

8. Технология СБИС / К. Пирс, А. Адамс, Л. Кац, Дж. Цай, Т. Сейдел, Д. Макгилс: в 2 кн. Кн. 1 / пер. с англ. под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986. 404 с.
9. Etching optimization of post aluminum-silicon thermomigration process residues / Lu B., Gautier G., Valente D., Morillon B., Alquier D // Microelectronic Engineering. 2016. № 149. P. 97–105.
10. Study of aluminum thermomigration as a low thermal budget technique for innovative power devices / Morillon B., Dilhac J.-M., Ganibal C., Anceau C. // Microelectronics Reliability. 2003. № 43 (4). P. 565–569.

УДК 621.383.46

**Чеботарев Сергей Николаевич, Мохамед Аднан Абду Абдуллах,  
Лунина Марина Леонидовна, Сысоев Игорь Александрович,  
Лунин Леонид Сергеевич, Пашченко Александр Сергеевич,  
Гончарова Лидия Михайловна, Еримеев Георгий Александрович**

## **ГЕНЕРАЦИОННО-РЕКОМБИНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ПРЯМОЗОННОЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ПОДЗОНОЙ <sup>1</sup>**

*В статье предложена модель для исследования генерационно-рекомбинационных процессов в фотоэлектрических наноструктурах с промежуточной подзоной, позволяющая рассчитать их функциональные характеристики и эффективность преобразования солнечного излучения. Экспериментально выращены фотонаноструктуры с внедренными квантовыми точками InAs / GaAs. Показано, что представленная модель адекватно описывает экспериментальный эффект повышения тока короткого замыкания, достигаемого дополнительным поглощением ИК-фотонов.*

**Ключевые слова:** фотоэлектрические наноструктуры, квантовые точки, ионно-лучевая кристаллизация.

**Sergei Chebotarev, Adnan Mohamed, Marina Lunina, Igor Sysoev,  
Leonid Lunin, Aleksander Pashchenko, Lidiya Goncharova, Georgy Erimeev  
GENERATION-RECOMBINATION PROCESSES IN DIRECT INTERMEDIATE BAND  
PHOTOVOLTAIC NANOHETEROSTRUCTURES**

*A model for the study of generation-recombination processes in the direct intermediate band photovoltaic nanostructures was proposed. The model allows to calculate the functional characteristics and the efficiency of solar radiation conversion. The nanostructures with embedded quantum dots InAs / GaAs were experimentally grown. It is shown that the model enough correctly describes the experimental effect of increasing the short-circuit current due an additional absorption of infrared photons.*

**Key words:** photovoltaic nanostructures, quantum dots, ion-beam crystallization.

Современная альтернативная энергетика в основном базируется на совершенствовании фотоэлектрических преобразователей [1] и ветрогенераторов [2]. Наибольшая эффективность преобразования достигнута с использованием прямозонных многокомпонентных каскадных фотоструктур с использованием концентраторов солнечного излучения [3, 4]. Помимо каскадных фотопреобразователей, в последнее время особую актуальность приобрели исследования фотоструктур с промежуточной подзоной, выполненных на основе гетероструктур с квантовыми точками [5, 6]. Принцип действия таких устройств основан на поглощении фотонов, обладающих энергией меньше ширины запрещенной зоны матричного материала, через промежуточную подзону, являющуюся обобщенной совокупностью первых возбужденных состояний квантовых точек [7, 8].

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 15-08-08263-а, 17-08-01206) и гранта Президента Российской Федерации МК-5115.2016.8.

Наибольшим технологическим потенциалом обладают фотопреобразователи с прямозонной промежуточной подзоной [9]. Для выращивания фотоэлектрических наноструктур наибольшее распространение получили молекулярно-пучковая эпитаксия [10], МОС-гидридный метод [11], зонная сублимационная перекристаллизация [12–14] ионно-лучевая кристаллизация [15–18]. Изучение морфологии массива квантовых точек обычно проводится с помощью зондовой микроскопии [19–21].

В статье представлена разработка модели генерационно-рекомбинационных процессов в наногетероструктурах с квантовыми точками и дана теоретическая оценка эффективности преобразования солнечного излучения.

