

УДК 621.315.592

**СТРУКТУРЫ HgCdTe ДЛЯ ДВУХСПЕКТРАЛЬНЫХ  
ФОТОПРИЁМНИКОВ ДИАПАЗОНОВ 3–5 И 8–12 мкм**

**В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, Д. Г. Икусов,  
Н. Н. Михайлов, В. Г. Ремесник, Г. Ю. Сидоров, Ю. Г. Сидоров,  
П. Н. Сизиков, И. Н. Ужаков**

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13  
E-mail: mikhailov@isp.nsc.ru*

Разработан дизайн двухслойной гетероструктуры КРТ с фоточувствительными слоями составов  $x_{\text{CdTe}} = 0,29\text{--}0,32$  и  $x_{\text{CdTe}} = 0,220\text{--}0,230$ , обеспечивающими чувствительность в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм, барьерным слоем между ними и широкозонными варизонными слоями на гетерогранице и поверхности, выращенными на подложке GaAs с буферными слоями ZnTe и CdTe. Контроль процессов роста гетероэпитаксиальной структуры (ГЭС) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) осуществлялся эллипсометрическим методом в реальном масштабе времени. После выращивания проведено измерение распределения состава по толщине по спектрам отражения при послойном химическом травлении. Наблюдается хорошее соответствие результатов измерений состава с помощью эллипсометрического метода и спектров отражения. Дырочный тип проводимости двухслойных ГЭС КРТ МЛЭ получен после термического отжига при температуре 220–240 °С в атмосфере инертного газа (гелия) в течение 24 ч. Концентрация дырок в фоточувствительных слоях составляет  $(4\text{--}10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $(8\text{--}20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при 78 К.

*Ключевые слова:* кадмий—ртуть—теллур, молекулярно-лучевая эпитаксия, инфракрасные фотоприёмники.

**Введение.** Многоспектральные инфракрасные фотоприёмники (ФП) необходимы для более совершенных тепловизионных систем, которые позволяют точно идентифицировать тепловые объекты. Получая информацию в различных спектральных диапазонах, многоспектральные тепловизионные системы могут одновременно определить абсолютную температуру и выявить отличительные признаки объекта. Для наблюдения за тепловыми объектами наибольший интерес представляют средневолновый ИК (СВИК) 3–5 мкм и длинноволновый ИК (ДВИК) 8–12 мкм спектральные диапазоны вследствие слабого поглощения излучения при распространении в атмосфере. Тем не менее пропускание атмосферы зависит от температуры и влажности, следовательно, инфракрасные двухспектральные фотоприёмники (ДФП), регистрирующие излучение в указанных спектральных диапазонах, обеспечивают точное распознавание характеристик тепловых объектов независимо от внешних условий. Многие движущиеся объекты имеют также различный тепловой контраст, и информация, полученная в двух спектральных диапазонах, позволяет различить собственное излучение объекта (8–12 мкм) и излучение работающих энергетических установок и их выбросов (3–5 мкм).

Разработка дизайна ДФП, работающих в указанных спектральных диапазонах, и их изготовление рассматриваются как важный аспект развития тепловизионной техники.

Среди множества материалов инфракрасной оптоэлектроники лидирует твёрдый раствор теллурида кадмия и ртути (КРТ,  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ) благодаря своим уникальным физическим свойствам. Состав КРТ определяет ширину запрещённой зоны материала и, соответственно, спектральный диапазон чувствительности ИК ФП. Незначительное отличие

параметров кристаллической решётки даёт возможность вырастить многослойные структуры КРТ различных составов высокого качества и обеспечить получение фоточувствительного материала для многоспектральных ИК ФП.

Научные исследования и практическая разработка технологий получения многослойных структур КРТ позволили создать дизайн СВИК/ДВИК ДФП и технологию их изготовления. Для ДФП обычно используется многослойная структура КРТ с  $n-p-P-N$ -переходами. Предложенная конструкция встречновключённых фотодиодов КРТ, реализующих детектирование в СВИК- и ДВИК-диапазонах спектра, была впервые продемонстрирована в [1, 2]. В такой конструкции отдельная ячейка содержит два встречных диода, чувствительных в СВИК- и ДВИК-диапазонах спектра. Широкозонный слой КРТ одновременно является коротковолновым «отрезающим» фильтром. Считывание осуществляется последовательно путём изменения полярности прикладываемого смещения в течение одного кадра. Показанные возможности многослойных структур КРТ привели к быстрому созданию ДФП на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС), выращенных методами жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и осаждением из паровой фазы металлоорганических соединений (МОПФЭ) [3–20]. За последнее десятилетие разработано большое количество СВИК/ДВИК ДФП различных форматов (до  $1280 \times 720$ ) и размеров пикселей (до 20 мкм).

