

УДК 621.383.46

**Чеботарев Сергей Николаевич, Яценко Алексей Николаевич,
Лозовский Владимир Николаевич, Попов Виктор Павлович,
Середина Полина Борисовна, Гончарова Лидия Михайловна**

ГЕРМАНИЕВЫЕ СЛОИ НА КРЕМНИИ, ПОЛУЧЕННЫЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ ИЗ ДИСКРЕТНОГО ЖИДКОФАЗНОГО ИСТОЧНИКА

Исследованы особенности получения тонкопленочных Si/Ge гетероструктур большой площади методом термической кристаллизации из дискретного жидкофазного источника через тонкую вакуумную зону. Определены условия получения однородных по толщине слоев. Установлена температурная зависимость структурного совершенства германиевых слоев на кремниевых подложках и выявлены оптимальные технологические условия ростового процесса.

Ключевые слова: кремний-германиевые гетероструктуры, термическая кристаллизация, дискретный источник.

**Sergei Chebotarev, Alexey Yatsenko, Vladimir Lozovskii,
Viktor Popov, Polina Seredina, Lidiya Goncharova**

GERMANIUM LAYERS ON SILICON PRODUCED BY THERMAL CRYSTALLIZATION FROM A DISCRETE LIQUID SOURCE

Features of a method of thermal crystallization from a discrete liquid source through a little vacuum zone to produce thin film Ge/Si heterostructures onto large substrates were investigated. It is established the obtaining conditions for growing of homogeneous in thickness layers. The temperature dependence of structural perfection of germanium layers on silicon substrates and the optimal technological conditions were found.

Key words: germanium-silicon heterostructures, thermal crystallization, discrete source.

Введение / Introduction. Современная оптоэлектроника использует прямозонные материалы АПБВ с высокой по отношению к кремнию подвижностью носителей заряда [1]. Широкое распространение получили многокомпонентные гетероструктуры [2] и наноструктуры с квантовыми точками [3]. Однако технология изготовления таких оптоэлектронных устройств не может быть сопряжена с традиционным массовым производством комплементарных кремниевых МОП-устройств [4]. Наибольшими перспективами создания так называемой кремний-германиевой оптоэлектроники обладает гетеросистема Ge/Si [5]. В некоторых случаях пара Ge/Si проявляет псевдопрямозонные свойства и может быть в перспективе весьма хорошо совместима с кремниевой промышленностью [6]. На основе гетеросистемы Ge/Si в принципе возможна реализация фотодетекторов, модуляторов и лазеров [7]. Кроме того, технология получения твердых растворов Ge/Si хорошо совместима с монокристаллической кремниевой технологией [8].

Значительный прогресс в технологии формирования эпитаксиальных слоев германия на кремнии достигнут с использованием метода молекулярно-лучевой эпитаксии [9]. Данный технологический метод позволяет выращивать гетероструктуры заданного состава и толщины, но имеет ряд недостатков, среди которых следует отметить необходимость поддержания в рабочей камере глубокого вакуума и практическую невозможность получения равномерных по толщине гетероструктур на пластинах большого диаметра [10]. В связи с этим актуальными представляются разработки, которые в некоторой степени будут свободны от обозначенных недостатков молекулярно-лучевой эпитаксии. Одним из таких перспективных методов является термическая кристаллизация из дискретного жидкофазного источника через тонкую вакуумную зону, которая является модификацией

метода зонной сублимационной перекристаллизации [11]. Некоторые характерные особенности и преимущества этого метода на примере различных материалов и геометрии ростовой зоны изложены в работе [12]. Цель данной статьи состоит в анализе массопереноса при термической кристаллизации из дискретного жидкофазного источника, а также изучению структурных свойств германиевых слоев, выращенных на кремниевых подложках.

Моделирование массопереноса из дискретного источника. Метод термической кристаллизации из дискретного источника характеризуется использованием плоскопараллельных источника ростового вещества и подложки, разделенных тонкой вакуумной зоной толщиной l . Схема рассматриваемого метода показана на рисунке 1. Значение толщины l должно удовлетворять критериям:

$$l \ll D, l \ll \lambda, \quad (1)$$

здесь λ – длина пробега атомов внутри ростовой зоны.