Модель. Генерация электронов и дырок в любом полупроводниковом устройстве происходит при поглощении фотонов, у которых энергия больше ширины запрещенной зоны. Но все генерируемые носители заряда достигают контактов, формируя электрический ток во внешней цепи. Скорость рекомбинации на поверхности границ между слоями является одним из параметров, задающих фототок  $J_{photo}$ . Многослойное устройство содержит значительное число границ, служащих эффективными центрами захвата носителей заряда, которые могут приводить к значительным рекомбинационным процессам. Скорость рекомбинации  $S_i^{eff}$  в области истощения может быть найдена в предположении, что коэффициент собирания равен единице.

$$S_i^{eff} = \frac{D_{i+1}}{L_{i+1}} \frac{N_{A,i}}{N_{A,i+1}} \left( \frac{n_{i,i+1}}{n_{i,i}} \right)^2 \frac{D_{i+1} + \tanh\left(\frac{W_{i+1}}{L_{i+1}}\right) + S_{i+1}^{eff} L_{i+1}}{D_{i+1} + \tanh\left(\frac{W_{i+1}}{L_{i+1}}\right) S_{i+1}^{eff} L_{i+1}} + S_{i,i+1}, \quad (1)$$

где  $D_i$  – диффузионный коэффициент,  $L_i$  – диффузионная длина неосновных носителей,  $W_i$  – толщина.

Вероятность сбора носителей  $f$  в слое с дырочным типом проводимости может быть найдена из уравнения:

$$f_{c,i}(x) = f_{c,i-1} \frac{D_{i+1} \cosh\left(\frac{W_i - (x - x_i)}{L_i}\right) + S_i^{eff} L_i \sinh\left(\frac{W_i - (x - x_i)}{L_i}\right)}{D_i \cosh\left(\frac{W_i}{L_i}\right) + S_i^{eff} L_i \sinh\left(\frac{W_i}{L_i}\right)} + S_{i,i+1}. \quad (2)$$

Вероятность сбора носителей в слое с электронной проводимостью может быть найдена по аналогичной формуле. Генерируемый фототок находится путем интегрирования по всей толщине слоя с использованием введенных выше уравнений:

$$J_{photo} = e \int_0^W G(x) f_c(x) dx, \quad (3)$$

где  $e$  – элементарный заряд,  $W$  – толщина фоточувствительных слоев.

Промежуточная подзона создается обобщением дискретных уровней квантовых точек, заключенных в матрицу базового материала. Основной технологической проблемой является выращивание однородного по размерам массива квантовых точек. В этом случае размытия подзоны не наблюдается.

Скорость генерации при поглощении фотонов с энергией больше ширины запрещенной зоны приводит перебросу электронов из валентной зоны в зону проводимости  $G_{cv}(x)$  устанавливается выражением

$$G_{cv}(x) = \int_{E_g}^{\infty} [1 - R(E)] F(E) \alpha_{cv}(E) e^{-\alpha_{cv}(E)x} dE. \quad (4)$$

В отличие от классического случая для фотоструктур с промежуточной подзоной также необходимо учитывать еще две скорости генерации. Первая задает темп генерации при поглощении фотонов низкой энергии с переброской электронов из валентной зоны на промежуточную подзону  $G_{IV}$  [22]

$$G_{IV}(x) = \gamma \int_{E_H}^{E_G} [1 - R(E)] F(E) \alpha_{IV}(E) e^{-\alpha_{IV}(E)x} dE. \quad (5)$$

Вторая скорость устанавливает темп генерации носителей, уже находящихся в промежуточной подзоне и перебрасываемых в зону проводимости  $G_{CI}$  [23]:

$$G_{CI}(x) = \gamma \int_{E_L}^{E_H} [1 - R(E)] F(E) \alpha_{CI}(E) e^{-\alpha_{CI}(E)x} dE, \quad (6)$$

где  $[1 - R(E)]$  – мощность излучения в точке с координатой  $x$ .

Уравнения (4)–(6) могут быть использованы для расчетов скорости в условиях произвольного спектра падающего излучения. Однако далее мы использовали излучение спектрального состава AM1.5.

