

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 621.315.592

**П. А. Бахтин, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий,
А. Ф. Кравченко, А. В. Латышев, Н. Н. Михайлов,
И. В. Сабина, Ю. Г. Сидоров, М. В. Якушев**

(Новосибирск)

**АНИЗОТРОПИЯ ПРОВОДИМОСТИ ПЛЕНОК $Cd_xHg_{1-x}Te$
С ПЕРИОДИЧЕСКИМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ ПОВЕРХНОСТИ,
ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ**

Исследован микрорельеф поверхности пленок КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), с помощью атомно-силовой микроскопии. На поверхности пленок, выращенных при повышенных температурах, обнаружен периодический микрорельеф в виде упорядоченной системы протяженных волн с характерным периодом 0,1–0,2 мкм. На таких пленках измерены угловые зависимости проводимости при 77 К и обнаружена анизотропия проводимости, при этом проводимость минимальна в направлении поперек волн микрорельефа. Наблюдается особенность спектра пропускания и изменение спектра пропускания после отжига пленок. Предполагается, что под склонами волн микрорельефа формируются стенки, растущие в направлении от подложки к поверхности. Такая структура может обуславливать наблюдаемую особенность спектра пропускания, если соседние стенки имеют разный состав. Изменение спектра пропускания после отжига объясняется диффузионным выравниванием состава в стенках. Анизотропия проводимости в пленках с периодическим микрорельефом может быть обусловлена барьерами между стенками или анизотропией подвижности.

Введение. Твердый раствор $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) является основным материалом для изготовления фотоприемников инфракрасного диапазона. Для выращивания пленок КРТ большой площади применяется метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), который позволяет использовать альтернативные подложки, такие, как GaAs и Si. В методе МЛЭ выращивание происходит при наиболее низких (180–200 °С) по сравнению с другими методами температурах и формирование микрорельефа растущей поверхности сложным образом зависит от условий выращивания: температуры и скорости роста, давления паров ртути, ориентации и материала подложки. Появление микрорельефа на начальных стадиях роста может привести к формированию неоднородностей в объеме, которые будут оказывать влияние на электрофизические параметры выращиваемых структур. На пленках КРТ, выращенных методом МЛЭ при повышенных температурах (≈ 210 °С), были обнаружены

анизотропия проводимости, особенности в спектре пропускания и периодический микрорельеф поверхности.

Цель данной работы – нахождение корреляции между электрофизическими свойствами пленок КРТ МЛЭ и микрорельефом поверхности.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Исследовались пленки КРТ, выращенные методом МЛЭ [1] на подложках GaAs(013) диаметром 50,8 мм. Подложки имели базовый срез по ориентации (011) длиной около 14 мм на расстоянии 1,2 мм от края пластины. На подложках выращивались буферные слои CdTe толщиной 5–7 мкм, а затем пленки КРТ состава $x = 0,21-0,24$ толщиной 8–12 мкм. Изучение поверхности пленок с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) дало следующие результаты. Микрорельеф поверхности пленок, выращенных при температурах 180–200 °С, представлен на рис. 1. Видно, что он пологий и нерегулярный. При повыше-