Как показано в работе [13], данное условие указывает на значительное улучшение так называемого «эффективного вакуума» в ростовой зоне. Предложенная конфигурация ростовой ячейки также позволяет снизить уровень парциального давления примесей остаточных газов за счет их адсорбции на весьма узких периферийных областях. Обозначенные особенности предложенного ростового метода усиливаются при увеличении диаметра источника и подложки.

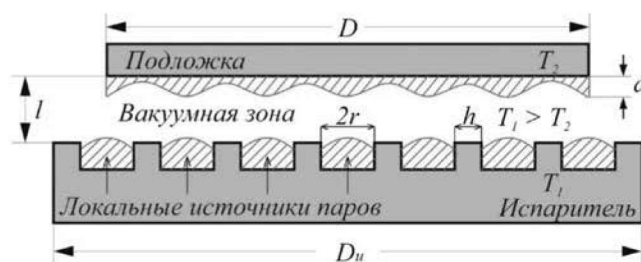


Рис. 1. Схема процесса термической кристаллизации из дискретного жидкофазного источника

Использование дискретного источника приводит в общем случае к модулированию толщины формируемого слоя, которое заключается в некотором повторении слоев геометрических особенностей источника ростового вещества. В этом случае массоперенос характеризуется распределением толщины слоя на подложке $d(x,y)$, где координаты x и y определяют выбранный участок подложки. Значение $d(x,y)$ определяется геометрическими параметрами дискретного источника и технологическими условиями процесса роста. К ним относятся: температура источника T_1 и подложки T_2 ; радиус r и форма локальных испарителей, их взаимное расположение и толщина перегородок h ; толщина вакуумной зоны l .

Введем понятие коэффициента заполнения γ , показывающего отношение площади локальных испарителей к площади дискретного источника. Коэффициент заполнения γ служит количественным параметром, отражающим снижение интенсивности потока ростового материала при замене сплошного источника на дискретный.

Оценим значение параметра γ для испарителей различной формы и степени упорядоченности. Расчет показывает, что коэффициент заполнения для квадратных локальных источников с длиной ребра r , упорядоченных в виде квадратной сетки с толщиной перегородки h , равен

$$\gamma_1 = \frac{4r^2}{(2r+h)^2}.$$

Для дискретного источника с квадратной сеткой с шагом h , но круглыми источниками радиуса r этот коэффициент будет равен

$$\gamma_3 = \frac{\pi r^2}{(2r + h)^2}.$$

При гексагональном упорядочивании круглых локальных источников коэффициент можно найти из выражения

$$\gamma_2 = \frac{2\pi r^2}{\sqrt{3}(2r + h)^2}.$$

Коэффициент заполнения снижается в следующем порядке $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$. Отметим, что изготовление квадратных локальных испарителей является весьма трудоемкой инженерной задачей. При этом компенсация потерь для круглых испарителей достигается за счет использования гексагональной сетки и повышения температуры проведения ростового процесса.

Математическое описание массопереноса, происходящего в вакуумной зоне, проводится на основе того, что дискретный источник представляет собой совокупность одинаковых и закономерно расположенных локальных источников правильной геометрической формы, испарение от которых происходит по одинаковым законам и с одной и той же интенсивностью. Следовательно, зная уравнение, описывающее результат испарения от одного локального источника, можно получить уравнение, описывающее результат испарения от всего дискретного источника.

Распределение толщины слоя для одного локального источника определяется выражением [14]

$$d = v_{исп} \cdot t \cdot \frac{1}{2} \left[1 - \frac{l^2 + \rho^2 - r^2}{\sqrt{(l^2 + \rho^2 + r^2)^2 + (2\rho l)^2}} \right], \quad (2)$$

где $v_{исп}$ – скорость испарения из жидкофазного источника, t – время проведения процесса, ρ – радиус-вектор, определяющий положение испарителя. При анализе особенностей массопереноса из дискретного источника удобнее пользоваться не самой величиной d , а ее безразмерным аналогом ω [15]:

$$\omega = \frac{d}{j \cdot t} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{l^2 + \rho^2 - r^2}{\sqrt{(l^2 + \rho^2 + r^2)^2 + (2\rho l)^2}} \right]. \quad (3)$$