Несмотря на достигнутые успехи при разработке ДФП (структур с  $n-p-P-N$ -переходами) имеются проблемы с получением требуемого состава твёрдого раствора и легированием его примесями, особенно для  $p$ -типа проводимости при легировании мышьяком. Также осталась проблема выбора архитектуры ДФП, которая могла бы решить вопросы формата и фактора заполнения матрицы фоточувствительных элементов для большеформатных ФПУ [21].

Метод МЛЭ является более гибким при создании ГЭС КРТ по сравнению с ЖФЭ и МОПФЭ и даёт возможность прецизионно контролировать состав КРТ и его изменения в процессе роста, управлять процессами легирования при формировании  $p-n$ -переходов. Таким образом, метод МЛЭ позволяет практически получить структуры с резкими границами между слоями различных составов КРТ и любыми типами  $p-n$ -переходов (от резких до плавных). В связи с такими преимуществами метод МЛЭ лидирует при создании структур для ДФП.

В [22, 23] разработан метод прецизионного контроля состава и толщины в процессе роста с помощью измерений эллипсометрических параметров для формирования одноцветных структур ГЭС КРТ МЛЭ. Точность измерений состава и скорости роста даёт возможность выращивать практически любой дизайн ГЭС КРТ МЛЭ. Так, нами созданы различные структуры для линейчатых и матричных одноцветных ИК ФП с варизонными широкозонными слоями, коротковолновыми отрезающими фильтрами и высоколегированными слоями [24].

Выращивание ГЭС КРТ МЛЭ с заданной архитектурой слоёв различных составов, в том числе и для СВИК/ДВИК ДФП, легко осуществляется с использованием эллипсометрического метода при контроле в реальном времени. Широкозонные варизонные слои требуются для создания барьера, который препятствует достижению носителями заряда поверхности структуры или интерфейса. Такие слои необходимы и для разделения слоёв с различным составом и носителей заряда в этих слоях. Для формирования высококачественных  $n-p$ -переходов одноцветных ИК ФП при ионном легировании бором требуются слои  $p$ -типа ГЭС КРТ МЛЭ с концентрацией дырок  $\sim (5-20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Для определения условий термического отжига двухслойных структур ГЭС КРТ МЛЭ необходимо иметь информацию о влиянии температуры отжига на концентрацию дырок в слоях для СВИК- и ДВИК-диодов.

Цель данной работы — создание дизайна и выращивание ГЭС КРТ МЛЭ, определение условий термического отжига для получения оптимальных значений концентрации дырок в слоях для ДФП.

**Экспериментальная часть.** Дизайн двухслойной структуры для СВИК/ДВИК ДФП приведён на рис. 1, *a*. На подложке GaAs последовательно выращены буферные слои ZnTe и CdTe и сложная структура КРТ, включающая фоточувствительные (ФЧ) слои для СВИК (3–5 мкм) и ДВИК (8–12 мкм) двухспектральных фотоприёмников, барьерный слой между ними и варизонные широкозонные слои на интерфейсе и поверхности структуры. Выращивание такой структуры проводилось на сверхвысоковакуумной установке МЛЭ типа «Обь-М» с контролем состава и толщины слоёв эллипсометрическим методом в реальном времени. Температура роста составила 175–185 °С, а скорость роста варьировалась в диапазоне 2,5–3,5 мкм/ч. На рис. 1, *b* показано изменение эллипсометрических параметров в процессе роста ГЭС КРТ МЛЭ в оптимальных условиях для ДФП. Вид-

