

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ОПТИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ

УДК 621.315.592 : 536.717 : 537.33

ВЫРАЩИВАНИЕ КВАНТОВЫХ ЯМ $\text{HgTe}/\text{Cd}_{0,735}\text{Hg}_{0,265}\text{Te}$
МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ*С. А. Дворецкий¹, Д. Г. Икусов¹, Д. Х. Квон¹, Н. Н. Михайлов¹,
Н. Дай², Р. Н. Смирнов¹, Ю. Г. Сидоров¹, В. А. Швец¹¹Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова, г. Новосибирск, Россия
E-mail: mikhailov@isp.nsc.ru²Шанхайский институт технической физики, г. Шанхай, Китай

Выращены наноструктуры $\text{HgTe}/\text{Cd}_{0,735}\text{Hg}_{0,265}\text{Te}$ с квантовыми ямами HgTe толщиной 16,2 и 21,0 нм без дополнительного легирования на подложках (013) $\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Контроль составов, толщин широкозонного слоя и квантовой ямы проводился с помощью эллипсометрической методики в процессе роста. Точность определения состава $\Delta x \cong \pm 0,002$ молярных долей теллурида кадмия, толщин широкозонных слоев и квантовой ямы $\Delta d \cong 0,5$ нм. Центральные части широкозонных слоев толщиной ≈ 10 нм были дополнительно легированы индием до объемной концентрации носителей заряда $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Гальваномагнитные исследования в широком диапазоне магнитных полей при температурах жидкого гелия показали, что наблюдаются уровни размерного квантования и наличие двумерного электронного газа в выращенных наноструктурах. Получены высокие подвижности двумерного электронного газа μ_e , равные $2 \cdot 10^5$ и $5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, для плотностей электронов N_s , равных $1,5 \cdot 10^{11}$ и $3,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, соответственно.

Введение. Развитие технологии выращивания эпитаксиальных слоев толщиной порядка нанометров привело к лавинному созданию наноструктур для приборов нового класса микроэлектроники. Наноструктуры в виде квантовых сверхрешеток, квантовых проволок и ям на базе Si/Ge и соединений A^3B^5 на основе GaAs , широкозонных соединений A^2B^6 позволили создать многочисленные приборы микрофотозлектроники, такие как фотоприемники, лазерные структуры, одноэлектронный транзистор, заложить основу для создания приборов спинтроники, элементов памяти и т. д.

* Работа выполнена при частичной поддержке комплексного интеграционного проекта СО РАН № 3.20.

Интерес к наноструктурам узкозонных полупроводниковых соединений A^2B^6 , содержащих ртуть, таких как сверхрешетки HgTe/CdTe, был вызван их преимуществами перед однородным материалом $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) при создании многоэлементных инфракрасных фотоприемников с улучшенными параметрами – в первую очередь однородностью их спектральных характеристик [1]. Однако первые экспериментальные результаты не привели к получению высококачественных структур [2]. Развитие в последние годы современной технологии молекулярно-лучевой эпитаксии позволило создать наноструктуры с параметрами, пригодными для разработки приборов и проведения исследований фундаментальных характеристик материала. Так, в [3] представлены легированные сверхрешетки HgTe/HgCdTe, из которых изготовлены первые фотоприемники сверхдальнего ИК-диапазона (более 20 мкм). В работе [4] приведены структуры с микрорезонаторами $Cd_{0,65}Hg_{0,35}Te/Cd_{0,36}Hg_{0,64}Te$ толщиной 350 нм/250 нм для излучателей в диапазоне 3,0–3,5 мкм.

Интенсивно проводятся исследования фундаментальных характеристик наноструктур на основе квантовых ям (КЯ) HgTe [5, 6]. Определено, что эффективная масса электронов в этих КЯ меньше, чем электронов в КЯ соединений A^3B^5 . Показано, что такая масса электрона приводит к большему расщеплению уровней Ландау, ослаблению эффекта локализации электронов, увеличению амплитуды осцилляций Шубникова – де Газа и величины эффекта Рашба [5]. В работе [6] исследовался квантовый транспорт носителей заряда в легированных КЯ *n*- и *p*-типа проводимости. КЯ выращивались на подложках $(001)Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$. При температуре 4,2 К получена подвижность электронов $\mu_e = 1 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для плотности $N_s = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. В [7] представлено максимально известное значение подвижности $\mu_e = 6 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для концентрации электронов в КЯ $N_s \cong 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, выращенных на подложках $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$ с ориентациями (001) и (112)В. Результаты изучения зонной структуры сверхрешеток HgTe/HgCdTe по спектрам пропускания при температуре жидкого гелия представлены в [8]. Показано, что экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами. Однако в работах по выращиванию КЯ на основе HgTe не приведены данные контроля состава и толщины выращиваемых слоев в процессе роста. Измерение состава широкозонных слоев проводилось по спектрам пропускания [7, 8].

