т.А.Джалалов, Э.З.Имамов, Р.А.Муминов, Р.Х.Рахимов //Анализ роли нанообъектов в удешевлении кремниевых солнечных элементов // J. ”Computational nanotechnology”. №3-2017, p.p.14–18.
8. Джалалов Т.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А., Рахимов Р.Х. // Расширение спектра эффективного поглощения солнечных элементов с нановключениями // Computational nanotechnology // 2018. Выпуск №1, С. 155–167.
9. Jalalov Temur A., Imamov Erkin Z., Muminov Ramizulla A., SabirovHabibulla, Atoev Shokhzahon Sh.// Solar elements based on noncrystallic silicon with nanostructured impacts // J.”Computational nanotechnology”. №3-2018, p.p. 85–90.
10. Э.З.Имамов Р.А.Муминов Т.А.Джалалов Х.Н.Каримов Г.Эргашев // Нано технологическая трансформация иллюзорных свойств макромира // Узбекский физический журнал 2019. №3. С.173–179.
11. Э.З.Имамов Р.А.Муминов Т.А.Джалалов Х.Н.Каримов // Кремниевый солнечный элемент с малыми p - n -переходами //Ж. «Физика полупроводников и микроэлектроника» 2019. №3 С.78–87.