Нахождение концентрации носителей заряда в слое, образующем промежуточную подзону, производится путем решения системы дифференциальных уравнений по аналогии с классическим случаем [24]:

$$D_{n,f} \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - U_{CV} - U_{CI} + G_{CV} + G_{CI} = 0, \quad (7)$$

$$D_{p,f} \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - U_{CV} - U_{CI} + G_{CV} + G_{CI} = 0, \quad (8)$$

где  $D_{n,f}$  и  $D_{p,f}$  – диффузионные коэффициенты,  $U_{CV}$ ,  $U_{CI}$ ,  $U_{IV}$  – скорость рекомбинации с излучением через зоны, отмеченные выше.

Граничные условия для системы (7) – (8) задаются следующим образом:

$$D_{n,f} \frac{d \Delta n}{dx} = \frac{1}{q} J_{n,p} \text{ при } x = 0, \quad (9)$$

$$-D_{p,f} \frac{d \Delta p}{dx} = \frac{1}{q} J_{p,n} \text{ при } x = W_F, \quad (10)$$

$J_{n,p}$  – плотность электронного тока из дырочного слоя в слой с промежуточной подзоной,  $J_{p,n}$  – плотность дырочного тока из электронного слоя в слой с промежуточной подзоной.

Таким образом, плотность дырочного тока устанавливается выражением:

$$J_{p,IB}(x=0) = \int_{E_H}^{E_G} T_{top \rightarrow IB} \left[ \frac{\alpha_{IV} L_h}{(\alpha_{IV}^2 L_h^2 - 1)} \right] \left\{ \frac{\alpha_{IV} L_h e^{-\alpha_{IV} W_F} + \sinh\left(\frac{W_F}{L_h}\right)}{\cosh\left(\frac{W_F}{L_h}\right)} - \alpha_{IV} L_h \right\} dE + \\ + \int_{E_G}^{\infty} T_{top \rightarrow IB} \left[ \frac{\alpha_{CV} L_h}{(\alpha_{CV}^2 L_h^2 - 1)} \right] \left\{ \frac{\alpha_{CV} L_h e^{-\alpha_{CV} W_F} + \sinh\left(\frac{W_F}{L_h}\right)}{\cosh\left(\frac{W_F}{L_h}\right)} - \alpha_{CV} L_h \right\} dE + \frac{J_{p,n}}{\cosh\left(\frac{W_F}{L_h}\right)}. \quad (11)$$

Уравнение для электронного тока записывается в аналогичной форме. Плотность тока короткого замыкания для фотоструктуры с промежуточной подзоной по модулю равна сумме плотностей, найденных из (10)–(11):

$$J_{KЗ} = -(J_{n,p} + J_{p,IB}) = -(J_{p,n} + J_{n,IB}). \quad (12)$$

Плотность тока насыщения  $J_0$  является важнейшим количественным параметром, задающим вид вольт-амперной характеристики, и определяется следующими компонентами: плотность тока из обедненного слоя  $J_{s,bulk}$ , плотности излучательных рекомбинационных токов  $J_{r,CV}$ ,  $J_{r,CI}$ ,  $J_{r,IV}$ , плотности тока безызлучательной рекомбинации  $J_{nr}$ .

Плотность тока из обедненного слоя равняется

$$J_{s,bulk} = \left\{ \frac{en_i^2 D_n}{L_n N_a} \left[ \frac{S_n L_n \cosh\left(\frac{Z_p}{L_n}\right) + \sinh\left(\frac{Z_p}{L_n}\right)}{D_n} \right] + \frac{en_i^2 D_p}{L_p N_d} \left[ \frac{S_p L_p \cosh\left(\frac{Z_n}{L_p}\right) + \sinh\left(\frac{Z_n}{L_p}\right)}{D_p} \right] \right\} \left\{ \exp\left(\frac{eV_A}{kT}\right) - 1 \right\}, \quad (13)$$

где

$$n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_{g,bulk}}{kT}\right),$$

$N_c, N_v$  – эффективные плотности состояний в соответствующих зонах объемного полупроводникового материала,  $N_d, N_a$  – уровни легирования электронного и дырочного слоев,  $S_p, S_n$  – скорости поверхностной рекомбинации,  $D_n, D_p$  – диффузионные коэффициенты,  $L_n, L_p$  – длины диффузии,  $Z_n, Z_p$  – толщины электронного и дырочного слоев,  $V_A$  – внешнее напряжение.