Параметр ω имеет физический смысл вероятности конденсации испарившегося атома на подложку в некоторую точку подложки. Суммируя вероятности ω по всем локальным испарителям, получим следующее выражение:

$$\omega(x) = \omega(\rho_0) + \sum_{n=1}^k \sum_{m=0}^{n-1} \sum_{z=0}^5 \omega(\rho_i), \quad (4)$$

где

$$\rho_i = x^2 + L^2(n^2 - nm + m^2) - 2xL\sqrt{n^2 - nm + m^2} \cos \left(\arctg \left(\frac{\sqrt{3}m}{2n - m} \right) + z \frac{\pi}{3} - \varphi \right), \quad \rho_0 = x.$$

Рассмотрим гексагональную систему, показанную на рис. 2. Некоторый i -ый локальный испаритель характеризуется координатами n , m и z . Параметр n задает номер гексагона, z определяет номер ребра, m задает порядковый номер испарителя на ребре. Величина коэффициента k зависит от диаметра всего дискретного источника. Например, для гексагона, представленного на рис. 2, значение коэффициента равно трем ($k = 3$). Локальный испаритель, расположенный в центре дискретного источника, задается параметром $\omega(\rho_0)$.

Количественным параметром неоднородности слоя может служить коэффициент δ , зависящий от соотношения минимальной толщины слоя d_{min} и максимальной толщины d_{max} :

$$\delta = 1 - \frac{d_{min}}{d_{max}}. \quad (5)$$

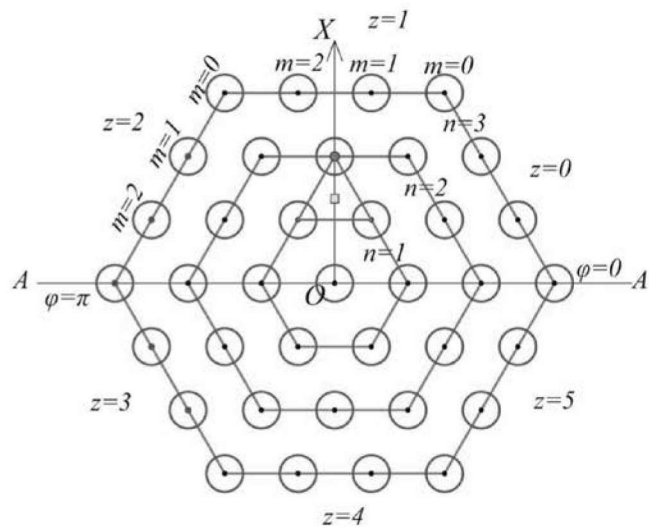
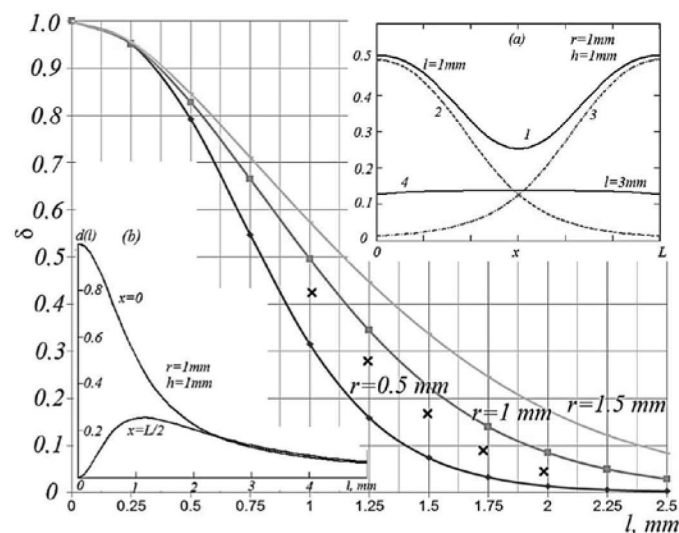


Рис. 2. Гексагональная система локальных испарителей

Рис. 3 отражает результаты расчетов коэффициента неоднородности δ от для различных локальных испарителей, структурированных в гексагональной симметрии. Крестиками показаны экспериментальные данные для дискретного источника с размерами локальных испарителей $r = 1$ мм.

Рис. 3а демонстрирует переход от неоднородной к равномерной толщине выращиваемого слоя при увеличении зазора между источником и подложкой. На рис. 3б показано, что при размерах ростовой зоны больше $l > 2,5$ мм коэффициент неоднородности δ будет меньше 0,03.

