

1. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. — М.: Мир, 1982.
2. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл—полупроводник. — М.: Мир, 1975.
3. Булярский С. В., Ионычев В. К., Кузьмин В. В.// ФТП. 2003. Т. 37. ¹ 1. С. 117—120.
4. Булярский С. В., Грушко Н. С.// ЖЭТФ. 2000. Т. 118. ¹ 12. С. 1222—1228.
5. Ламберт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. — М.: Мир, 1979.
6. Карева Г. Г., Викслер М. И., Грехов И. В., Шулекин А. Ф.// ФТП. 2002. Т. 36. ¹ 8. С. 953—958.
7. Драпак С. И., Воробец М. О., Ковалюк З. Д.// Там же. 2005. Т. 39. ¹ 5. С. 633—635.
8. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 1984.
9. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. — М.: Высш. шк., 1987. — 480 с.

Статья поступила в редакцию 29 марта 2005 г.

Electrical properties and photosensitivity of the isotopic $n\text{-In}_2\text{Se}_3\text{-}n\text{-LnSe}$ hetero-contact

S. I. Drapak, Z. D. Kovalyuk

Institute of Materials Technology Problems, National Academy of Sciences of Ukraine,
Chernovtsy Section, Chernovtsy, Ukraine

Consideration is made to current transport mechanisms and to volt-farad performances of the photosensing radiation-hardened $n\text{-In}_2\text{Se}_3\text{-}n\text{-LnSe}$ hetero-contact, in which the area, depleted by charge majority carriers, is localized in the more low-resistance semiconductor, namely in the defect In_2Se_3 structure of α -modification. It is shown that the shape of relative quantum efficiency of photoconversion for explored structures depends from a width of the In_2Se_3 layer and from geometry of heterocontacts illumination.

УДК 621.315

Фотоэлектрические и шумовые характеристики $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ гетероструктур

А. В. Войцеховский, А. П. Коханенко, С. Н. Несмелов
СФТИ при ТГУ, г. Томск, Россия

С. И. Ляпунов
НПП "Матричные технологии", Москва, Россия

В. А. Юрьев
ИОФ РАН, Москва, Россия

Рассмотрены возможности оптимизации пороговых характеристик детекторов с внутренней фотоэмиссией на основе гетеропереходов $p^+\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}/p\text{-Si}$ при действии в спектральном диапазоне 8—12 мкм путем управления высотой потенциального барьера на гетерогранице. Приведены результаты экспериментальных исследований электрофизических и фотоэлектрических характеристик гетероструктур GeSi/Si , созданных с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии.

Эмиссионные фотодетекторы на основе гетеропереходов $p^+\text{-Ge}_x\text{Si}_{1-x}/p\text{-Si}$ (НП-детекторы) активно разрабатываются в течение последнего десятилетия [1—3]. Матрицы НП-детекторов на основе GeSi обладают высокой однородностью и относительно низкой стоимостью. По механизму действия НП-детекторы близки к эмиссионным детекторам на основе барьеров Шоттки. ИК-излучение поглощается свободными дырками в высоколегированном слое силицида германия. При

внутренней фотоэмиссии части фотодырок в Si в пленке GeSi остается избыточный отрицательный заряд, который считывается с помощью ПЗС или МОП-мультиплектора.

Важнейшим преимуществом НП-детекторов по сравнению с распространенными детекторами на основе барьеров Шоттки $\text{PtSi}/p\text{-Si}$ является более широкий спектральный диапазон fotocувствительности. Граничная длина волны (λ_c) НП-детекторов зависит от

состава германия и концентрации бора в пленке силицида германия и может изменяться в пределах 3—25 мкм. В настоящее время разработана концепция использования НИР-детекторов в диапазоне 3—5 мкм [4, 5], хотя отмечалась и перспективность использования таких детекторов в диапазоне 8—12 мкм [1]. Изменения λ_c НИР-детекторов предоставляет новые возможности для оптимизации характеристик приборов.