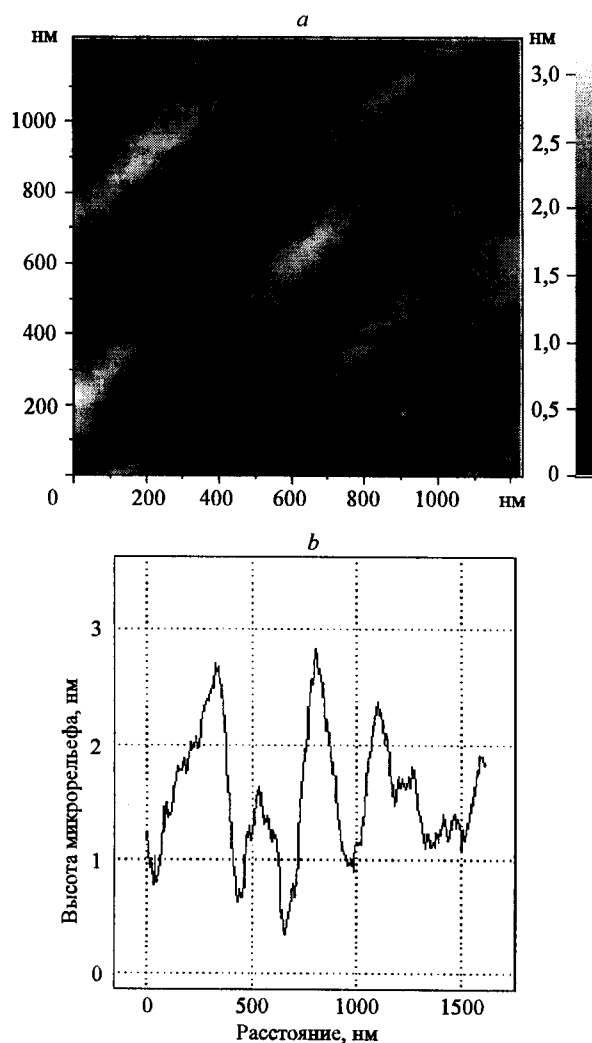


Рис. 1. Изображение поверхности пленки без периодического микрорельефа, полученное с помощью атомно-силового микроскопа (а), и профиль рельефа по высоте (б)

нии температуры выращивания (до 210 °С) на поверхности, помимо пологих неровностей, образуется система упорядоченных волн, как показано на рис. 2. Характерный период этого микрорельефа составляет 0,1–0,2 мкм, а угол наклона склонов волн достигает 5–7°. Направление волн относительно базового среза подложки одинаково по всей площади пленки и для разных пленок составляет угол 45–60° относительно перпендикуляра к базовому срезу (угол ϕ на рис. 3, *b*). Отметим, что периодический микрорельеф поверхности наблюдался при изучении других несогласованных гетеросистем, например, $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x/\text{Ge}(111)$ [2], SiGe/Si [3] и $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ [4]. При этом указывалось, что такой микрорельеф поверхности может обуславливать анизотропию транспортных и оптических свойств гетероструктур.

В пленках КРТ, имеющих периодический микрорельеф поверхности, обнаружена анизотропия проводимости (коэффициент анизотропии порядка

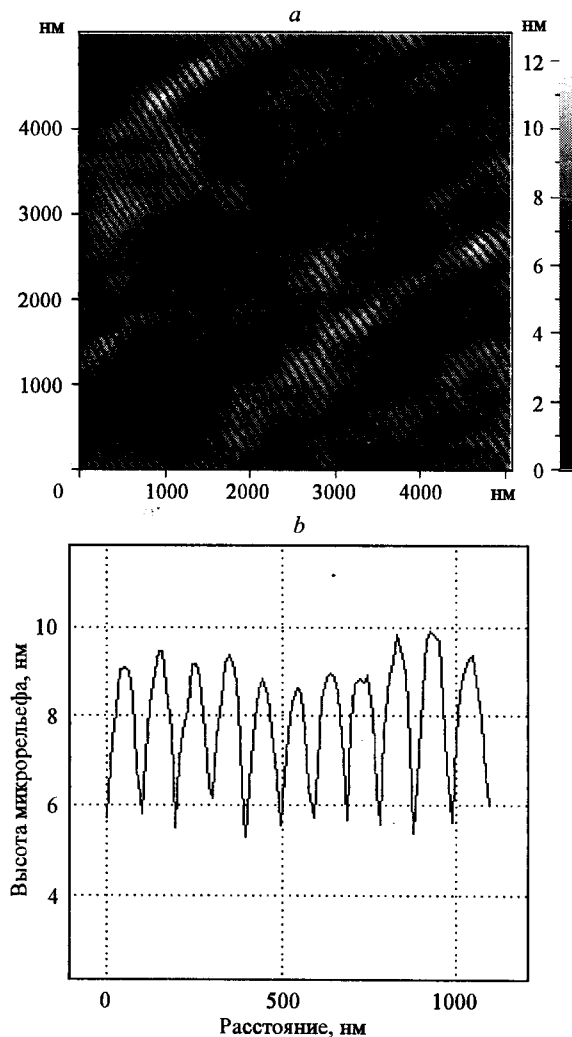


Рис. 2. Изображение поверхности пленки с периодическим микрорельефом, полученное с помощью атомно-силового микроскопа, (а) и профиль рельефа по высоте (б)