Плотность тока при основной излучательной рекомбинации:

$$J_{r,CV} = e \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_g}^{\infty} E^2 (1 - e^{-\alpha_{CV} W_E}) e^{-\frac{E}{kT}} dE \times \left[ e^{\frac{eV_A}{kT}} - 1 \right]. \quad (14)$$

Плотность тока при излучательной рекомбинации через промежуточную подзону:

$$J_{r,CI} = J_{0,r,CI} \left( e^{\frac{eV_A(1-\zeta)}{kT}} - 1 \right) = J_{0,r,IV} \left( e^{\frac{eV_A \zeta}{kT}} - 1 \right) = J_{r,IV}. \quad (15)$$

В уравнении (16) использованы следующие коэффициенты:

$$J_{r,CI} = e \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_L}^{E_H} E^2 (1 - e^{-\alpha_{CI} W_E}) e^{-\frac{E}{kT}} dE, \quad (16)$$

$$J_{r,IV} = e \frac{2\pi}{h^3 c^2} \int_{E_H}^{E_G} E^2 (1 - e^{-\alpha_{IV} W_E}) e^{-\frac{E}{kT}} dE, \quad (17)$$

Плотность тока при безызлучательной рекомбинации рассчитывается как

$$J_{nr} = en_{n,bulk} \frac{W}{\tau_{SRH}} \left( e^{\frac{eV_A}{kT}} - 1 \right), \quad (18)$$

где  $n_{i,bulk}$  – собственная концентрация,  $W$  – толщина области с промежуточной подзоной,  $\tau_{SRH}$  – время жизни при безызлучательной рекомбинации.

Исходя из представленных выше рассуждений можно видеть, что плотность тока насыщения  $J_0$  задается суммированием каждого компонента

$$J_0 = J_{s,bulk} + J_{r,CV} + J_{r,CI} + J_{nr}. \quad (19)$$

Расчеты показывают, что значение тока  $J_0$  в основном задают плотности  $J_{r,CV}$  и  $J_{r,CI}$ .

**Методика эксперимента.** Выращивание фоточувствительных структур с прямозонной промежуточной подзоной на основе гетеропары InAs / GaAs проводилось с помощью ионно-лучевой кристаллизации. В качестве подложек выбирались 300 мкм пластины GaAs( $n^+$ ) с донорным типом проводимости. В качестве лигатуры использовался кремний. Послойный срез выращенных фотоструктур приведен на рис. 1.

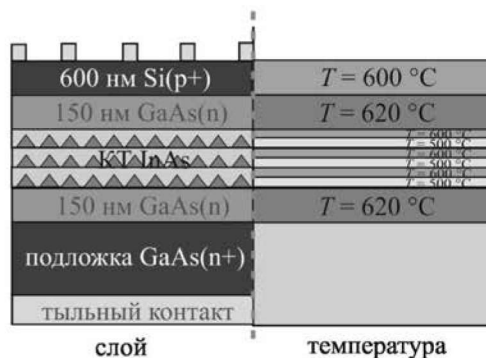


Рис. 1. Тестовая фотоэлектрическая наноструктура с промежуточной подзоной

Промежуточная подзона образована тремя слоями туннельно-связанных квантовых точек арсенида индия, разделенных слоями арсенида галлия. На срезе справа показаны температурные условия выращивания соответствующих слоев: металлический золотой контакт, пластина  $n^+$ -GaAs ( $n \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ); буферный слой  $n$ -GaAs ( $W \approx 150 \text{ нм}$ ,  $n \approx 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ); три слоя квантовых точек InAs ( $W \approx 8 \text{ нм}$ ), покровный слой  $n$ -GaAs ( $W \approx 30 \text{ нм}$ ) с чередующимися дополнительными слоями GaAs ( $W \approx 150 \text{ нм}$ ,  $n \approx 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ), донорный слой  $p^+$ -GaAs ( $W \approx 500 \text{ нм}$ ,  $p \approx 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ), фронтальный Au-контакт. Кроме того, в тех же технологических условиях были выращены реперные фотоэлектрические наноструктуры без внедренных слоев квантовых точек. Площадь выращенных фотоэлектрических структур составляла  $9 \text{ мм}^2$ . Образцы не содержали антиотражающего слоя.