Цель данной работы — расчет пороговых характеристик НИР-детекторов на основе $p^+-Ge_xSi_{1-x}/p-Si$ при регистрации излучения от объектов с температурой около 300 К в спектральном диапазоне 8—12 мкм и установление оптимальных граничных длин волн при различных условиях регистрации излучения.

При расчете пороговых характеристик НИР-детекторов в диапазоне 8—12 мкм предполагалось, что объект излучает как абсолютно черное тело, используется $F/2$ оптическая система; коэффициенты пропускания атмосферы и входной оптической системы равны 1. При расчете использовались модель Фаулера для квантовой эффективности и значения коэффициента эмиссионной эффективности C_1 , типичные для однослойных ($0,2 \text{ эВ}^{-1}$) и многослойных ($1,4 \text{ эВ}^{-1}$) детекторов [1].

Для характеристики ИК-детекторов часто используют температуру T_{OF} , при которой темновой ток в детекторе равен фоновому фототоку. Для НИР-детекторов T_{OF} может быть найдена из уравнения

$$A^{**} T_{OF}^2 \exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c k T_{OF}}\right) = C_3 C_1 \sin^2 \theta \int_8^{\lambda_c} \frac{\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_F}\right) - 1\right)} d\lambda,$$

где A^{**} — эффективная постоянная Ричардсона;

q — заряд электрона;

k — постоянная Больцмана;

λ_c — граничная длина волны, мкм;

λ — рабочая длина волны, мкм;

θ — половинный апертурный угол;

T_F — температура фона;

$C_2 = 1,43 \cdot 10^4 \text{ мкм}^2/\text{К}$;

$C_3 = 37372 \text{ А} \cdot \text{мкм}^4 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}$.

Проведенные расчеты показали, что T_{OF} для НИР-детекторов при действии в спектральном диапазоне 8—12 мкм меньше 77 К и зависит от соотношения A^{**} и C_1 , а при анализе пороговых характеристик необходим учет дробовых шумов темнового тока и фонового фототока. В этом случае спектральная обнаружительная способность равна

$$D_{\lambda}^*(\lambda) = \frac{C_1 \cdot \lambda^2 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{2q \sqrt{A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c k T}\right) + C_3 C_1 \sin^2 \theta \int_8^{\lambda_c} \frac{\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_F}\right) - 1\right)} d\lambda}}$$

где T — температура фотоприемника.

В результате проведенных расчетов установлено, что зависимость $D_{\lambda}^*(\lambda_c)$ при заданной рабочей длине волны имеет максимум, положение которого определяется температурой и параметрами детектора. Рост D_{λ}^* при увеличении граничной длины волны определяется ростом квантовой эффективности, а уменьшение — увеличением темнового тока. Обнаружительная способность в спектральном диапазоне 8—12 мкм максимальна при малых рабочих длинах волн, что определяется спектральной зависимостью квантовой эффективности.

Пороговую разность температур (NETD) можно записать в следующем виде:

$$NETD = \frac{(4F^2+1) \sqrt{\frac{2q}{S \tau_{ac}} \left(A^{**} T^2 \exp\left(-\frac{1,24q}{\lambda_c k T}\right) + C_3 C_1 \sin^2 \theta \int_8^{\lambda_c} \frac{\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^3 \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_F}\right) - 1\right)} d\lambda \right)}}{\int_8^{\lambda_c} \frac{C_1 C_2 C_3 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c}\right)^2}{\lambda^4 T_F^2 \sqrt{2q} \left(\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_F}\right) - 1\right)} d\lambda}}$$

где $F = 1/2 \text{tg} \theta$;

τ_{ac} — время накопления сигнального заряда;

S — площадь детектора.

Зависимость пороговой разности температур от граничной длины волны НИР-детектора имеет минимум (рис. 1), положение которого зависит от параметров детектора и входной оптической системы, а также от температуры.