Контроль толщины слоев в наноструктурах широкозонных полупроводников проводится по измерениям периода осцилляций интенсивности отраженного электронного пучка от поверхности растущей пленки. Следует отметить, что осцилляции электронного пучка наблюдаются при росте на сингулярной ориентации (001). Выращивание твердых растворов КРТ проводится на подложках с вращательными поверхностями (112)В, (013). Кроме того, установлено, что электронный пучок оказывает существенное влияние на процессы роста КРТ, приводя к изменению морфологии поверхности и состава растущей эпитаксиальной пленки при относительно невысоких энергиях электронов в пучке (менее 15 кэВ).

В работах [9–11] показано эффективное применение эллипсометрического метода при выращивании эпитаксиальных слоев соединений КРТ для ИК-фотоприемников. Этот метод позволяет с высокой точностью проводить контроль состава, скорости роста и толщины эпитаксиальных слоев, что дает возможность создавать структуры со специальным профилем распределения

состава по толщине. Применение эллипсометрии для контроля процессов роста нанослоев КРТ было впервые продемонстрировано в работе [12]. Проведенные в [13] расчеты показали возможность эффективного применения эллипсометрического метода для контроля процесса роста сверхрешеток HgTe/CdTe. Работы по выращиванию потенциальных барьеров, ям и слоистых структур КРТ различного состава с толщиной слоев ~100 нм с *in situ* эллипсометрическим контролем были представлены в [11, 14]. Показано, что возможно выращивание потенциальных барьеров и ям со скоростями роста до 3,5 мкм/ч. Состав определялся с точностью $\Delta x \cong \pm 0,002$ молярных долей теллурида кадмия, а толщина КЯ – с точностью не хуже одного монослоя.

Цель данной работы – выращивание квантовых ям HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te с контролем толщины слоев порядка нанометров и состава на подложках (013)GaAs с буферным слоем CdTe/ZnTe и исследование их электрофизических свойств.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Эпитаксиальная структура с КЯ HgTe/Cd_{0,265}Hg_{0,735}Te представлена на рис. 1. Выращивание КЯ твердых растворов Cd_xHg_{1-x}Te различного состава проводилось на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «Обь-М» [10]. На подложке (013)GaAs после химического травления и термического отжига в парах мышьяка в сверхвысоком вакууме последовательно выращивались буферные слои ZnTe толщиной 0,3 мкм и CdTe толщиной 5–7 мкм в оптимальных технологических условиях [15]. Рост КЯ HgTe с широкозонными обкладками КРТ осуществлялся на поверхности буферного слоя при температурах 180–190 °С за счет изменения потока кадмия. Легирование центральной части широкозонного слоя КРТ проводилось из источника индия до концентрации электронов 10¹⁵ см⁻³ [16]. Скорость роста составляла 0,15 мкм/ч. Для контроля состава КРТ и толщины выращиваемых слоев использовался автоматический быстродействующий однолучевой эллипсометр ЛЭФ-755, разработанный на базе оригинальной статической схемы [17].

При росте эпитаксиального слоя на подложке с отличающимися оптическими постоянными при эллипсометрическом контроле наблюдаются затухающие периодические изменения эллипсометрических параметров Δ и Ψ . Число витков спирали зависит от коэффициента поглощения растущего слоя и уменьшается с его увеличением. Амплитуда спирали определяется разностью коэффициентов поглощения подложки и растущего слоя. Один виток спирали соответствует росту пленки толщиной ~100 нм. Поэтому при росте многослойной структуры с толщинами сло-

CdTe (40 нм)	Cd _{0,735} Hg _{0,265} Te
Нелегированный (5 нм)	
Легированный (In) $n = 10^{15}$ см ⁻³ (10 нм)	
Нелегированный (8 нм)	
КЯ HgTe (16 нм, 21 нм)	Cd _{0,735} Hg _{0,265} Te
Нелегированный (5 нм)	
Легированный (In) $n = 10^{15}$ см ⁻³ (10 нм)	
Нелегированный (8 нм)	
Буфер CdTe (6 мкм)	
Буфер ZnTe (50 нм)	
(013)GaAs Подложка	

Рис. 1. Схема эпитаксиальной структуры с КЯ на основе HgTe/Cd_{0,265}Hg_{0,735}Te

ев меньше 100 нм в плоскости Δ – Ψ должна наблюдаться кусочно-гладкая линия с криволинейными участками, соответствующими росту пленки постоянного состава. Протяженность криволинейного участка определяет толщину растущего слоя.