Рис.3. Зависимость коэффициента неоднородности слоя от толщины ростовой зоны l при различных радиусах источников r

При этом для толщин ростовой зоны менее 0,1 мм неоднородность становится практически максимальной, достигая единицы. Очевидно, что в этом случае толщина выращиваемого слоя репродуцирует геометрии дискретного жидкофазного источника. Видно, что проведенный эксперимент показал весьма хорошее согласование с теорией. Однако следует отметить, что экспериментальное значение неоднородности слоя $\delta_{\text{эксп}}$ меньше рассчитанных $\delta_{\text{теор}}$. Данная особенность определяется, по-видимому,

следующими факторами. Во-первых, жидкая фаза за счет сил поверхностного натяжения имела вместо плоской сферическую поверхность, принимавшуюся при проведении расчетов. Во-вторых, в теории не учитывалась поверхностная диффузия, приводящая к выравниванию неоднородности толщины слоя.

Методика выращивания и исследования германиевых эпитаксиальных слоев на кремниевой подложке. Для получения однородных по толщине германиевых слоев использованы следующие параметры дискретного источника: расстояние между соседними локальными источниками и их радиус составляют соответственно $h = 1,0$ мм и $r = 0,75$ мм. Указанным значениям соответствует коэффициент заполнения $\gamma \approx 0,33$. При выбранных значениях r и h приемлемой неоднородности толщины слоя $\delta = 5\%$ соответствует $l_{кр} = 2,1$ мм.

В качестве подложек использовались полированные пластины кремния, ориентированные по плоскости (100), диаметром $D = 100$ мм. Дополнительная очистка поверхности подложки достигалась сублимационным травлением в вакууме при температуре $T_2 = 1150$ °С. Ростовым веществом являлся порошок германия полупроводниковой чистоты. Максимальное давление паров испаряющегося германия не превышало 10^{-2} Па. Следовательно, условия (1) выполнялись достаточно хорошо ($1/R < 10^{-3}$, $1/\lambda \approx 10^{-4}$). Температура подложки T_2 варьировалась от 650 до 920 °С.

Тигль изготавливался из молибдена. Это позволило получать германиевые слои с достаточным пересыщением и оптимальной температурой подложки T_2 , что обеспечивало возможность получения гетероструктур высокого качества.

Выращенные образцы исследовали на атомно-силовом микроскопе Solver HV в полуконтактном режиме и на сканирующем электронном микроскопе Quanta 200 в режиме высокого вакуума.

Свойства *si/ge* гетероструктур. Отметим, что существенной методической особенностью используемого метода является температурная взаимосвязь источника ростового вещества T_1 и подложки T_2 . Увеличение температуры источника и соответственно скорости испарения роста слоя сопровождается повышением температуры подложки.

На рис. 4а–д представлены АСМ-изображения поверхности германиевых слоев, выращенных при разных температурах подложки T_2 .

При температуре подложки $T_2 = 600$ °С удалось добиться как низких скоростей роста, так и минимальной шероховатости поверхности ($Ra < 2$ нм), приближая полученные слои к эпитаксиальным. Необходимость поддержания низких скоростей процесса обусловлена требованием управляемости выращивания слоев заданной точности.

При низких температурах процесса ($T_2 = 550$ °С) управляемость процесса повышается, но наблюдается более развитая морфология поверхности, и шероховатость повышается до 3 нм. Повышение температуры процесса выше оптимального значения ($T_2 = 600$ °С) приводило к формированию развитого рельефа поверхности. При этом для высоких температур ($T_2 = 750$ °С) шероховатость поверхности возрастала значительно, достигая почти 30 нм.

