

11-20-2020

DEVELOPMENT OF CHEAP AND DURABLE SILICON SOLAR CELLS WITH NANOSCALE P-N JUNCTIONS

E. Z. Imamov

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Republic of Uzbekistan, erkinimamov@mail.ru

R. A. Muminov

Physical-technical Institute of the Scientific and Production Association "Physics-Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan, detector@uzsci.net

R. Kh. Rakhimov

Institute of Materials Science of the Scientific and Production Association "Physics-Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan, rustam-shsul@yandex.com

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi>

Recommended Citation

Imamov, E. Z.; Muminov, R. A.; and Rakhimov, R. Kh. (2020) "DEVELOPMENT OF CHEAP AND DURABLE SILICON SOLAR CELLS WITH NANOSCALE P-N JUNCTIONS," *Scientific-technical journal*: Vol. 24 : Iss. 5 , Article 7.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol24/iss5/7>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific-technical journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact sh.erkinov@edu.uz.

УДК 621.315.592

DEVELOPMENT OF CHEAP AND DURABLE SILICON SOLAR CELLS WITH NANOSCALE P-N JUNCTIONS¹Imamov E.Z. ²Muminov R.A. ³Rakhimov R.Kh.¹Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, Republic of Uzbekistan E-mail: erkinimamov@mail.ru²Physical-technical Institute of the Scientific and Production Association "Physics-Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan
E-mail: detector@uzsci.net³Institute of Materials Science of the Scientific and Production Association "Physics-Sun" of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan
E-mail: rustam-shsul@yandex.com**РАЗРАБОТКА ДЕШЕВЫХ И ДОЛГОВЕЧНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ p-n ПЕРЕХОДАМИ**¹Имамов Э.З. ²Муминов Р.А. ³Рахимов Р.Х.¹Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хоразмий, г. Ташкент, Республика Узбекистан E-mail: erkinimamov@mail.ru²Физико-технический институт научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан
E-mail: detector@uzsci.net³Институт материаловедения научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан, г. Ташкент, Республика Узбекистан
E-mail: rustam-shsul@yandex.com**КРЕМНИЙ ЮЗАСИГА НАНОЎЛЧАМЛИ P-N ЎТИШЛАР ЎСТИРИЛГАН АРЗОН ВА УЗОҚ ХИЗМАТ ЭТУВЧИ ҚУЁШ ЭЛЕМЕНТЛАРИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ**¹Имамов Э.З., ²Муминов Р.А., ³Рахимов Р.Х.¹Мухаммад ал-Хоразмий номидаги Тошкент ахборот технологиялари университети, Тошкент, Ўзбекистон Республикаси E-mail: erkinimamov@mail.ru²Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг "Физика-Қуёш" илмий-ишлаб чиқариш бирлашмасининг физик-техник институти, Тошкент шаҳри, Ўзбекистон Республикаси
E-mail: detector@uzsci.net³Ўзбекистон Республикаси Фанлар академиясининг "Физика-Қуёш" илмий-ишлаб чиқариш бирлашмаси Материалшунослик институти, Тошкент шаҳри, Ўзбекистон Республикаси
E-mail: rustam-shsul@yandex.com**Abstract.** *The possibility of developing efficient, cheap, sustainable and long-lasting solar cells has been studied. Parameters of the heterojunction material are determined.***Keywords:** semiconductor, the current-voltage characteristic of nanocluster.**Аннотация.** *Изучена возможность разработки эффективных, дешевых, устойчивых и долговечных солнечных элементов. Определены параметры материала гетероперехода.***Ключевые слова:** полупроводник, вольт-амперная характеристика, нановключения.**Аннотация.** *Самарадор, арзон, чидамли ва узоқ хизмат даврли қуёш элементларини ишлаб чиқариш имкониятлари ўрганилган. Гетероўтиш материалларининг параметрлари аниқланган.***Таянч сўзлар:** яримўтказгич, вольт-ампер характеристика, нанокиришмалар.

Введение. На протяжении ряда лет нами изучается возможность разработки эффективных, дешевых, устойчивых и долговечных солнечных элементов (СЭ). Эффективность солнечного элемента определяется в основном следующими факторами:

- использованием в качестве подложки относительно **дешевых материалов**,
- относительной **длительностью срока непрерывной работы** (или долговечностью),
- относительно **широким спектром эффективного поглощения** света.