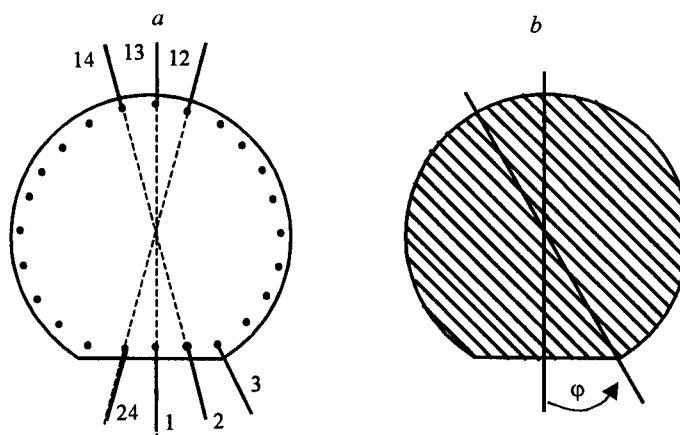


Рис. 3. Схематическое расположение контактов (а), направление волн микрорельефа на поверхности и угол измерений (б)

10 при $T = 77$ К). Для того чтобы выяснить, связана ли анизотропия с наличием периодического микрорельефа или же обуславливается градиентом проводимости по площади, были проведены измерения угловой зависимости проводимости по следующей методике.

На поверхность пленок с помощью индия припаивались 24 контакта по окружности пленки через 15° друг от друга, как схематически показано на рис. 3, а. Угловые зависимости проводимости пленки КРТ вдоль диаметра пластины (σ_d) и по периметру (σ_n) определялись четырехзондовым методом:

1. Ток пропускаться через диаметрально противоположные контакты (см. рис. 3, а, 1–13 и др.), а напряжение измерялось между соседними с токовыми диаметрально противоположными контактами (24–12 и 2–14) и усреднялось. В этом случае величина, обратно пропорциональная напряжению, характеризует проводимость пленки вдоль диаметра (σ_d). Углом измерения считался угол между перпендикуляром к базовому срезу и направлением тока, как показано на рис. 3, б. Направление тока менялось с шагом 15° в соответствии с распайкой.

2. Проводимость по периметру пластины определялась с использованием четырех соседних контактов. Для этого по крайним из них (24–3) пропускаться ток, а напряжение измерялось на средних (потенциальных) контактах (1–2). В этом случае величина, обратно пропорциональная напряжению, характеризует проводимость пленки вблизи потенциальных контактов (σ_n). Углом измерения в этом случае считался угол между перпендикуляром к базовому срезу и радиусом, проходящим посередине между потенциальными контактами.

Каждое измерение проводилось при пропускании тока в прямом и обратном направлении, при этом не было замечено зависимости величины измеряемых напряжений от полярности тока.

На пленках КРТ, не имеющих периодического рельефа, наблюдаются незначительные и не периодичные угловые зависимости проводимости. А в пленках, имеющих периодический микрорельеф, наблюдается сильная анизотропия проводимости. На рис. 4 приведены типичные угловые зависимости проводимости σ_d и σ_n для таких пленок. Видно, что обе зависимости пе-

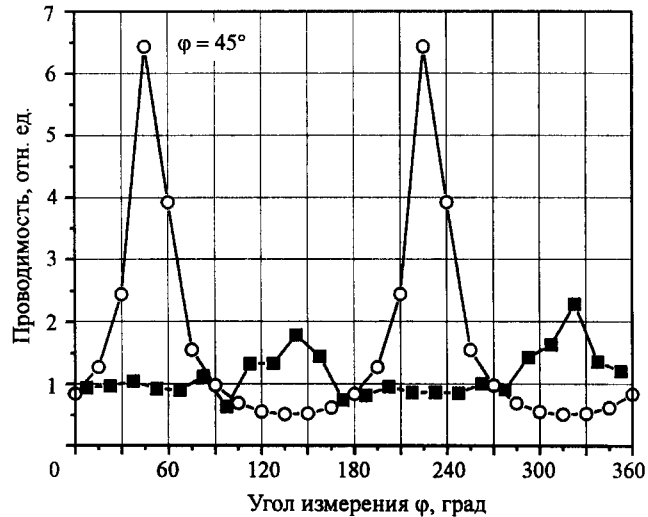


Рис. 4. Угловые зависимости проводимости вдоль диаметра пластины σ_d (о) и проводимости по периметру пластины σ_p (■). Образец № 411

риодичны (период 180°). Некоторый разброс значений при измерении проводимости по периметру образца обусловлен разбросом в геометрическом расположении контактов относительно друг друга и края пленки.