Полученные изображения поперечного среза гетероструктуры Ge/Si приведены на рис. 4 (е–к). Видно, что дефектность слоев для температур подложки 550 °С и 600 °С весьма незначительна. Очевидно, что шероховатость поверхности и дефектность являются различными следствиями одно и того же явления – образования прорастающих на поверхность дислокаций несоответствия в объеме материала. В общем случае при температурах выше 600 °С наблюдалось увеличение степени дефектности слоев. Дефекты накапливались внутри слоя, концентрируясь внутри некоторых локальных образцов. Однако при температуре более 700 °С проявлялся эффект формирования прорезающей весь слой дислокации. При температурах выше 750 °С этот эффект становился доминирующим, что приводило к формированию выстроенных перпендикулярно поверхности подложки массивов дислокаций. Слой становился сильно дефектным, что отражалось на его поверхности. Шероховатость поверхности слоя германия на кремнии, выращенного в этих высокотемпературных условиях, превышала 27 нм, что на порядок превысило шероховатость слоев, выращенных при температурах подложки 550–600 °С. Обобщая данные атомно-силовой и электронной микроскопии можно сделать вывод, что слои при температурах 700–750 °С обладают значительной дефектностью, созданной в основном краевыми дислокациями несоответствия.

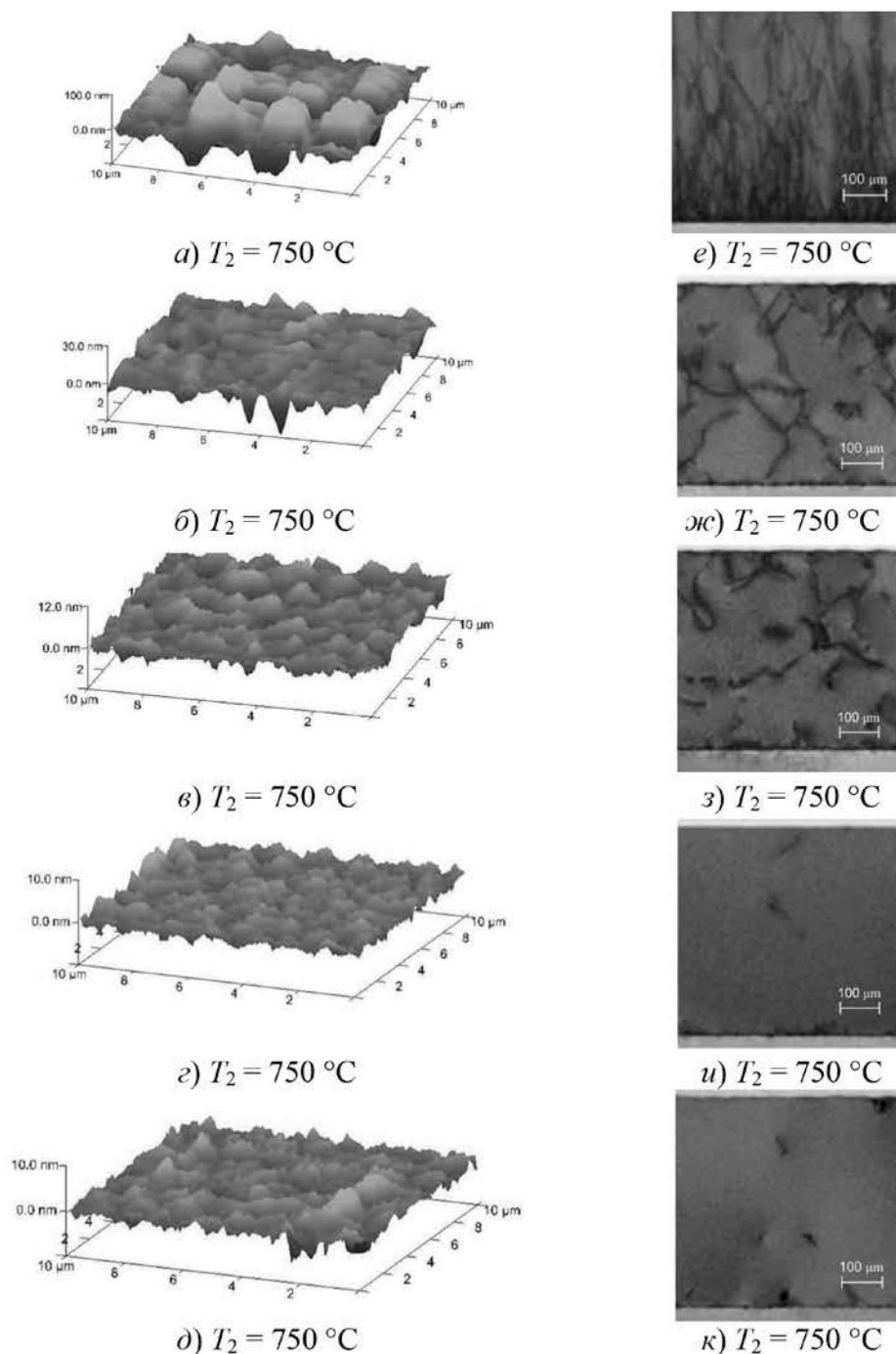


Рис. 4. АСМ-изображение поверхности (а–д) и СЭМ-изображения поперечного среза (е–к) тонкопленочных гетероструктур Ge/Si, выращенных при различных температурах подложки T_2