Эффективное поглощение света (или эффективное преобразование света) означает такой процесс поглощения света, когда оно сопровождается рождением электричества, а не тепла. Для существующих традиционных кремниевых солнечных элементов спектр эффективного поглощения света [1] простирается от 1 до 1,9 эВ. Любое расширение этого диапазона как в инфракрасный (ИК), так и в ультрафиолетовую (УФ) сторону привело бы к существенному и естественному увеличению КПД преобразователя.

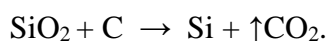
Обычно, решение проблемы эффективности осуществляется, в основном, в направлении максимального увеличения КПД путем расширения спектра фото преобразования. Достигнутые при этом впечатляюще высокие показатели (КПД 27-30%), однако, обеспечивались применением в качестве материалы базы СЭ многократно дорогого, но с высокой степенью чистоты и кристалличности монокристаллического кремния. Целенаправленных исследований проблемы удешевления и долговечности СЭ путем использования относительно **дешевых** модификаций кремния практически не было. Известные факты последних лет о серьезном удешевлении солнечной энергетики являются, скорее всего, результатом совершенствования технологии опять-таки процесса получения монокристаллического кремния(или применения других сложных органических материалов).

Неупорядоченный бесструктурный кремний. В настоящей работе основное внимание уделено методам создания именно дешевых и долговечных **кремниевых** солнечных элементов (СЭ). Непосредственное целевое решение столь необычной проблемы оказалось возможным в связи с развитием нано технологии и сопутствующими ей успешными исследованиями явлений в атомных масштабах [2-16]. В современную эпоху основную компоненту солнечного элемента – его отдельный р-п переход можно создать нано размерной форме в нано пространстве, где материя проявляет неограниченно разнообразные, самые уникальные и неожиданные свойства, которых в привычном макро состоянии, может вовсе и не быть.

Структура любого твердого тела (в том числе и кремния) в определенных пропорциях всегда сочетает в себе как кристаллическую, так и неупорядоченную фазу. **Не бывает** в природе целиком строго кристаллического или целиком бесструктурного (неупорядоченного) кремния. Он состоит из кристаллических и аморфных (некристаллических) областей. В зависимости от того какая компонента превалирует, кремний подразделяется на следующие типы:

- монокристаллический кремний – объемы кристаллической фазы значительно превосходят бесструктурную компоненту;
- поликристаллический кремний - при соизмеримых объемах обоих компонент;
- неупорядоченный кремний - в количественном отношении сильно превалирует бесструктурная составляющая.

Дешевизна неупорядоченной разновидности кремния (будем называть его – бесструктурным кремнием)связана тем, что её получают из природного сырья SiO₂ - диоксида (или кремнезема, или кварцевого стекла) сразу же после первого технологического этапа очистки кремния на основе химической реакции:



В то время как поликристаллический кремний получают после 4-го этапа, а монокристаллический чистый Si- только после 7-го (эти этапы процесса производства являются сильно энергоёмкими, сложными и, естественно, дорогостоящими). Рассмотрим модель подложки солнечного элемента из бесструктурного кремния, так как производство бесструктурного кремния обходится приблизительно на два порядка дешевле, чем производство монокристаллического кремния. В ней большие неупорядоченные участки толщиной «b» (порядка нескольких мкм) последовательно чередуются (или комбинируются) с длинными (порядка мкм), тонкими (толщиной «a») **нано размерными** прослойками с геометрически четко выраженной монокристаллической структурой (рис.1). Эти длинные и тонкие нано размерные прослойки в работе [16] названы «монокристаллическими капиллярами или нитями». Они зарождаются у освещаемой поверхности подложки и, пронизывая всю её толщину L, заканчиваются на тыльной поверхности.