Направление, в котором проводимость вдоль диаметра пластины σ_d максимальна, совпадает с направлением вдоль волн микрорельефа и в разных пленках составляет угол в диапазоне $45-60^\circ$ относительно перпендикуляра к базовому срезу. Угловая зависимость проводимости по периметру σ_p имеет два достаточно выраженных максимума проводимости в тех местах периметра, где при измерениях ток направлен вдоль волн микрорельефа. Подобные угловые зависимости проводимости наблюдаются также на образцах меньшего размера, вырезанных из произвольного места анизотропной пластины. Отметим также, что наблюдаемые угловые зависимости не могут определяться градиентом или неоднородностью проводимости по площади пленки по следующим причинам. Если предположить наличие градиента проводимости на угловой зависимости σ_p , то наблюдались бы только один минимум и один максимум. А если предположить, что в местах максимумов σ_p имеются области с большей проводимостью, то при измерении проводимости по диаметру между этими областями мы получили бы максимальную проводимость, а не минимальную, как в эксперименте (см. рис. 4).

Совокупность полученных результатов позволяет заключить, что анизотропия проводимости обусловлена различием проводимости по направлениям вдоль и поперек волн микрорельефа. Поскольку толщина пленок (≈ 10 мкм) существенно больше высоты периодического микрорельефа (≈ 4 нм), то сам по себе микрорельеф не может быть причиной сильной анизотропии проводимости. Поэтому можно предположить, что под склонами волн микрорельефа сформированы стенки, растущие от подложки к поверхности, как показано на рис. 5. Наблюдаемые угловые зависимости проводимости могут быть обусловлены различием проводимости вдоль и поперек стенок, причем в направлении поперек стенок проводимость будет меньше из-за рассеяния на периодически изменяющемся потенциале или наличия

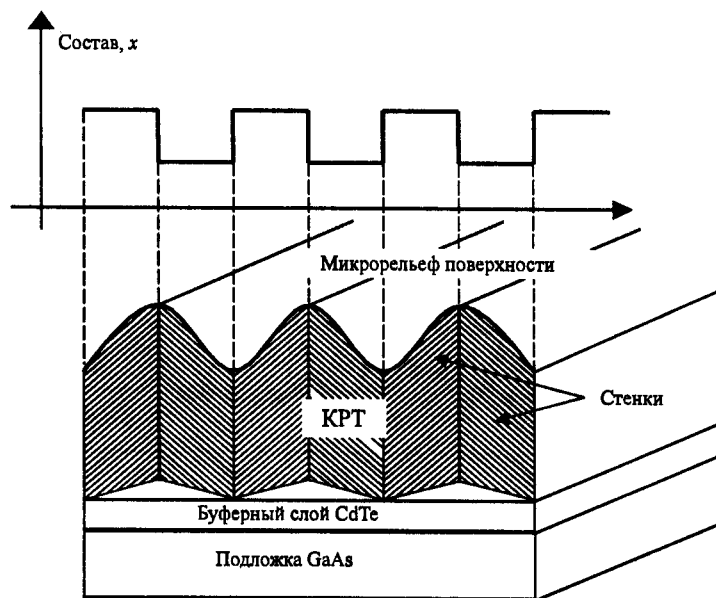


Рис. 5. Схематический разрез структуры и распределение состава в направлении поперек полос микрорельефа

барьеров между стенками (например, $p-n$ ($n^+ - n^-$)-переходы, если стенки имеют различную концентрацию носителей).

Можно предположить следующий механизм формирования стенок. При повышенных температурах на поверхности растущей пленки КРТ на начальной стадии возникает периодический микрорельеф. Дальнейший рост пленки на противоположных склонах волн микрорельефа будет зависеть от ориентации поверхности склонов, так как состав твердого раствора КРТ может зависеть от ориентации поверхности, на которой происходит рост. Таким образом, на противоположных склонах волн будут расти стенки разного состава. Как показано в работе [5], концентрация антиструктурного теллура в пленках КРТ, выращенных методом МЛЭ, определяется кинетикой процесса кристаллизации. Поскольку ориентация поверхности противоположных склонов волн микрорельефа различна, то стенки будут формироваться также с разной концентрацией антиструктурного теллура, который является в КРТ донором. При этом в соседних стенках будет разная концентрация носителей заряда. Как колебания состава, так и колебания концентрации доноров приведут к периодическому изменению потенциала в объеме пленки, на котором возможно рассеяние носителей заряда.