Таким образом, взаимодополняющими методами атомно-силовой и сканирующей электронной микроскопии продемонстрировано влияние температурных режимов процесса термической кристаллизации германия на кремнии из жидкофазного дискретного источника через вакуумную зону, проявляющееся в виде минимизации шероховатости поверхности и низкой плотности дислокаций в растущих слоях при температурах 600 °С.

Заклучение / Conclusion. В работе изучены особенности выращивания тонкопленочных гетероструктур Ge/Si методом термической кристаллизации из дискретного источника через вакуумную зону. Показано, что при низких температурах процесса ($T_2 = 550^\circ\text{C}$) управляемость процесса контролируемого наращивания слоя повышается, но наблюдается более развитая морфология поверхности с шероховатостью $Ra = 3$ нм. Установлено, что при оптимальной температуре подложки $T_2 = 600^\circ\text{C}$ удастся добиться контролируемых скоростей роста, низкой плотности дислокаций несоответствия и минимизировать шероховатость поверхности до $Ra = 1,8$ нм, приближая полученные слои к эпитаксиальным. Повышение температуры процесса выше оптимального значения приводит к формированию развитого рельефа поверхности с $Ra > 30$ нм и образованию дислокаций несоответствия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбальченко Д. В. Оптимизация структурных и ростовых параметров метаморфных InGaAs-фотопреобразователей, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии / Д. В. Рыбальченко, С. А. Минтаиров, Р. А. Салий, Н. Х. Тимошина, М. З. Шварц, Н. А. Калюжный // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 1. С. 94–100.
2. Никитина Е. В. Гетероструктуры GaAs/InGaAsN для многопереходных солнечных элементов / Е. В. Никитина, А. С. Гудовских, А. А. Лазаренко, Е. В. Пирогов, М. С. Соболев, К. С. Зеленцов, И. А. Морозов, А. Ю. Егоров // Физика и техника полупроводников. 2016. Т. 50. № 5. С. 663–667.
3. Chebotarev S. N. Obtaining and doping of InAs-QD/GaAs(001) nanostructures by ion beam sputtering / S. N. Chebotarev, E. N. Zhivotova, G. A. Erimeev, A. S. Pashchenko, L. S. Lunin, M. L. Lunina // Beilstein Journal of Nanotechnology. 2017. Т. 8. № 1. С. 12–20.
4. Гуляев Ю. В., Ждан А. Г., Чучева Г. В. Новый подход к созданию устройств с энергонезависимой памятью на основе Si-МОП-транзисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2011. № 3(91). С. 3–5.
5. Nikiforov A. I., Timofeev V. F., Pchelyakov O. P. Surface structure of thin pseudomorphous GeSi layers // Applied Surface Science. 2015. Т. 354. С. 450–452.
6. Тимофеев В. А. Синтез эпитаксиальных пленок на базе материалов Ge-Si-Sn с гетеропереходами Ge/GeSn, Ge/GeSiSn, GeSn/GeSiSn / В. А. Тимофеев, А. П. Коханенко, А. И. Никифоров, В. И. Машанов, А. Р. Туктамышев, И. Д. Лошкарёв // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 7. С. 81–85.
7. 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.
8. Никифоров А. И. Формирование наногетероструктур Ge/Si и Ge/GexSi1-x/Si методом молекулярно-лучевой эпитаксии / А. И. Никифоров, В. А. Тимофеев, С. А. Тийс, О. П. Пчеляков // Автометрия. 2014. Т. 50. № 3. С. 5–12.
9. Крыжановская Н. В. Исследование структурных и оптических свойств слоев GaP(n), синтезированных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках Si(100) / Н. В. Крыжановская, Ю. С. Полубавкина, В. Н. Неведомский, Е. В. Никитина, А. А. Лазаренко, А. Ю. Егоров, М. В. Максимов, Э. И. Моисеев, А. Е. Жуков // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 2. С. 276–280.
10. Lozovskii V. N. Formation and use of positioning marks in scanning probe microscopy / V. N. Lozovskii, S. N. Chebotarev, V. A. Irkha, G. V. Valov // Technical Physics Letters. 2010. Vol. 36. № 8. С. 737–738.
11. 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.
12. 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.
13. Lozovskii V. N., Lozovskii S. N., Valov G. V. Sorption vacuumization of a growth cell during zone sublimation recrystallization // Technical Physics Letters. 2013. Vol. 39. № 2. Р. 175–178.
14. 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.
15. Лозгачев В. И. Распределение потоков молекул на плоскости при испарении в вакууме // Журнал технической физики. 1962. Т. 32. № 8. С. 1012–1022.