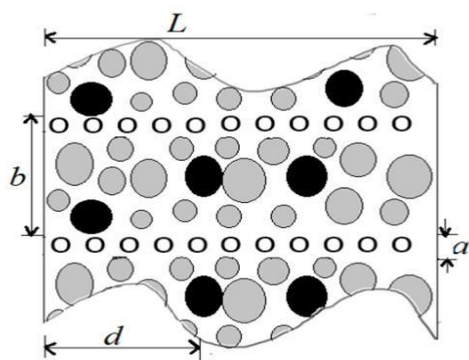


Рис.1. Модель технического кремния в поперечном по толщине разрезе. В количественном отношении очень мала кристаллическая компонента «a» (~1% и даже меньше), чем бесструктурная: «L»>>«b»>>«a»
Толщина подложки L солнечного элемента порядка 250-450 мкм
O –символический монокристаллический слой или «капилляр» или «нить» (oooooo - порядка 5-25nm)

В подобной структуре подложки («L» >> «b» >> «a») важно наличие хоть и наноразмерных масштабах, тем не менее, монокристаллических прослоек. Если найти способ электрической активизации именно этих монокристаллических нано размерных нитей, затем этим способом вырастить внутри них нано размерные контактные структуры (то есть нано размерные p-n переходы), то их фото преобразующие свойства мало отличались бы от идеальных высокоэффективных кремниевых солнечных элементов.

Естественно, что любые исследования свойств сверхмалых объектов в нано размерном пространстве возможны современными нано технологическими методами. Например, электрическую активизацию тонких монокристаллических прослоек лучше всего, по нашему мнению, осуществлять методом МЛЭ - молекулярно-лучевой эпитаксии, который на основе физического принципа самоорганизации статистических систем [17] позволяет вырастить на

кремниевой подложке нано кластеры (или нано включения) из другого полупроводникового соединения [18]. При соблюдении определенных технологических условий нано кластер с гораздо большей вероятностью растет на поверхности подложки в тех областях, которые отличаются высокой кристаллическостью, то есть в пределах «монокристаллических капилляров».

Одновременно, рост нано кластеров сопровождается установлением термодинамического равновесия между контактируемыми материалами и выравниванием их уровней Ферми за счет перетекания собственных электронов из кремния в материал с меньшей работой выхода.

В нано кластере скапливаются электроны, образуя p-область, а в кремниевой подложке (на рис.1) формируется n-область устойчивой нано гетеро контактной системы. К упругим напряжениям, ответственным за рост упорядоченного массива трёхмерных когерентно напряжённых островков (нано кластеров в форме правильной четырехугольной цельной или усеченной пирамиды рис-2), добавляется также кулоновское взаимодействие, формирующихся n- и p-

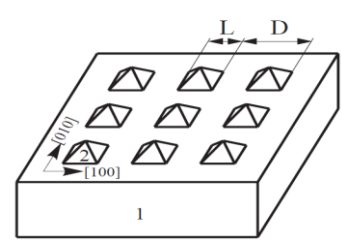


Рис.2. Нано кластеры в форме правильной четырехугольной цельной или усеченной пирамиды.

областей нано гетеро контакта. От этого значительно усилится цепкость и устойчивость образовавшегося контакта.

В рассматриваемом примере р-область сосредоточена на нано кластере (и она нано размерна!), а её n-область толщиной в несколько мкм - полностью расположена на «монокристаллических капиллярах» подложки (рис.3). Процесс преобразования солнечного излучения в электричество в отдельном нано размерном р-п переходе происходит в нано пространстве, где материя проявляет разнообразные и неожиданные свойства, которых в привычном макро состоянии, может вовсе и не быть.

Из размерных соотношений видно, что в одном см² возникает до нескольких сот миллионов ($10^{-4}m^2/10^{-12}m^2 = 10^8$) подобных нано гетеро систем. Фототок, генерируемый в каждом таком нано размерном контакте, по величине порядка десятков пикоампер ($10^{-10} \div 10^{-11}$ пА), а световой ток от всех (10^8) на одном см² параллельно соединенных нано гетеро контактных систем отдельного солнечного элемента составит $(10^8 \cdot (10^{-10} \div 10^{-11})) = (10^{-2} \div 10^{-3})$ пА) несколько миллиампер. При этом их преобразующие свойства, практически, совпадают со свойствами традиционных *идеальных* диодов на монокристаллическом собственном кремнии.