Эволюция эллипсометрических параметров при росте КЯ (схема расположения слоев приведена на рис. 1) показана на рис. 2. В плоскости Δ – Ψ наблюдается кусочно-гладкая кривая. Гладкие участки кривых соответствуют росту пленки постоянного состава, и их протяженность определяет толщину выращенного слоя. Начальная точка – исходное состояние поверхности подложки CdTe/ZnTe/GaAs. При открытии заслонки источника молекулярного потока теллура начинается рост широкозонного слоя КРТ до заданной толщины (на рис. 2 граница отмечена поперечной линией), при закрытии заслонки источника кадмия осуществляется рост КЯ HgTe, далее снова рост широкозонного слоя КРТ (открытие заслонки источника кадмия). Затем при этой же температуре подложки (180–190 °С) проводится выращивание защитного покрытия CdTe. Расчет производился по однослойной модели [18] аналогично методике, представленной в работе [19]. При расчете использовалась калибровочная кривая и оптические показатели для разных составов КРТ, полученные из [20, 21]. Для корректного сопоставления расчетных значений изменения эллипсометрических параметров с экспериментальными данными необходимо иметь с высокой точностью значения величин оптических постоянных подложки и растущего слоя на длине волны зондирующего света при температуре роста (источником излучения служил Ge–Ne-лазер с

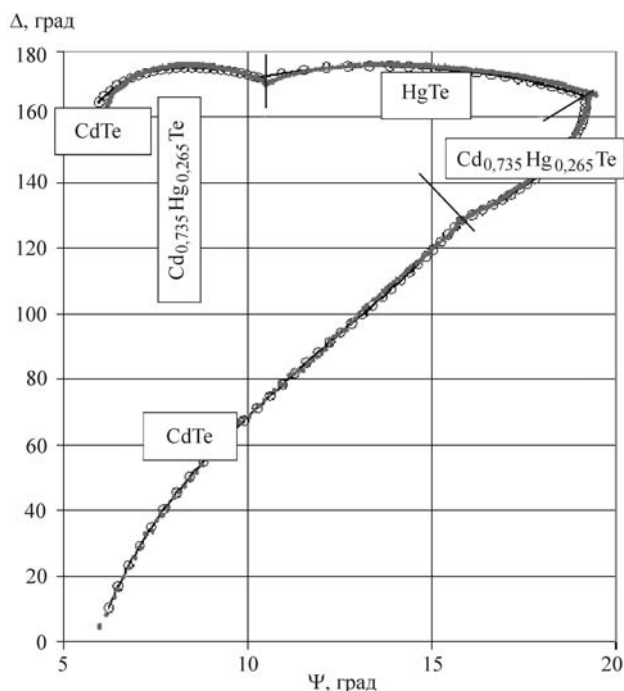


Рис. 2. Эволюция эллипсометрических параметров Δ и Ψ при росте КЯ. Точки перегиба соответствуют росту нового слоя (границы отмечены поперечными линиями). Экспериментальные значения показаны точками, а расчетные значения представлены сплошной линией и кружками, проставленными через 1 нм

длиной волны 632,8 нм, температура эпитаксиального роста 180–190 °С). Значения оптических постоянных, полученные из спектральных измерений при температурах, равных либо ниже комнатной, для КРТ различного состава приведены в [22, 23]. Выращивание КЯ проводилось при температуре значительно выше комнатной, поэтому для расчетов использовались зависимости оптических постоянных от состава $n(x)$ и $k(x)$, измеренные при комнатной температуре [20] и пересчитанные на температуру роста с учетом экспериментально установленных термооптических коэффициентов [21]. Из рис. 2 видно хорошее соответствие расчета экспериментальным данным.