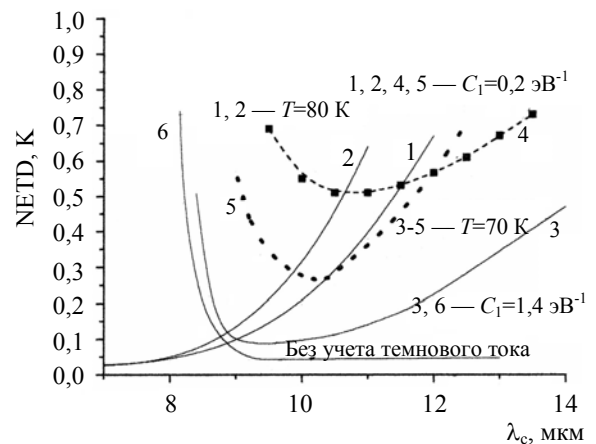


Рис. 1. Зависимости пороговой разности температур НИР-детектора от граничной длины волны при различных условиях регистрации излучения:

- 1 — детектирование во всем спектральном диапазоне;
 2 — детектирование в диапазоне 3—5 и 8—12 мкм;
 3—6 — детектирование в окне прозрачности 8—12 мкм

На рис. 1 для кривых 1, 2, 4, 5 имеем: $T_F = 300$ К; $A^{**} = 4,4$ А/(см²·К²); $F = 2$; $S = 9 \cdot 10^{-6}$ см²; для кривых 1—3, 5, 6: $t_n = 40$ мс (яма — $5 \cdot 10^7$ электронов); для кривой 4: $t_n = 10$ мс.

При заданной температуре минимальная пороговая разность температур конкретного НР-детектора будет реализована при определенной граничной длине волны. На рис. 2 приведены зависимости оптимальной граничной длины волны НР-детекторов от температуры, а также значения пороговой разности температур, достижимые в НР-детекторах при различных температурах в случаях оптимальной граничной длины волны. В [2] описан НР-детектор с граничной длиной волны 10,7 мкм, пороговая разность температур которого при температуре 43 К составляла 0,08 К. Из рис. 2 следует, что оптимальная граничная длина волны при 43 К — около 16 мкм, при которой значение NETD может быть улучшено более чем в два раза (до 0,03 К).

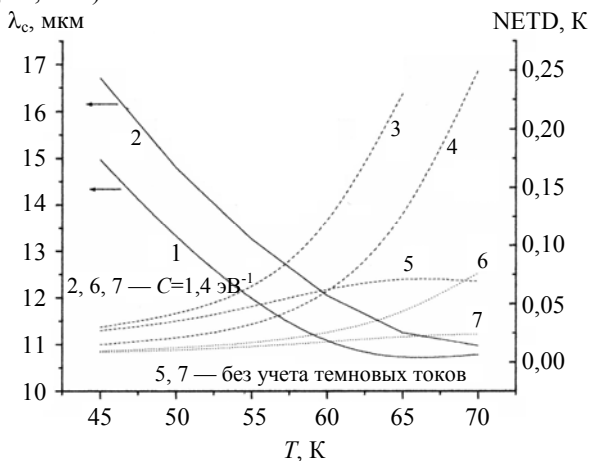


Рис. 2. Зависимости оптимальной граничной длины волны и соответствующего значения пороговой разности температур от температуры детектора

Кроме того, на рис. 2 для кривых 1, 3—5 имеем: $T_F = 300$ К; $A^{**} = 4,4$ А/(см²·К²); $S = 9 \cdot 10^{-6}$ см²; $F = 2$; $C_1 = 0,2$ эВ⁻¹; для кривых 1—3, 5—7 имеем: $t_n = 10$ мс; для кривой 4 — $t_n = 40$ мс.

Нами проведены экспериментальные исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик гетероструктур $p^+-\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/p\text{-Si}$, изготовленных в ИОФ РАН с помощью низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии. Толщины слоев GeSi составляли 15—20 нм, между подложкой и рабочим слоем силицида германия формировался тонкий (3 нм) переходный слой GeSi переменного состава, поверх этого слоя — тонкий слой кремния (3—5 нм). Измерения зависимости токов в диапазоне 10^{-11} — 1 А от температуры (130—300 К) и напряжения (+10 ÷ -10 В) проводили на установке. При измерении температурных зависимостей тока гетероструктуры

помещались в вакуумный криостат, контроль температуры проводили с помощью термпары медь—константан.