Наличие «монокристаллических кремниевых капилляров» и возможность нано технологическим способом их электрически активизировать являются основными условиями создания эффективных, дешевых, устойчивых и долгоживущих солнечных элементов.

У каждой нано гетеро контактной системы р-область **нано** размерна, а положительно заряженная и длинная n-область сравнительно **макро** размерна. Возникающая нано гетеро контактная структура:

- это электрический **контакт** двух веществ с разной геометрией (полупроводникового макрообъекта с нано объектом из другого полупроводника);
- это - **нано контакт**, так как содержит нано объект;
- это - **гетеро контакт**, так как состоит из двух химически различных материалов;
- это - **р-п переход**, так как содержит электростатическое контактное поле.

Материал нано включения: халкогениды свинца. Создание в нано размерном пространстве контактных структур выдвигает особые требования и к технологическому процессу и к выбору контактирующих материалов.

Первый материал уже выбран – это неупорядоченный кремний, а вот о втором контактном материале мы знаем пока только то, что он должен быть нано размерным. Нано размерность второй компоненты важна, поскольку р-п переход с двумя контактирующими макроскопическими материалами, один из которых, к тому же, технический кремний, практически не будет иметь преобразующих свойств, так как рекомбинационные токи немедленно нейтрализуют даже зачатки возникающих электрических проявлений. Кроме геометрических требований второй материал должен удовлетворять следующим условиям:

- быть нано размерным;
- значения работы выхода его (нано кластера A_N) должно обеспечивать установление с кремниевой подложкой (A_{Si}) достаточно сильное контактное электростатическое поле;
- быть способным локализовать некоторую концентрацию электронов (электроемким);
- обладать аномально высокой электроемкостью (это центр концентрации электронов и формирования р-области);

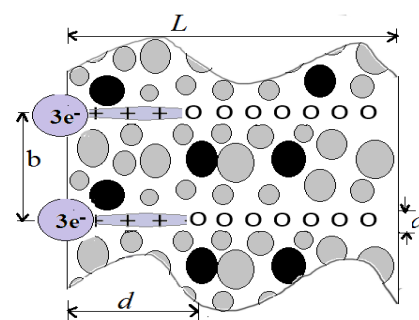


Рис.3. Фрагмент модели СЭ со сверхмалыми нано гетеро переходами (для примера: заряд р-области $q=3e^-$, а n-области $q=3e^+$) и создание внутри «монокристаллических нитей» сверхмалых наноразмерных р-п переходов « L » >> « d » >> « b » >> « a » d – толщина области контактного поля или область пространственного заряда (+++ - десятки мкм)

Materials of the V International Conference "Optical and photoelectrical phenomena in semiconductive micro- and nanostructures". Ferghana, November 13-14, 2020.

-быть из многокомпонентных соединений, обладающих высокой термической и временной стабильностью (условие необходимое для эффективной реализации процесссамоорганизации);

-размер материала должен в достаточно широком температурном диапазоне сохранять свойства квантовых точек (дискретность своих энергетических уровней);

-быть узко зонным полупроводником относительно широко зонной подложки из кремния.

Вышеуказанным требованиям удовлетворяют вещества из семейства халкогенидов свинца (см. таблицу):

- у них большие значения ϵ -диэлектрической проницаемости;
- относительно узко зонные (PbS, PbTe и PbSe по сравнению с Si);
- малые значения эффективных масс носителей заряда (Si: $\epsilon = 12$, $\Delta E_g = 1,08$ эВ, $m_n/m_0 = 0,98$, $m_p/m_0 = 0,19$).

Таблица	Параметры материала	PbS	PbSe	PbTe
ΔE_g - ширина запрещенной зоны при T=0 (эВ)		0,29	0,26	0,3
ΔE_g - запрещенная зона при T=300K (эВ)		0,40	0,29	0,34
ϵ -диэлектрическая проницаемость		175	250	450

Геометрический фактор nano кластера. Кроме химического состава nano кластер, образующийся на поверхности подложки и концентрирующий в себе заряд q, может иметь различные геометрические формы (например, форму шара, полу-шара, усеченного шарового сегмента, усеченной четырехугольной пирамиды, но чаще всего в форме четырехугольной усеченной пирамиды [19-21]). В зависимости от формы будет разным и электроемкость nano кластера C_0 .