REFERENCES

1. Rybal'chenko D. V. Optimizatsiya strukturnykh i rostovykh parametrov metamorfnykh InGaAs-fotopreobrazovatelei, poluchennykh metodom MOS-gidridnoi epitaksii (Optimization of the structural parameters and growth of metamorphic InGaAs photoconverters obtained by the method of MOS-hydride epitaxy) / D. V. Rybal'chenko, S. A. Mintairov, R. A. Salii, N. Kh. Timoshina, M. Z. Shvarts, N. A. Kalyuzhnyi // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2017. T. 51. № 1. Pp. 94–100.
2. Nikitina E. V. Geterostruktury GaAs/InGaAsN dlya mnogoperekhodnykh solnechnykh elementov (Heterostructures of GaAs/InGaAsN for mnogoperekhodnyj solar cells) / E. V. Nikitina, A. S. Gudovskikh, A. A. Lazarenko, E. V. Pirogov, M. S. Sobolev, K. S. Zelentsov, I. A. Morozov, A. Yu. Egorov // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2016. T. 50. № 5. Pp. 663–667.
3. Chebotarev S. N. Obtaining and doping of InAs-QD/GaAs(001) nanostructures by ion beam sputtering / S. N. Chebotarev, E. N. Zhivotova, G. A. Erimeev, A. S. Pashchenko, L. S. Lunin, M. L. Lunina // Beilstein Journal of Nanotechnology. 2017. T. 8. № 1. Pp. 12–20.
4. Gulyaev Yu. V., Zhdan A. G., Chucheva G. V. Novyi podkhod k sozdaniyu ustroystv s energonezavisimoi pamyat'yu na osnove Si-MOP-tranzistorov (A new approach to the creation of devices with non-volatile memory based on Si-MOSFETs) // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2011. № 3(91). Pp. 3–5.
5. Nikiforov A. I., Timofeev V. F., Pchelyakov O. P. Surface structure of thin pseudomorphous GeSi layers // Applied Surface Science. 2015. T. 354. Pp. 450–452.
6. Timofeev V. A. Sintez epitaksial'nykh plenok na baze materialov Ge-Si-Sn s geteroperekhodami Ge/GeSn, Ge/GeSiSn, GeSn/GeSiSn (Synthesis of epitaxial films of materials of Ge-Si-Sn with heterojunctions Ge/GeSn, Ge/GeSiSn, GeSn/GeSiSn) / V. A. Timofeev, A. P. Kokhanenko, A. I. Nikiforov, V. I. Mashanov, A. R. Tuktamyshev, I. D. Loshkarev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika. 2015. T. 58. № 7. Pp. 81–85.
7. Lunin L. S. Ionno-luchevaya kristallizatsiya nanoklasteroev Ge na Si(001) (Ion-beam crystallization of Ge nanoclusters on Si(001)) / L. S. Lunin, S. N. Chebotarev, A. S. Pashchenko, M. L. Lunina // Nauka Yuga Rossii. 2012. T. 8. № 2. Pp. 9–12.
8. Nikiforov A. I. Formirovaniye nanogeterostruktur Ge/Si i Ge/GexSi1-x/Si metodom molekulyarno-luchevoi epitaksii (The formation of nanoheterostructures Si/Ge and Ge/GexSi1-x/Si by molecular beam epitaxy) / A. I. Nikiforov, V. A. Timofeev, S. A. Tiis, O. P. Pchelyakov // Avtometriya. 2014. T. 50. № 3. Pp. 5–12.
9. Kryzhanovskaya N. V. Issledovaniye strukturnykh i opticheskikh svoystv sloev GaP(n), sintezirovannykh metodom molekulyarno-puchkovoi epitaksii na podlozhkax Si(100) (The study of structural and optical properties of layers of GaP(n), synthesized by molecular beam epitaxy on Si(100) substrates) / N. V. Kryzhanovskaya, Yu. S. Polubavkina, V. N. Nevedomskii, E. V. Nikitina, A. A. Lazarenko, A. Yu. Egorov, M. V. Maksimov, E. I. Moiseev, A. E. Zhukov // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2017. T. 51. № 2. Pp. 276–280.
10. Lozovskii V. N. Formation and use of positioning marks in scanning probe microscopy / V. N. Lozovskii, S. N. Chebotarev, V. A. Irkha, G. V. Valov // Technical Physics Letters. 2010. Vol. 36. № 8. Pp. 737–738.
11. Lozovskii V. N., Lozovskii S. V., Chebotarev S. N. Issledovaniye kraevogo temperaturnogo effekta pri zonnnoi sublimatsionnoi perekristallizatsii (A study of the regional temperature effect in the zone sublimation recrystallization) // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2007. № 5. Pp. 52–56.