Измерения ВАХ при комнатной температуре позволили установить, что характеристики образцов различных серий значительно отличаются друг от друга, при этом характеристики образцов одной серии различаются незначительно. На рис. 3 приведены ВАХ гетероструктуры при 293 и 80 К, а также зависимости малосигнальной фотоЭДС на длине волны 0,91 мкм от напряжения на структуре при различных частотах модуляции светового потока. Из рис. 3 видно, что для исследованных гетероструктур типичен диодный вид ВАХ, фоточувствительность максимальна при обратных смещениях на гетеропереходе, хотя при малых прямых смещениях наблюдается слабый максимум фоточувствительности.

Зависимость тока насыщения от температуры для гетероструктуры с составом германия $x = 0,34$ показана на рис. 4. Температурные зависимости тока насыщения спрямляются в координатах графика Ричардсона. Для исследованных гетероструктур были определены высоты потенциальных барьеров, которые составили 0,19 и 0,36 эВ для гетероструктур различных серий. На вставке рис. 4 показаны прямые ветви ВАХ при различных температурах. Экспериментально установленные значения эффективной постоянной Ричардсона для данной гетероструктуры составили $0,04$ А/(см²·К²), что меньше типичных значений для одиночной гетероструктуры.

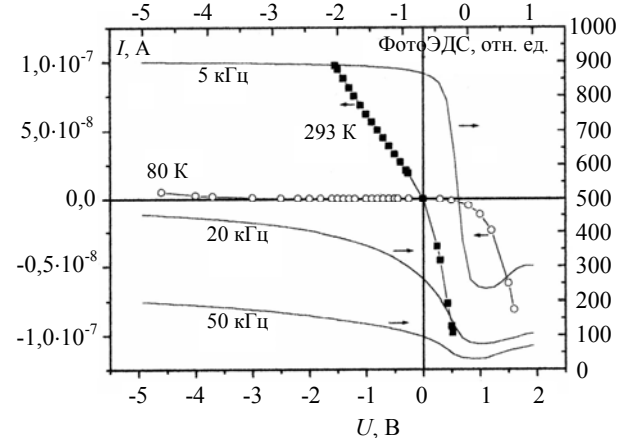


Рис. 3. ВАХ гетероструктур GeSi/Si и зависимости фотоЭДС от напряжения при разных частотах

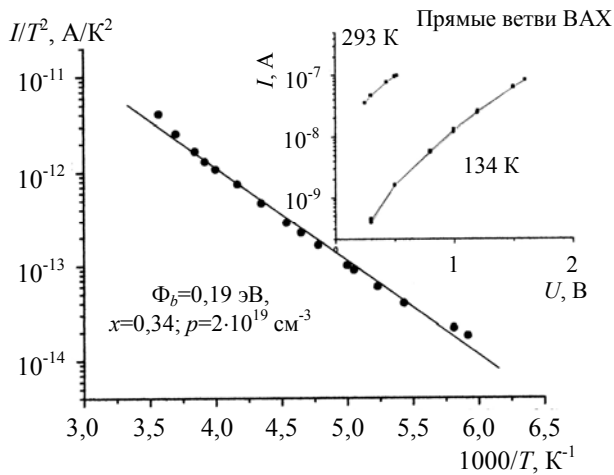


Рис. 4. График Ричардсона для гетероструктуры GeSi/Si

Измерения ВФХ позволили также определить высоты потенциальных барьеров, которые отличались от соответствующих значений, полученных из графиков Ричардсона, на величину, не превышающую 0,03 эВ.

Для проверки однородности свойств гетероструктур исследовались локальные свойства с помощью локального фотозондирования. Длина волны излучения составляла 0,91 мкм, частота модуляции 3 кГц.