Взяв за основу емкость шара радиусом R и вводя безразмерный параметр f, учитывающий трехмерную геометрию nano кластера, получено обобщенное её значение (разное для разных форм nano кластера), а также значение максимальной величины заряда q, собирающегося на нем:

$$C_0 = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot f \cdot \epsilon_N \cdot R \quad \text{и} \quad q = C_0 \cdot \phi_0 = f \cdot 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_N \cdot R \cdot \Delta\mu / (e \cdot k),$$

где $\phi_0 = \Delta\mu / e$, $\Delta\mu$ – разность работ выходов контактирующихся материалов ($A_{QD} - A_{n-Si}$), ϕ_0 - определяет величину максимального контактного потенциала поверхности шара.

Величина f для шара равно 1, а для полушара радиусом R - $f = 3/4$. Значения f для остальных форм nano кластера даны в таблице:

Усеченный шаровой сегмент	$f = (2 + 2 \cdot v^* - v^{*2}) / 4$	высота h R - радиус шара	$v^* = h / R$ изменяется от 0 до 1
Усеченная четырехугольная пирамида	$f = \{ 1 - 2\mu \cdot \sqrt{1 - \gamma} + 2 \cdot \mu^2 \} \cdot P$ $tg \omega = 2h / (a - b)$	$\mu = h / (a \cdot \sqrt{1 + \gamma})$ высота h	$P = 2a^2 / (4 \cdot \pi \cdot R^2)$ $\gamma = 1 / \cos \omega$

Усеченная четырехугольная пирамида высотой h является наиболее вероятной формой роста nano кластера согласно эффекту самоорганизации [6]. В зависимости от изменения высоты h численная величина f(s) при этом изменяется от P до 1,2 · P.

Вывод: Предлагается механизм перехода на эффективную солнечную энергетику путем разработки технологии создания эффективных солнечных элементов с nano размерными p-n переходами внутри nano размерных монокристаллических капилляров, то есть привлечь методы nano технологии при создании солнечных элементов.

References:

- [1] Bube R. H., Proc. RAGE, 43 (12), 1836 (1955).
- [2] E. Z. Imamov, R. A. Muminov, T. A. Jalalov, H. N. Karimov // Influence of nano-technological impact on the parameters of the solar cell // *Ilmiy xabarnoma / Scientific Bulletin*. 2019. No. 1 P. 25-27
- [3] E. Z. Imamov R. A. Muminov T. A. Jalalov H. N. Karimov G. Ergashev // Nano-technological transformation of illusory properties of the macrocosm // *UFJ-Uzbek Physical Journal*. 2019. No. 3. P. 173-179
- [4] E. Z. Imamov, R. A. Muminov T. A. Jalalov. N. Karimov // Silicon solar cell with small R-n transitions // *"Semiconductor Physics and Microelectronics"* 2019. No. 4 p. 14-21
- [5] T. A. Jalalov, E. Z. Imamov, R. A. Muminov // Nanostructured silicon solar cell // *Izd-vo "Ditaf"*, monograph, Tashkent, 2018, 106. P.
- [6] Jalalov T. A., Imamov E. Z., Muminov R. A., Rakhimov R. H. // Expanding the spectrum of effective absorption of solar cells with nano-inclusions // *J. Computational nanotechnologies* // 2018. Issue No. 1, pp. 155-167
- [7] Jalalov T. A., Imamov E. Z., Muminov R. A., Sabirov Kh., Atoev Sh. Sh. // solar cells based on non-crystalline silicon with nanostructured effects // *J.* 2018, No. 3 pp. 85-90, ISSN 2313-223X.
- [8] E. Z. Imamov R. A. Muminov T. A. Jalalov H. N. Karimov // On the problem of optimizing the properties of a silicon solar cell // *Materials of the V-International Scientific and Practical Conference "Global Science and Innovation 2019: Central Asia"*, Astana, Kazakhstan, March 2019.
- [9] Imamov E. Z., Muminov R. A., Jalalov T. A. Karimov H. N. // Optimization of the properties of a silicon solar cell / *Materials of the International scientific and practical conference "Auezov Readings-17: IX-ve" IX-vol.* Shymkent. Kazakhstan, 2019. p. p. 162-163
- [10] E. Z. Imamov, R. A. Muminov, H. N. Karimov, F. T. Umarova // Photovoltaic properties of silicon solar cells of micron scale // *IX International Conference "Modern problems of nuclear physics and nuclear technologies"* September 24-27, 2019 / Tashkent, Republic of Uzbekistan p. 231-237
- [11] Jalalov T. A., Imamov E. Z., Muminov R. A., Karimov Kh. N. // About priority directions of energy development in Uzbekistan in the classroom of physics // *Italiener termoglyaze innovative rivojlanishi axborot-communication technology learning aliye* // *Republic of Ilmi-tech inhumanizing maruzalarit play* // *Muhammad al-Khorazmi of nomidagi TATTOO 2019-yil 14-15 March.* 429-434 // *Iqtisodiyotning tarmoqlarini innovasion rivojlanishida axborot-kommunikatsiya texnologialarining axamiyati* // *respublika ilmiy-texnik anjumanining maruzalar toplami / TUIT*
- [12] E. Z. Imamov, R. A. Muminov T. A. Jalalov, X. N. Karimov // Unique features of solar cells with nanoheterostructure structures // *Physics fanning repaid istihdami of elarning RNI* // *RIAK-XII-2019* // *Republic of ilmiy-nazariy anjuman materiallari / Mirzo Ulugbek nomidagi Yz.MU.* 2019-yil 18-May 300-303 bet
- [13] E. Z. Imamov R. A. Muminov T. A. Jalalov, H. N. Karimov // *Yzbekistonda atom elektrstantsiyalaridan foidalanish istiqbollari* // *"Fan va talim-tarbiyaning dolzarb masalalari"* mavzusidagi Rep. ilmiy-nazariy anjuman mater. 4-bylim / *NEKIS - 2019 NMPI.* 144-146-bet
- [14] E. Z. Imamov, R. A. Muminov, T. A. Jalalov, H. N. Karimov // Advantages of solar cells with nanoheterostructures. // *Mater. Rep. of the scientific and practical conference with the participation of foreign scientists "Innovative technologies in science and education"* 20-21 November 2018 // *Nukus - 2018.* vol. 1. pp. 5-6
- [15] E. Z. Imamov, T. A. Jalalov, R. A. Muminov // Electrophysical properties of the "nanoscale p-n transition" / *Mater. Rep. of the scientific and practical conference with the participation of foreign scientists "Innovative technologies in science and education"* 20-21 November 2018 // *Nukus-2018.* vol. 1. pp. 88-91
- [16] Tsoi Bronya / *Ep2405487 A1-Patent in the Eurasian Patent Office.* 2012.08.30.
- [17] Tsoi B. Method of manufacturing a beam transition, a beam converter of electromagnetic radiation / *No.VU 2011/040838 A2. Patent in the World Intellectual Property Organization.* 07. 04.2011
- [18] H. Haken / *Synergetics* // Springer, Berlin-Heidelberg, 1997.
- [19] V. Stanciu, E. Pentia, A. Goldenblum, M. Buda, G. Iordache, T. Botila // A comparative study of microcrystalline and nanocrystalline lead sulfide based $\text{PbS/SiO}_2/\text{Si}$ and heterostructures // *Romanian journal of information science and technology* / Volume 10, issue 1, 2007, 53-66
- [20] Ledentsov N. N., Ustinov V. M., Shchukin V. A., etc. Heterostructures with quantum dots: obtaining, properties, lasers // *FTP.* 1998. T. 32. No. 4. pp. 385-410.
- [21] Ledentsov N. N., Ustinov V. M., Ivanov S. V. et al. // Ordered arrays of quantum dots in semiconductor matrices // *UFN.* 1996. T. 166. no. 4. pp. 423-428.
- [22] Shchukin V. A., Ledentsov N. N., Kopyev P. S., Bimberg D. / Spontaneous ordering of arrays of coherent stressed islands // *phys. Lett.* 1995. V. 75. No 16. P. 2968-2971.