

2. Li D., Zhu C., Liu, H. Sun X., Zheng B., Liu Y., Pan, A. Light-triggered two-dimensional lateral homogeneous p-n diodes for opto-electrical interconnection circuits // Science Bulletin. 2019. 65. pp. 293-299.
3. G.Gulyamov, B.T.Abdulazizov, P.J.Baymatov // Three-band simulation of the g-factor of an electron in an InAs quantum well in strong magnetic fields // Journal of Nanomaterials, Volume 2021, Article ID 5542559, <https://doi.org/10.1155/2021/5542559>
4. B.T. Abdulazizov/Cyclotron mass of an electron in strong magnetic fields in a wide InAs quantum well/ *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials* 2022, 6(1), 32-37, DOI:10.32523/ejpfm.2022060103
5. B. T. Abdulazizov, G. Gulyamov, P. J. Baymatov, Sh. T. Inoyatov, M. S. Tokhirjonov and Kh. N. Juraev// Peculiarities of the Temperature Dependence of the Chemical Potential of a Two-dimensional Electron Gas in Magnetic Field// SPIN Vol. 13, No. 1 (2022) 2250002, World Scientific Publishing Company, DOI:10.1142/S2010324722500023
6. P.J.Baymatov, A.G.Gulyamov, B.T.Abdulazizov, Kh.Yu.Mavlyanov, M.Tokhirjonov// Features of the Chemical Potential of a Quasi-Two-Dimensional Electron Gas at Low Temperatures Features of the Chemical Potential of a Quasi-Two-Dimensional Electron Gas at Low Temperatures // International Journal of Modern Physics B 2150070 (1-13 ), 2021, <https://doi.org/10.1142/S0217979221500703>

## ОСОБЕННОСТИ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ $por-Si/c-Si/a-Si:H$

У.С.Бабаходжаев, М.А.Усманов, И.Ш.Вохобжонов  
Наманганский государственный университет

**Аннотация.** Исследовано влияние поверхностной рекомбинация на фотоэлектрических характеристики гетероструктурных солнечных элементов на основе  $por-Si/c-Si$ . Получены аналитические зависимости для определение коэффициента скорости поверхностной рекомбинации и предложено гетероструктуры типа  $por-Si/p-c-Si/a-Si:H$  для исследование поверхностный рекомбинации между слоями  $por-Si$  и  $p-c-Si$ .

**Ключевые слова.** Гетероструктура, аморфный гидрированный кремний, пористые кремний, коэффициент поверхностной рекомбинацию, уравнение непрерывности.

Использование гетероструктур является одним из наиболее эффективных способов подавления поверхностной рекомбинации в солнечных элементах [1]. В солнечных элементах на основе гетероструктур могут применяться как анизотипные, так и изотипные гетеропереходы [2,3]. На рис.1 представлена зонная диаграмма солнечного элемента на основе изотипного гетероперехода  $p-por-Si/p-c-Si/n-c-Si$ . В таких структурах фотоактивным переходом является  $p-c-Si/n-c-Si$  гомопереход, а изотипные гетеропереходы выполняют роль потенциальных барьеров, ограничивающих поток неосновных носителей заряда к поверхности.

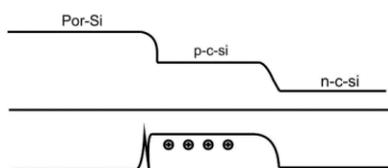


рис.1

Солнечное излучение падает со стороны широкозонного полупроводника ( $por - Si$ ) и основная часть излучения поглощается в узкозонном полупроводнике ( $p - c - Si$ ). За счет потенциального барьера для неосновных носителей заряда значительно снижается уровень рекомбинации на фронтальной поверхности. В идеальном случае рекомбинироваться на фронтальной поверхности могут только неосновные носители заряда, генерированные в широкозонном полупроводнике. Однако вследствие малой толщины этого слоя и из-за малости число генерированных носителей из слоя  $p - c - Si$  неосновные носители будут диффундировать к этому слою и при поверхности гетерограница раздела происходит рекомбинация. В этом случае рекомбинация на поверхностных состояниях будет наиболее эффективна и, следовательно, можно ожидать значительного снижения  $U_{xx}$  и КПД солнечных элементов. Поэтому целью настоящей работы является исследование поверхностной рекомбинации на границе раздела  $por - Si/c - Si$  гетероперехода и получить аналитическое выражение для определения коэффициента поверхностной рекомбинации. Рассмотрим гетероструктуру в следующем виде, то есть  $p - por - Si/p - c - Si/i - a - Si:H$  и на рис.2 представлена зонная диаграмма этого гетероперехода.