На рис. 5 приведены распределения фотоЭДС по площади гетероструктуры, измеренные при -2 В (а) и 0 В (б) при сканировании поверхности структуры световым зондом диаметром 30 мкм. Фоточувствительность на длине волны 0,91 мкм обусловлена межзонным поглощением в кремнии и разделением фотоносителей на потенциальных барьерах.

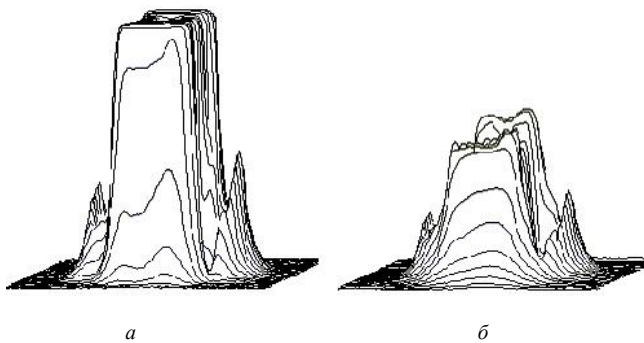


Рис. 5. Распределение фотоЭДС по площади гетероструктуры: а — при -2 В; б — при 0 В

Как следует из рис. 5, при 0 В распределение фотоЭДС по площади структуры неоднородно, наблюдаемые различия фоточувствительности в пределах слоя GeSi исчезают при подаче обратного смещения. Наиболее вероятно, что неоднородность свойств связана с топологией структуры: пики по краям обусловлены разделением носителей на барьере Шоттки вблизи контактов к гетероструктуре, центральный минимум, исчезающий при подаче запорного напряжения, соответствует разделению носителей на барьере GeSi/p-Si. Максимумы вблизи площадки GeSi/Si представляют

собой фотоЭДС диффузионных областей *n*-типа и охранный кольца. Максимум на зависимости фотоЭДС от напряжения при прямых смещениях обусловлен увеличением потенциального барьера второго гетероперехода многослойной структуры Si/GeSi, включенного противоположно барьерному гетеропереходу. Обнаружена фоточувствительность структур в спектральном диапазоне 3—5 мкм, которая уменьшается при увеличении длины волны.

Для исследованных гетероструктур на основании полученных экспериментальных данных были рассчитаны обнаружительные способности при работе в спектральном диапазоне 3—5 мкм при температуре объекта 300 К, *F*/2 входной оптике, рабочей температуре детектора 80 К и времени накопления 10 мс. При расчете использовались значения коэффициента эффективности эмиссии 0,2 эВ⁻¹.

Расчеты показали, что гетероструктуры с *x* = 0,34, имеющие при концентрации бора в силициде германия 2·10¹⁹ см⁻³ высоту барьера 0,19 эВ, позволяют создать детекторы для спектрального диапазона 3—5 мкм с обнаружительной способностью 5·10⁹ см·Гц^{0,5}/Вт — 2·10¹⁰ см·Гц^{0,5}/Вт и NETD 0,07—0,2 К при различных значениях эффективной постоянной Ричардсона.

Для работы в спектральном диапазоне 8—12 мкм необходимо обеспечить меньшие значения потенциальных барьеров, чего можно добиться уменьшением состава германия и увеличением концентрации бора в GeSi.

Выводы

1. Получены аналитические выражения для обнаружительной способности и пороговой разности температур НР-детекторов на основе Ge_{*x*}Si_{1-*x*}/Si. Рассчитаны оптимальные для формирования тепловых изображений в спектральном диапазоне 8—12 мкм граничные длины волн НР-детекторов при различных рабочих температурах и параметрах детекторов.

2. Проведены предварительные экспериментальные исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик GeSi/Si гетероструктур, созданных с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Определены высоты потенциальных барьеров, значения эффективных постоянных Ричардсона, исследованы распределения фотоЭДС по площади при локальном фотозондировании. Показано, что изготовленные гетероструктуры могут быть использованы для создания детекторов, действующих в спектральном диапазоне 3—5 мкм.