Рассмотрим детальное определение состава и толщины растущей пленки на начальной стадии и точность измерения состава и толщины слоев в КЯ. Начальная стадия роста слоя КРТ с $x = 0,735$ на поверхности CdTe показана на рис. 3. При открытии заслонок молекулярных источников начинается плавное изменение эллипсометрических параметров (отмечено ромбами). Точка излома соответствует началу роста слоя HgTe при закрытии заслонки источника кадмия. Толщина растущего слоя КРТ определяется протяженностью криволинейного участка до точки излома. Расчет проводится для угла падения эллипсометрического луча относительно нормали к подложке $67,9 \pm 0,05^\circ$. Для CdTe принимаются оптические постоянные $n = 3,003$, $k = 0,204$, а для HgTe – $n = 4,08$, $k = 1,16$. Данные значения находятся из эллипсометрических измерений при росте пленки постоянного состава и заданной температуре подложки. Из сравнения расчетных кривых с экспериментальной зависимостью изменения эллипсометрических параметров от толщины растущего слоя был определен состав растущего слоя КРТ $x = 0,735 \pm 0,002$. Точность определения состава обуславливается степенью совпадения расчетной и экспериментальной кривых. Толщина выращенного слоя характеризуется точностью определения точки перегиба. Видно, что

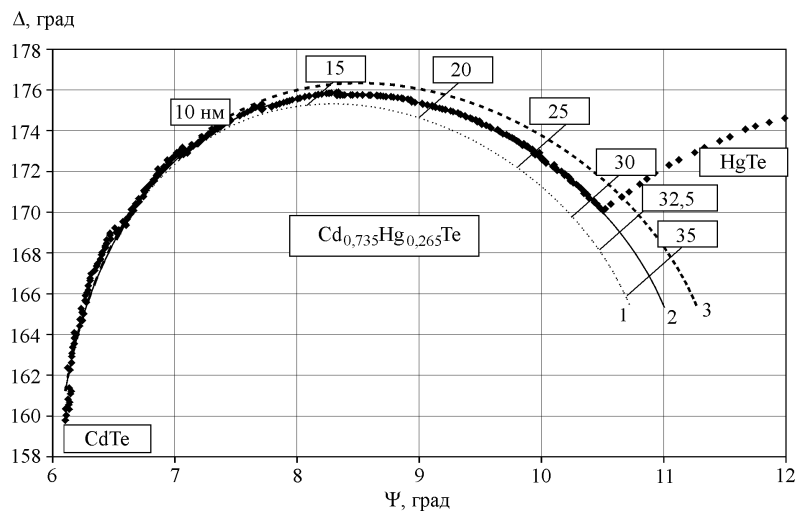


Рис. 3. Эволюция эллипсометрических параметров Δ и Ψ на начальной стадии роста пленок разного состава x на подложке CdTe. Маркерами показаны экспериментально измеренные значения. Поперечные линии с соответствующими значениями – линии равной толщины для различных составов. Расчетные кривые для роста пленки соответствующего состава: 1 – $x = 0,750$, 2 – $0,735$ и 3 – $0,720$

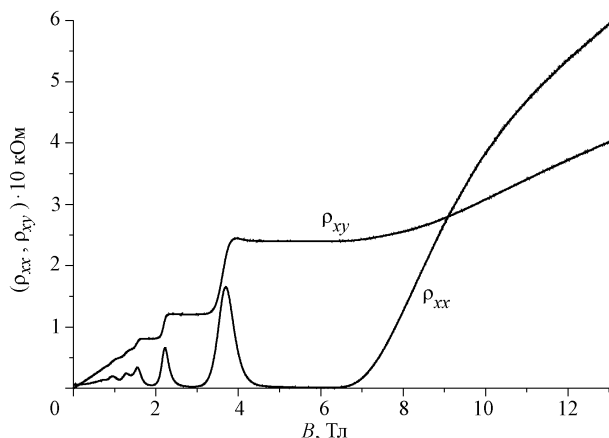


Рис. 4. Зависимости продольного (ρ_{xx}) и холловского (ρ_{xy}) сопротивлений от магнитного поля (B) для двумерного электронного газа в КЯ толщиной 21,0 нм

верхняя оценка толщины переходного слоя не превышает $\pm 0,5$ нм, т. е. порядка одного монослоя. Более точное значение можно получить при увеличении частоты измерений. Аналогичным образом производится анализ последующих участков, показанных на рис. 2. Результаты определения состава и толщины выращенных слоев из эллипсометрических измерений представлены на рис. 1.

Таким образом, из сравнения зависимостей экспериментально измеренных изменений эллипсометрических параметров Δ и Ψ с расчетными кривыми были определены составы широкозонных обкладок и их толщины, а также толщина КЯ на основе HgTe. Точность определения состава $\pm 0,002$ молярных долей теллурида кадмия, а толщин слоев $\pm 0,5$ нм.