В пользу предположения о существовании вертикальных стенок, имеющих толщину, сравнимую с периодом микрорельефа, и наличии при этом разности состава в соседних стенках свидетельствуют следующие экспериментальные факты. Особенностью пленок с периодическим микрорельефом является более пологая спектральная зависимость коэффициента пропускания в области края собственного поглощения по сравнению с пленками без периодического микрорельефа при одинаковой толщине и близких составах. Отжиг пленок, имеющих периодический микрорельеф, при температуре 220–240 °С и времени отжига несколько десятков часов приводит к сдвигу края собственного поглощения в коротковолновую сторону и к увеличению

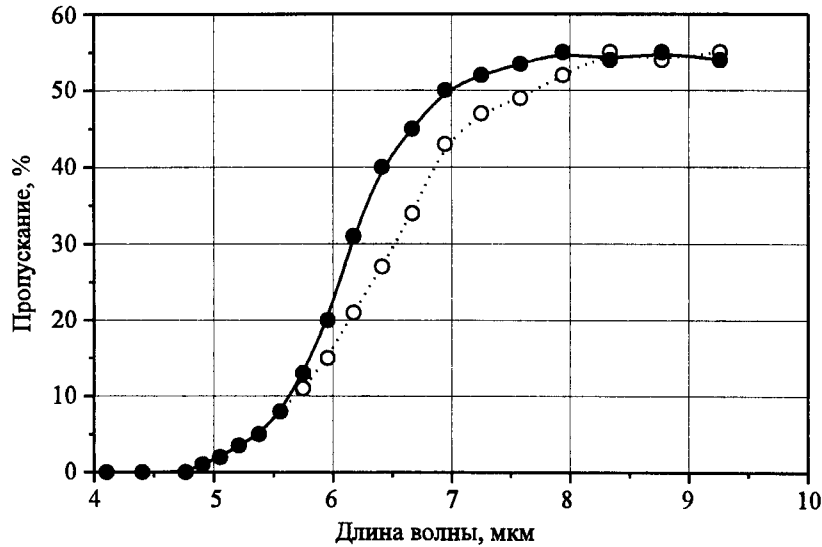


Рис. 6. Зависимость коэффициента пропускания света (при 300 К) от длины волны для образца № 411 после роста пленки (o) и после ее отжига (●)

крутизны спектральной зависимости. А отжиг пленок, не имеющих периодического микрорельефа, в указанных режимах не изменяет спектральной зависимости коэффициента пропускания. На рис. 6 показаны спектры пропускания для образца № 411 после роста и после отжига при температуре 240 °С и времени 32 ч. Последующий отжиг при этой же температуре и времени 30 ч не привел к дальнейшему изменению спектра пропускания. Оценка изменения состава пленки по изменению спектра пропускания дает величину $\Delta x \approx 0,03$ (состав после роста $-x = 0,22$, состав после отжига $-x = 0,25$).

Для КРТ коэффициент поглощения α в области края собственного поглощения таков, что величина $1/\alpha$ сравнима с толщиной изучаемых пленок (~10 мкм). В этом случае крутизна спектральной зависимости пропускания существенно зависит от толщины пленки (возрастает с увеличением толщины). На вид спектральной зависимости пропускания пленки может также существенным образом влиять присутствие микрообластей другого состава. При этом спектральная зависимость пропускания будет такой же, как у эквивалентной структуры в виде двух слоев с разным составом, и крутизна спектральной зависимости будет меньше, чем для однородной пленки. Если при отжиге происходит диффузионное выравнивание состава, то край пропускания должен сдвигаться в коротковолновую область и должна возрастать крутизна спектральной зависимости. Для этого размер микрообластей другого состава должен быть таким, чтобы при отжиге могло произойти выравнивание состава.

Для оценки размеров таких микрообластей рассчитаны зависимости диффузионных профилей состава от времени при температуре отжига 240 °С для следующей модели. Рассматривалась диффузия между двумя стенками, имеющими разный состав и одинаковую толщину.

Для расчета использовался усредненный коэффициент взаимодиффузии из работы [6], который для состава $x = 0,235$ имеет значение $4 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. На рис. 7 показаны рассчитанные диффузионные распределения состава по