Л и т е р а т у р а

1. Park J. S., Lin T. L., Jones E. W., Del Castillo H. M.// Proc. SPIE. 1993. V. 2020. P. 12—21.
 2. Tsaour B. Y., Chen C. K., Marino S. A.// Optical Engineering. 1994. V. 33. № 1. P. 72—78.
 3. Strong R., Greve D. W., Misra R., Weeks M., Pellegrini P.// Thin Solid Films. 1997. V. 294. P. 343—346.

4. Presting H., Konle J., Hepp M., Kibbel H., Thonke K., Sauer R., Corbin E., Jaros M. // Optical Engineering. 2000. V. 39. № 10. P. 2624—2641.

5. Машанов В. И., Чистохин И. Б., Зайцев Б. А., Пчеляков О. П., Соколов Л. В., Тишковский Е. Г., Фомин Б. И., Черепов Е.

И. // Микроэлектроника. 1998. Т. 27. № 6. С. 412—418.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Photoelectric and noise properties of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ heterostructures

A. V. Voitsekhovskiy, A. P. Kokhanenko, S. N. Nesmelov
SPHTI at TSU, Tomsk, Russia

S. I. Lyapunov
"Matrix Technologies", Moscow, Russia

V. A. Yuryev
Institute of general physics Russian Academia Science, Moscow, Russia

The opportunities of optimization of the threshold performances of $p^+-\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/p\text{-Si}$ -detectors in spectral range $8\text{--}12\ \mu\text{m}$ by controlling of barrier height were considered. The photoelectric and noise properties of MBE GeSi/Si heterostructures were experimental investigation.

УДК 621.383

Эпитаксиальные, фоточувствительные гетеропереходы $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}(\text{In})/\text{PbSe}_{1-x}\text{S}_x$, полученные в сверхвысоком вакууме

Э. Ю. Салаев, А. М. Назаров, С. И. Гаджиева
Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

В квазиравновесных условиях, в едином технологическом цикле методом “горячей стенки” на подложках BaF_2 в сверхвысоком ($\leq 5 \cdot 10^{-7}$ Па) вакууме получены фоточувствительные изопериодические гетеропереходы (ГП) $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}(\text{In})/\text{PbSe}_{1-x}\text{S}_x$. В структурном отношении компоненты ГП представляют идеально согласованную для эпитаксии пару. Сняты вольт-амперные и спектральные характеристики ГП. Прямая ветвь ВАХ при малых смещениях подчиняется экспоненциальному закону $J = J_0 \exp(eU/\beta kT)$. При 77 К коэффициент β изменяется в интервале 1,5—2, что характерно для генерационно-рекомбинационного механизма протекания тока через область пространственного заряда. Максимальная фоточувствительность наблюдается при $\lambda_{\text{max}} = 12\ \mu\text{m}$. Увеличение температуры при изготовлении ГП приводит к смещению максимума фоточувствительности в коротковолновую область, что объясняется заметной диффузией олова из основного слоя в растущий слой, в результате чего ГП приобретает характеристики варизонной структуры.

В настоящее время эпитаксиальные пленки полупроводников типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ широко применяются при изготовлении различных приборов ИК-техники на область спектра 3—5 и 8—14 мкм. Полупроводниковая электронная техника требует получения совершенных эпитаксиальных пленок, свободных от различного рода нежелательных поверхностных состояний и структур со стабильными характеристиками. Интенсивное внедрение различных методов эпитаксиального выращивания позволило получить пленки с заданными электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами.

ми.

Так, наряду с методами жидкостной и молекулярно-лучевой эпитаксии, эпитаксиальные пленки полупроводников типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ и структуры на их основе были получены в камере с горячими стенками (ЭГС). Характерной особенностью метода ЭГС является то, что рост эпитаксиальных пленок с совершенной структурой и высокими значениями электрофизических параметров происходит в условиях, максимально близких к термодинамическому равновесию при минимальных потерях материала.