Гальваномагнитные исследования проведены на двух КЯ с толщиной HgTe 16,2 и 21,0 нм. С помощью фотолитографии изготавливались стандартные холловские мостики шириной 50 мкм и расстоянием между потенциометрическими контактами 100 мкм. Омические контакты из индия формировались с помощью термокомпрессии. Результаты холловских измерений для структуры с квантовой ямой HgTe/Cd_{0,735}Hg_{0,265}Te толщиной 21,0 нм показаны на рис. 4. Измерения проводились при температуре 1,6 К в области магнитных полей до 13 Тл. В зависимости холловского сопротивления от величины магнитного поля $\rho_{xy}(B)$ отчетливо наблюдаются протяженные плато, а для соответствующих плато интервалов магнитных полей продольное магнитосопротивление ρ_{xx} становится нулевым. Малая ширина минимумов диссипативного сопротивления и протяженные плато холловского квантования подтверждают низкую величину эффективной массы двумерного электронного газа. Аналогичный ход зависимостей сопротивлений от величины магнитного поля для КЯ толщиной 16,2 нм представлены на рис. 5. Также наблюдаются протяженные плато для холловского сопротивления и отсутствие продольного магнитосопротивления для этих плато. Такое поведение магнитосопротивлений характерно для двумерного электронного газа. Из представленных на рисунках зависимостей определены концентрация электронов и их подвижность в квантовых ямах. В КЯ толщиной 21,0 нм получена подвижность $\mu_e = 2 \cdot 10^5$ см²/В·с для концентрации электронов

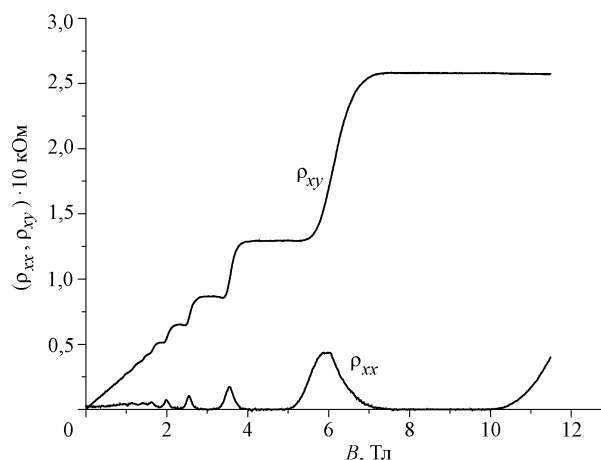


Рис. 5. Зависимость продольного (ρ_{xx}) и холловского (ρ_{xy}) сопротивлений от магнитного поля (B) для двумерного электронного газа в КЯ толщиной 16,2 нм

$N_s = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а в КЯ толщиной 16,2 нм – подвижность $\mu_e = 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для концентрации электронов $N_s = 3,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, что свидетельствует о высоком качестве КЯ.

Заключение. Проведено выращивание КЯ $\text{HgTe}/\text{Cd}_{0,735}\text{Hg}_{0,265}\text{Te}$ толщиной 16,2 нм и 21,0 нм на подложках (013)GaAs с прецизионным *in situ* эллипсометрическим контролем толщины и состава. Точность определения состава широкозонных обкладок $\Delta x \cong \pm 0,002$, а толщин $\cong 0,5$ нм.

В полученных структурах наблюдается двумерный электронный газ, что характеризует высокое качество наноструктур. Ширина минимумов диссипативного сопротивления и протяженные плато холловского квантования подтверждают низкую величину эффективной массы двумерного электронного газа.

Авторы выражают благодарность Л. Д. Бурдиной, В. А. Карташову, И. Н. Ужакову за выращивание буферных слоев и Т. И. Захарьяш за изготовление холловских структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schulman J. N., McGill T. C. The CdTe/HgTe superlattice: Proposal for a new infrared material // Appl. Phys. Lett. 1979. **34**. P. 663.
2. Goodwin M. W., Kinch M. A., Koestner R. J. Metal-insulator-semiconductor properties of HgTe-CdTe superlattices // Journ. Vac. Sci. Technol. 1988. **A6**. P. 2685.
3. Zhou Y. D., Becker C. R., Selamet Y. et al. Far-infrared detector based on HgTe/HgCdTe superlattices // Journ. Electron. Mater. 2003. **32**, N 7. P. 608.
4. Zanatta J. P., Noel F., Ballet P. et al. HgCdTe MBE material for microcavity light emitters: application to gas detection in the 2-6 mkm range // Ibid. P. 602.
5. Becker C. R., Zhang X. C., Pfeuffer-Jeschke A. et al. Very large Rashba spin-orbit splitting in HgTe quantum wells // Journ. Superconductivity: Incorporating Novel Magnetism. 2003. **16**, N 4. P. 625.
6. Landwehr G., Gerschutz J., Oehling S. et al. Quantum transport in n-type and p-type modulation-doped mercury telluride quantum well // Physica E. 2000. **6**. P. 713.