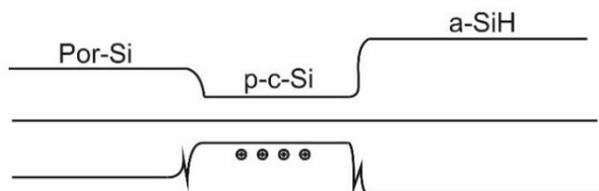


рис.2

Как известна ширина запрещенной зоны  $p - por - Si$  и  $i - a - Si:H$  удовлетворяет следующему соотношению  $E_{g1} < E_{g2}$ , поэтому высота дополнительного потенциального барьера для неосновных носителей заряда, образованного разрывом зон выполняется следующее соотношение  $\Delta E_{v_1} < \Delta E_{v_2}$ , поэтому диффузия носителей заряда к слою  $a - Si:H$  очень мало.

Если освещаем эту структуры со стороны,  $por - Si$  тогда основная часть света поглощается в узкозонном  $p - c - Si$  слое, количество генерированных дырок в  $p - c - Si$  слое несколько порядка больше чем генерированных дырок в  $p - por - Si$  слое. Если структуры освещены коротковольновым светом тогда незначительная часть света поглощается в  $a - Si:H$  слое. Из-за разницы количество генерированных носителей заряда между слоями, в нашем случае это основной дырки, происходит диффузия носителей заряда. Из-за разницы потенциального барьера на двух границах для дырок диффузии носителей заряда происходит от  $p - c - Si$  к  $por - Si$ . Как известно, что время жизни носителей заряда в  $por - Si$ , намного раз меньше чем  $p - c - Si$ , поэтому в при поверхностной области  $por - Si$  происходит рекомбинация дырок и это приводит к возникновению рекомбинационного тока. Зная величину рекомбинационного тока мы сможем определить скорость поверхностной рекомбинации между слоями  $por - Si$  и  $c - Si$ .

Скорость поверхностной рекомбинации  $S$  определяется через нормальную проведенную к поверхности плотности тока.

$$j_p = |e|S\Delta p_1 \quad (1)$$

где  $\Delta p_1$  – концентрация избыточных носителей заряда,  $S$  скорость исчезновения дырок в  $por - Si$  на поверхности.

Для определения  $\Delta p_1$  мы будем использовать уравнение диффузии и уравнение непрерывности

$$j_D = |e| D_{p_1} \frac{d\Delta p}{dx} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\epsilon} \operatorname{div} j_p = -\frac{\Delta p_1}{\tau_{p_1}} \quad (3)$$

где  $D_{p_1}, \tau_{p_1}$  – коэффициент диффузии и время жизни дырок в  $por - Si$  соответственно.

Как нам известно, что коротковолновый свет в основном поглощается в слое  $c - Si$ , тогда в этом слое одновременно происходит генерация и объемная рекомбинация носителей тока. Поэтому концентрация избыточных дырок выражается следующим образом

$$\Delta p_1 = G\tau_2 - \Delta p_2 \quad (4)$$

Из-за малости время жизни носителей тока в  $por - Si$  слое, концентрация генерированных избыточных носителей тока незначительно. Поэтому происходит диффузия дырок из слоя с концентрацией  $\Delta p_1$   $c - Si$  к слою  $por - Si$  и при стационарном ( $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ ) уравнение непрерывности для дырок имеет вид.

$$\frac{1}{\epsilon} \operatorname{div} j_p = \frac{\Delta p_1}{\tau_1} = \frac{1}{\tau_1} (G\tau_2 - \Delta p_2) \quad \text{или} \quad D_{p_1} \operatorname{div} \frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{1}{\tau_1} (G\tau_2 - \Delta p_2) \quad (5)$$

Это уравнение аналогично с дифференциальным уравнением для солнечных элементов [4], но отличается со знаком “–”, поэтому решение уравнения имеет вид.

$$G\tau_{p_2} - (p_2(x) - p_1) = (G\tau_{p_2} - (p_2(x) - p_1)) \exp\left(-\frac{x - x_p}{L_{p_1}}\right)$$

где  $L_{p_1}^2 = D_{p_1} \tau_{p_1}$  и  $p_2(x) = p_1 \exp\left(\frac{U - \varphi_s}{kT}\right)$

тогда для плотности тока получаем.

$$j_p = |e| G L_{p_1} \frac{\tau_2}{\tau_1} - \frac{\epsilon D_{p_1} p_1}{L_{p_1}} \left[1 - \exp\left(\frac{U - \varphi_s}{kT}\right)\right] \quad (6)$$

На [5,6] работах была получена вольтамперная характеристика и зависимость диффузионного тока от температуры, и полученные графики подтверждают наличие тока в  $p - por - Si / p - c - Si$  структурах при  $U = 0$  и это доказывает правильность наших рассуждений и полученные нами аналитические выражения (6).