Результаты и их обсуждение. Измерение нагрузочных вольт-амперных характеристик выращенных прямозонных фоточувствительных наноструктур с промежуточной подзоной и без нее проводилось с помощью имитатора солнечного излучения Solar PV, производства ФТИ им. А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург). Рис. 2 обобщает полученные экспериментальные данные.

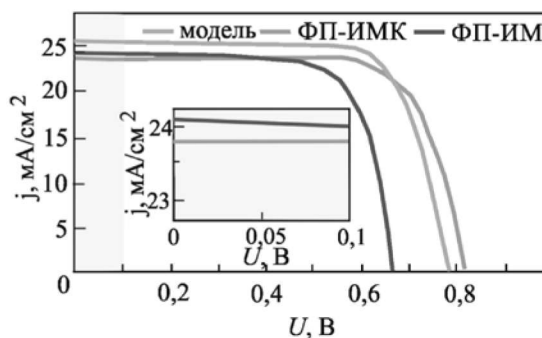


Рис. 2. Измеренные вольт-амперные характеристики

Теоретически найденная плотность тока короткого замыкания составила  $J_{\text{кз}}(\text{теор.}) = 25,12 \text{ мА/см}^2$ . Плотность тока короткого замыкания для устройства с квантовыми точками была меньше теоретического значения и составила

$$J_{\text{кз}}(\text{ФП-ИМ}) = 24,18 \text{ мА/см}^2.$$

Измеренная плотность тока короткого замыкания для устройства без промежуточной подзоны была ниже и равнялась

$$J_{\text{кз}} (\text{ФП-ИМК}) = 23,8 \text{ мА/см}^2.$$

Увеличение плотности тока для фотоэлектрических преобразователей с промежуточной подзоной можно объяснить, только считая, что проявляется эффект дополнительной генерации электронов через промежуточную подзону. Однако важно отметить уменьшение напряжения холостого хода для образцов с квантовыми точками  $U_{\text{хх}}$  (без КТ) = 0,83 В до  $U_{\text{хх}}$  (с КТ) = 0,68 В.

Изучение спектральных кривых внешнего квантового выхода проводилось на оборудовании Spectral производства ФТИ им. А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург). Данные для экспериментальных образцов с архитектурой, показанной на рис. 1, содержащих и не содержащих внедренные слои квантовых точек, показаны на рис. 3.

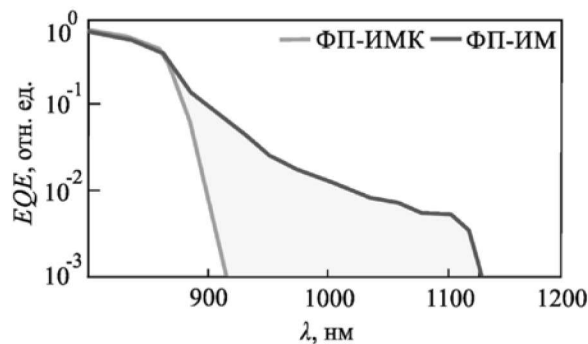


Рис. 3. Спектральные кривые внешнего квантового выхода

Полученные результаты согласуются с измерением вольт-амперных характеристик выращенных образцов. Исследование спектральной зависимости внешнего квантового выхода показало, что общий квантовый выход в фотоструктурах с промежуточной подзоной больше, чем у фотоструктур без подзоны. Кроме того, внешний квантовый выход значительно выше в длинноволновой области от 920 до 1130 нм, что объясняется дополнительной генерацией электронов за счет поглощения низкоэнергетических фотонов через подзону.