12. Lozovskii V. N. Osazhdeniye tugoplavkikh metallov na rel'efnye podlozhki metodom zonnnoi sublimatsionnoi perekristallizatsii (Deposition of refractory metals on the embossed substrate by the method of sublimation recrystallization) / V. N. Lozovskii, S. V. Lozovskii, S. N. Chebotarev, V. A. Irkha // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2007. № 4. Pp. 68–70.
13. Lozovskii V. N., Lozovskii S. N., Valov G. V. Sorption vacuumization of a growth cell during zone sublimation recrystallization // Technical Physics Letters. 2013. Vol. 9. № 2. Pp. 175–178.
14. Lozovskii V. N., Lozovskii S. V., Chebotarev S. N. Modelirovaniye massoperenosa primesei pri zonnnoi sublimatsionnoi perekristallizatsii v tsilindricheskoi rostovoi zone (Modeling of mass transfer of impurities during zone sublimation recrystallization in a cylindrical growth area) // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki, 2006. № 3. Pp. 60–63.
15. Lozgachev V. I. Raspredeleniye potokov molekul na ploskosti pri isparenii v vakuume (The distribution of molecules on a plane by evaporation in a vacuum) // Zhurnal tekhnicheskoi fiziki. 1962. T. 32. № 8. Pp. 1012–1022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Чеботарев Сергей Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физики и электроники ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова». E-mail: chebotarev.sergei@gmail.com
- Яценко Алексей Николаевич**, ассистент кафедры физики и электроники ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова». E-mail: alexyats-npi@yandex.ru.
- Лозовский Владимир Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики и электроники ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова». E-mail: loz_v_n@mail.ru.
- Попов Виктор Павлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики и электроники ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова». E-mail: popovnp@gmail.com
- Середина Полина Борисовна**, студентка кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова». E-mail: P1648@yandex.ru
- Гончарова Лидия Михайловна**, ассистент кафедры физики и электроники ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова». E-mail: io.goncharova@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

- Chebotarev Sergei Nikolaevich**, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of physics and electronics department, Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI). E-mail: chebotarev.sergei@gmail.com
- Yatsenko Alexey Nikolaevich**, teacher of physics and electronics department, Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI). E-mail: alexyats-npi@yandex.ru.
- Lozovskii Vladimir Nikolaevich**, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Professor of physics and electronics department, Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI). E-mail: loz_v_n@mail.ru.
- Popov Viktor Pavlovich**, Doctor of Science in Engineering, Professor, Professor of physics and electronics department, Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI). E-mail: popovnp@gmail.com.
- Seredina Polina Borisovna**, student of applied mathematics department, Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI). E-mail: P1648@yandex.ru
- Goncharova Lidiya Mikhailovna**, teacher of physics and electronics department, Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI). E-mail: io.goncharova@mail.ru