При  $U = 0$ , ток является только рекомбинационным, а при значения  $U_0$  в цепи отсутствует ток, то есть  $j = 0$  тогда учитывая это соотношение из (6) выражения сможем определить значения  $p_1$ .

$$p_1 = G L_A^2 \frac{\tau_2}{\tau_1 D_{p_1}} \left[1 - \exp\left(\frac{U_p - \varphi_s}{kT}\right)\right]^{-1} \quad \text{или} \quad p_1 = G\tau_2 \left[1 - \exp\left(\frac{U_D - \varphi_s}{kT}\right)\right]^{-1} \quad (7)$$

Если величина  $\Delta p_1$  из (1) уравнения и  $p_1$  из (7) выражения удовлетворят следующие соотношения  $\Delta p_1 \approx p_1$ , тогда из (1) можно определить скорость поверхностной рекомбинации  $S$

$$S = \frac{j_R}{\epsilon \Delta p}$$

$$S = \frac{j_R}{\epsilon G \tau_2} \left[1 - \exp\left(\frac{U - \varphi_s}{kT}\right)\right] \quad (8)$$

## Литературы

1. В. П. Афанасьев, А. С. Гудовских. Солнечные элементы на основе гетероструктуры аморфный/монокристаллический кремний. Физические явления в твердых телах, жидкостях и газах. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №4/2017.
2. Development status of high-efficiency HIT solar cells / T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata, E. Maruyama // Sol Energy Materials & Solar Cells. 2011. Vol. 95. P. 18–21.
3. Obtaining a higher Voc in HIT cells/ M.Taguchi, A.Terakawa, E.Maruyama, M.Tanaka// Prog. Photovolt: Res. Appl.2005. Vol. 13. P.481–488.
4. К.Зеегер. Физика полупроводников. Издательство «мир» Москва 1977.
5. V.V. Tregulov, V.A. Stepanov, N.N. Melnik. Properties of the semiconductor structure with a p–n-junction created in a porous silicob film under laser radiation. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 11(1) 2018
6. В.В. Трегулов, В.А. Степанов, В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин. Особенности механизмов токопрохождения в полупроводниковой структуре фотоэлектрического преобразователя с n+–p-переходом и антиотражающей пленкой пористого кремния. Журнал технической физики, 2016, том 86, вып.11

**PHOTOVOLTAIC AND PHOTOREFRACTIVE EFFECT IN CUBIC PIEZOELECTRIC  
ZnS**

**Karimov Boxodir Xoshimovich, Toxtasinov Maqsadjon Murodjon o'g'li,  
Ferghana State University**

**Abstract:** In this work was considered photovoltaic effect in cubic piezoelectric crystals ZnS. Some experimental and physical bases of photovoltaic effect have been discussed.

**Key words:** crystals ZnS, photovoltaic effect, tensor, crystal without the centre of symmetry, generates

**Photovoltaic effect in cubic crystals ZnS**

The anomalous photovoltaic effect observed for the first time for ferroelectrics is a particular case of a more general photovoltaic effect described for crystals without a center of symmetry by the third-rank tensor  $\alpha_{ijk}$ .

$$J_i = \alpha_{ijk} E_j E_k^* \quad (1)$$

The components of tensor are distinct from zero for 20 acentric groups of symmetry. At presence of the centre of symmetry  $\alpha_{ijk}=0$ .

The photovoltaic effect for the first time was found experimentally out in ferroelectrics [1,2], and also in piezoelectrics [3,4,9]. The consecutive theory of this effect was advanced in [5], where was shown, that it is connected to purchase nonequilibrium electron of a superfluous pulse in a zone of conductivity, which size and direction are defined by asymmetry of excitation, recombination and dispersion of the carrier in a noncentro-symmetrical crystal.

According to (1) at uniform illumination by the linearly polarized light of a homogeneous crystal without the centre of symmetry in it arises a photovoltaic current  $J_i$ . The mark and size of photovoltaic current  $J_i$  depends on orientation of a vector of polarization of light with components  $E_j$  and  $E_k^*$ . If electrodes of a crystal to open, the photovoltaic current  $J_i$  generates the photovoltage

$V_i = \frac{J_i}{\sigma_T + \sigma_\phi} l$  where  $\sigma_T$  and  $\sigma_\phi$  accordingly dark and photoconductivity,  $l$  distance between

electrodes. Generated photovoltage about  $10^3$ - $10^5$ V, exceeding, thus, size of width of forbidden zone