Небольшой прирост генерируемого тока объясняется тем, что выращенные наноструктуры имели весьма большой процент *dome*-точек, являющихся эффективными ловушками для электронов, находящихся в зоне проводимости. Наряду с этим нужно учитывать дисперсию размеров квантовых точек, что также сказывалось на размывании промежуточной подзоны.

**Выводы.** Разработана модель для расчета генерационно-рекомбинационных процессов в фотоэлектрических структурах с промежуточной подзоной. Это позволило теоретически исследовать функциональные характеристики фотоэлектрических преобразователей с квантовыми точками. Разработанная модель весьма хорошо согласуется с экспериментальными результатами вольт-амперных и спектральных исследований фотоэлектрических структур с подзоной и без нее, выращенных ионно-лучевой кристаллизацией. Показано, что дополнительный генерационный ток достигается за счет повышения внешнего квантового выхода в длинноволновой области 920–1130 нм.

#### Литература

1. Хвостиков В. П. Высокоэффективный ( $\text{ETA}=39,6\%$ , АМ 1.5d) каскад фотопреобразователей в системе со спектральным расщеплением солнечного излучения / В. П. Хвостиков, А. С. Власов, С. В. Сорокина, Н. С. Потапович, Н. Х. Тимошина, М. З. Шварц, В. М. Андреев // Физика и техника полупроводников. 2011. Т.45. № 6. С. 810–815.

2. Hamzaoui I., Bouchafaa F., Talha A. Advanced control for wind energy conversion systems with flywheel storage dedicated to improving the quality of energy // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41. № 45. P. 20832–20846.
3. Андреев В. М. Высокоэффективные концентраторные (2500 солнц) AlGaAs / GaAs-солнечные элементы / В. М. Андреев, В. П. Хвостиков, В. Р. Ларионов, В. Д. Румянцев, Е. В. Палеева, М. З. Шварц // *Физика и техника полупроводников*. 1999. Т. 33. № 9. С. 1070–1072.
4. Минтаиров С.А. Исследование диффузионных длин неосновных носителей заряда в фотоактивных слоях многопереходных солнечных элементов / С. А. Минтаиров, В. М. Андреев, В. М. Емельянов, Н. А. Калюжный, Н. К. Тимошина, М. З. Шварц, В. М. Лантратов // *Физика и техника полупроводников*. 2010. Т. 44. № 8. С. 1118–1123.
5. Mellor A. Realistic detailed balance study of the quantum efficiency of quantum dot solar cells / A. Mellor, A. Luque, I. Tobias, A. Martí // *Advanced Functional Materials*. 2016. Vol. 24. № 3. P. 339–345.
6. Блохин С. А. Фотоэлектрические преобразователи AlGaAs/GaAs с массивом квантовых точек InGaAs / С. А. Блохин, А. В. Сахаров, А. М. Надточий, А. С. Паюсов, М. В. Максимов, Н. Н. Леденцов, А. Р. Ковш, С. С. Михрин, В. М. Лантратов, С. А. Минтаиров, Н. А. Калюжный, М. З. Шварц // *Физика и техника полупроводников*. 2009. Т. 43. № 4. С. 537–542.
7. López E. Demonstration of the operation principles of intermediate band solar cells at room temperature / E. López, A. Datas, I. Ramiro, P. G. Linares, E. Antolín, I. Artacho, A. Martí, A. Luque, Y. Shoji, T. Sogabe, A. Ogura, Y. Okada // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. Vol. 149. P. 15–18.
8. Чеботарев С. Н. Ионно-лучевая кристаллизация мультикаскадных фотогетероструктур InAs-QD/GaAs / С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко, В. А. Ирха, С. А. Дудников // *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 6-2 (128). С. 43–48.
9. Блохин С. А. Влияние положения массива InGaAs квантовых точек на спектральные характеристики AlGaAs/GaAs фотопреобразователей / С. А. Блохин, А. М. Надточий, С. А. Минтаиров, Н. А. Калюжный, В. М. Емельянов, В. Н. Неведомский, М. З. Шварц, М. В. Максимов, В. М. Лантратов, Н. Н. Леденцов, В. М. Устинов // *Письма в Журнал технической физики*. 2012. Т. 38. № 22. С. 43–49.
10. Weir N. Growth of InAs quantum dots on vicinal GaAs substrates by molecular beam epitaxy / N. Weir, R. Yao, C.-S. Lee, W. Guo // *Journal of Crystal Growth*. 2016. Vol. 451. P. 79–82.
11. Лантратов В. М. Высокоэффективные двухпереходные GaInP / GaAs солнечные элементы, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии / В. М. Лантратов, Н. А. Калюжный, С. А. Минтаиров, Н. Х. Тимошина, М. З. Шварц, В. М. Андреев // *Физика и техника полупроводников*. 2007. Т. 41. № 6. С. 751–755.
12. Лозовский В. Н., Лозовский С. В., Чеботарев С. Н. Моделирование массопереноса примесей при зонной сублимационной перекристаллизации в цилиндрической ростовой зоне // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 2006. № 3. С. 60–63.
13. Лозовский В. Н., Лозовский С. В., Чеботарев С. Н. Исследование краевого температурного эффекта при зонной сублимационной перекристаллизации // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 2007. № 5. С. 52–56.
14. Лозовский В. Н. Осаждение тугоплавких металлов на рельефные подложки методом зонной сублимационной перекристаллизации / В. Н. Лозовский, С. В. Лозовский, С. Н. Чеботарев, В. А. Ирха // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 2007. № 4. С. 68–70.
15. Чеботарев С. Н. Особенности формирования многослойных наноструктур Ge / Si при ионно-лучевой кристаллизации / С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко, Л. С. Лунин, В. А. Ирха // *Письма в Журнал технической физики*. 2013. Т. 39. № 16. С. 30–37.
16. Лунин Л. С. Исследование фоточувствительных гетероструктур InAs / GaAs с квантовыми точками, выращенных методом ионно-лучевого осаждения / Л. С. Лунин, И. А. Сысоев, Д. Л. Алфимова, С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2011. № 6. С. 58–62.
17. Лунин Л. С. Ионно-лучевая кристаллизация нанокластеров Ge на Si (001) / Л. С. Лунин, С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко, М. Л. Лунина // *Наука Юга России*. 2012. Т. 8. № 2. С. 9–12.
18. Lunin L. S. A study of photosensitive InAs / GaAs heterostructures with quantum dots grown by ion-beam deposition / L. S. Lunin, I. A. Sysoev, D. L. Alfimova, S. N. Chebotarev, A. S. Pashchenko // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2011. Т. 5. № 3. С. 559–562.