7. **Becker C. R., Zhang X. C., Ortner K. et al.** MBE growth and characterization of Hg based compounds and heterostructures // *Thin Solid Films*. 2002. **412**. P. 129.
8. **Becker C. R., Ortner K., Zhang X. C. et al.** Growth and studies of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ based low dimensional structures // *Physica E*. 2004. **20**. P. 436.
9. **Mikhailov N. N., Rykhlitski S. V., Spesivtsev E. V. et al.** Integrated analytical equipment for control of film growth in MBE technology // *Mater. Sci. and Eng.* 2001. **B80**. P. 41.
10. **Varavin V. S., Vasiliev V. V., Dvoretzky S. A. et al.** HgCdTe epilayers on GaAs: growth and devices // *Opto-electronics Rev.* 2003. **11**, N 2. P. 99.
11. **Михайлов Н. Н., Швец В. А., Дворецкий С. А. и др.** Эллипсометрический контроль роста наноструктур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // *Автометрия*. 2003. **39**, № 2. С. 71.
12. **Demay Y., Gailliard J. P., Medina P.** In situ spectroscopic ellipsometry of mercury cadmium telluride MBE layers // *Journ. Cryst. Growth*. 1987. **81**. P. 97.
13. **Ржанов А. В., Свиташев К. К., Мардежев А. С., Швец В. А.** Контроль параметров сверхрешеток в процессе их получения методом эллипсометрии // *ДАН СССР*. 1987. **297**, № 3. С. 604.
14. **Mikhailov N. N., Smirnov R. N., Dvoretzky S. A. et al.** Growth of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ nanostructures by molecular beam epitaxy with ellipsometric control // *Intern. Journ. Nanotechnology*. 2006. **3**, N 1. P. 120.
15. **Икусов Д. Г., Дворецкий С. А., Карташов В. А. и др.** Структурное совершенство и морфология эпитаксиальных слоев CdTe // *Тр. IX конф. по физике полупроводников, диэлектрических и магнитных материалов*. Владивосток: ДГУ, 2005. С. 176.
16. **Бахтин П. А., Дворецкий С. А., Варавин В. С. и др.** Исследование зависимостей проводимости и коэффициента Холла от магнитного поля в пленках $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // *ФТП*. 2004. **38**, № 10. С. 1203.
17. **Свидетельство** на полезную модель № 16314 РФ. Эллипсометр /Е. В. Спесивцев, С. В. Рыхлицкий. Опубл. 20.12.2000, Бюл. № 35 «Полезные модели. Промышленные образцы».
18. **Аззам Р., Башара Н.** Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
19. **Shvets V. A., Rykhlitski S. V., Spesivtsev E. V. et al.** In situ ellipsometry for control of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ nanolayer structures and inhomogeneous during MBE growth // *Thin Solid Films*. 2004. **455–456**. P. 688.
20. **Svitashev K. K., Dvoretzky S. A., Sidorov Yu. G. et al.** The growth of high-quality MCT films by MBE using in situ ellipsometry // *Cryst. Res. Technol.* 1994. **29**, N 7. P. 931.
21. **Shvets V. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V., Spesivtsev E. V.** Ellipsometric measurements of the optical constants of solids under impulse heating // *Proc. SPIE*. 2002. **4900**. P. 46.
22. **Arwin H., Aspnes D. E.** Nondestructive analysis of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.00, 0.2, 0.29, \text{ and } 1.00$) by spectroscopic ellipsometry. Pt. 2. Substrate, oxide and interface properties // *Journ. Vac. Sci. Technol.* 1984. **A2**. P. 1316.
23. **Vina L., Umbach C., Cardona M., Vodopyanov L.** Ellipsometric studies of electronic interband transitions in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // *Phys. Rev. B*. 1984. **29**. P. 6752.

Поступила в редакцию 4 мая 2007 г.