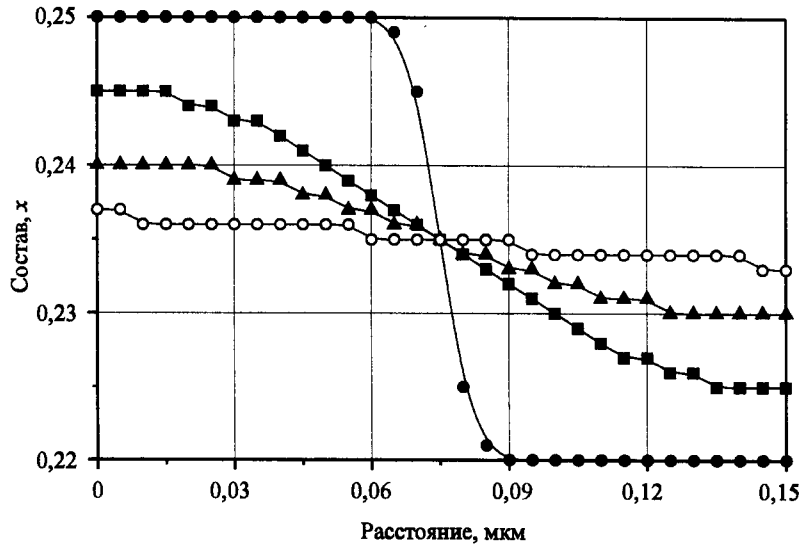


Рис. 7. Диффузионное распределение состава по толщине стенок для разных времен отжига (● – 6 мин, ■ – 10 ч, ▲ – 20 ч, ○ – 40 ч) при температуре отжига 240 °С

толщине стенок. Начальные составы стенок $x = 0,22$ и $0,25$, а толщина стенок $0,075$ мкм (половина среднего периода микрорельефа). Видно, что для диффузионного выравнивания состава в таких стенках достаточно времени отжига около 40 ч. Расчет для толщины стенок на порядок большей ($0,75$ мкм) показал, что за 40 ч отжига выравнивания состава практически не происходит. Таким образом, наблюдаемое изменение спектра пропускания пленок с периодическим микрорельефом можно объяснить наличием микрообластей другого состава размерами порядка $0,1$ мкм, которыми могут быть предполагаемые стенки под склонами волн микрорельефа. Измерения вольт-амперных зависимостей проводимости по диаметру пластины в направлениях максимума и минимума проводимости показали слабую нелинейность в диапазоне токов 10^{-5} – 10^{-2} А.

Закключение. С помощью атомно-силовой микроскопии на пленках КРТ, выращенных при повышенных температурах на подложках GaAs(013) с буферным слоем CdTe, обнаружен периодический микрорельеф в виде упорядоченной системы протяженных волн, направление вдоль которых составляет угол в диапазоне 30 – 45° относительно базового среза подложки по ориентации (011). Период микрорельефа составляет $0,1$ – $0,2$ мкм, а высота микрорельефа 5 – 10 нм. На пленках с таким микрорельефом обнаружена анизотропия проводимости. Направление максимальной проводимости совпадает с направлением вдоль волн микрорельефа. Предполагается, что периодический микрорельеф обусловлен особенностями механизма роста пленки при повышенных температурах и под противоположными склонами волн микрорельефа формируются стенки разного состава (и, возможно, с разной концентрацией носителей). Наблюдаемые особенности спектральной зависимости пропускания пленок с периодическим микрорельефом и изменение ее при отжиге можно объяснить различием состава в предполагаемых стенках и диффузионным выравниванием состава при отжиге. Анизотропия проводимости может быть обусловлена рассеянием носителей на периодически из-

меняющемся потенциале при их движении в направлении поперек волн микрорельефа или потенциальными барьерами между стенками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sidorov Yu. G., Dvoretzky S. A., Mikhailov N. N. et al. MCT heterostructure designing and growing by MBE for IR devices // Proc. SPIE. 2001. 4355. P. 228.
2. Гавриленко В. И., Дроздов Ю. Н., Кузнецов О. А. Исследование морфологии поверхности слоев Ge и GeSi, выращенных методом газофазной эпитаксии на подложках Ge(111) // Материалы совещания «Зондовая микроскопия-2000». Н. Новгород: ИФМ РАН, 2000. С. 180.
3. Phang Y. H., Teichert C., Lagally M. G. et al. Correlated-interfacial-roughness anisotropy in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ superlattices // Phys. Rev. B. 1994. 50. P. 14435.
4. Максимов Г. А., Филатов Д. О. Исследование поверхности полупроводников на сканирующем зондовом микроскопе ТМХ-2100 // Материалы Всероссийского совещания «Зондовая микроскопия-98». Н. Новгород: ИФМ РАН, 1998. С. 13.
5. Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Ю. Г. Донорные дефекты в эпитаксиальных слоях КРТ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2001. № 3. С. 9.
6. Tardot A., Hamoudi A., Magnea N. et al. Interdiffusion studies in CdTe/HgTe superlattices // Semicond. Sci. Technol. 1993. 8. P. 276.

*Институт физики полупроводников СО РАН,
E-mail: varavin@isp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
28 ноября 2001 г.*