19. Лозовский В. Н. Получение и использование позиционных меток в сканирующей зондовой микроскопии / В. Н. Лозовский, С. Н. Чеботарев, В. А. Ирха, Г. В. Валов // Письма в Журнал технической физики. 2010. Т. 36. № 16. С. 1–5.
20. Лунин Л. С. Формирование квантовых точек InAs на подложках GaAs методом ионно-лучевого осаждения / Л. С. Лунин, И. А. Сысоев, С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко // Наука Юга России. 2010. Т. 6. № 4. С. 46–49.
21. Лозовский В. Н., Ирха В. А., Чеботарев С. Н. Методика получения нанометок и их применение для позиционирования в сканирующей зондовой микроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 9. С. 33–36.
22. Luque A. Operation of the intermediate band solar cell under non-ideal space charge region conditions and half filling of the intermediate band / A. Luque, A. Marti, N. Lopez, E. Antolin, E. Canovas // Journal of Applied Physics. 2006. Vol. 99. P. 094503.
23. Luque A., Marti A. Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels // Physical Review Letters. 1997. Vol. 78. P. 5014–5017.
24. Чеботарев С. Н., Пашенко А. С., Лунина М. Л. Моделирование зависимостей функциональных характеристик кремниевых солнечных элементов, полученных методом ионно-лучевого осаждения, от толщины и уровня легирования фронтального слоя // Наука Юга России. 2011. Т. 7. № 4. С. 25–30.