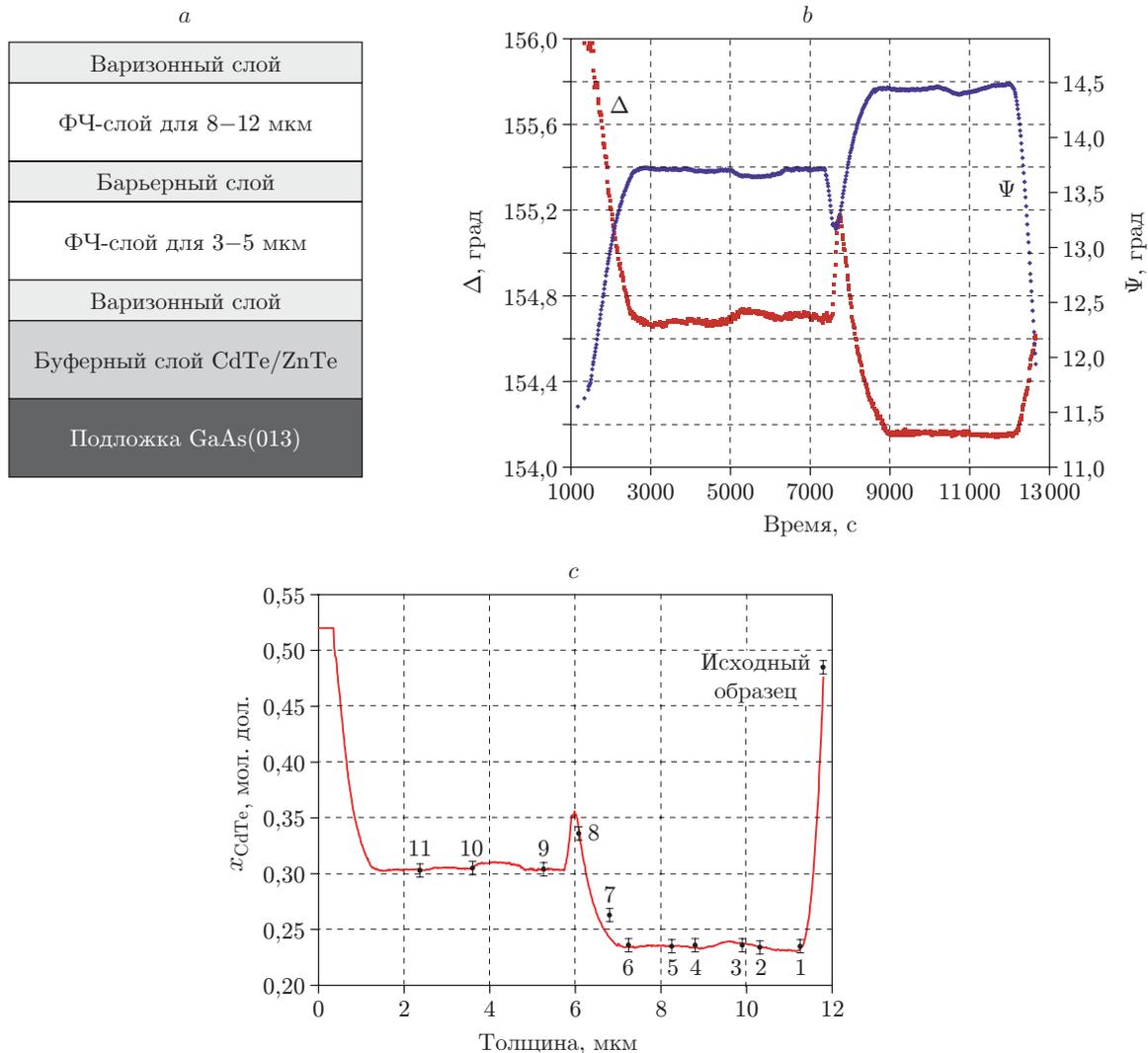


Рис. 1. Двухслойная ГЭС КРТ МЛЭ: *a* — схема слоёв; *b* — изменения эллипсометрических параметров  $\Psi$  и  $\Delta$  при выращивании; *c* — распределение состава по толщине (сплошная кривая — *in situ* эллипсометрические измерения, точки — измерение состава по спектрам отражения при послойном травлении, цифры — порядковый номер травления)

но, что эллипсометрические параметры  $\Psi$  и  $\Delta$  при выращивании фоточувствительных слоёв постоянного состава не изменяются. Изменение этих параметров наблюдается при выращивании барьерного и широкозонных варизонных слоёв. Соотношения эллипсометрических параметров коррелируют друг с другом, и каждая пара  $\Psi$  и  $\Delta$  соответствует определённому оптическому постоянному КРТ, которые задают состав твёрдого раствора. Постоянство эллипсометрических параметров  $\Psi$  и  $\Delta$  при выращивании означает постоянство состава КРТ, а изменения параметров  $\Psi$  и  $\Delta$  коррелируют с его изменением. Рис. 1, с иллюстрирует зависимость состава КРТ от толщины ГЭС КРТ МЛЭ для ДФП, которая получена при использовании корреляционного соотношения [25, 26]. Видно, что ГЭС КРТ МЛЭ включает два фоточувствительных слоя постоянного состава, два варизонных слоя на интерфейсе (СВИК-слой) и поверхности (ДВИК-слой) и барьерный слой (между слоями СВИК и ДВИК). Толщина этих слоёв соответствует толщине слоёв, обычно применяемых для одноцветных ИК ФП. Несомненно, возможно проводить выращивание ГЭС КРТ МЛЭ для ДФП с другим соотношением толщин слоёв и с другим составом для трёх и четырёх спектральных ИК ФП.

Для проверки полученного профиля состава ГЭС КРТ МЛЭ были измерены спектры пропускания и отражения при послойном травлении состава в растворе  $\text{Br}_2:\text{HBr}$ . Скорость травления составила 0,4 мкм/с. При этом поверхность образца оставалась зеркально-гладкой. Определение состава на поверхности слоя КРТ проводилось по спектрам отражения в видимой области, полученным с помощью спектрофотометра UV-1700 фирмы "Shimadzu" (0,2–1,1 мкм, разрешение  $1 \text{ см}^{-1}$ ). Измерения основаны на зависимости энергетического положения дублета пиков отражения  $E_1$  и  $E_1 + \Delta_1$  от состава  $x$ . Толщина анализируемого слоя определяется глубиной проникновения света в образец и равна величине  $\sim 0,05$  мкм. Точность определения  $x$  составляет  $\pm 0,003$ . Спектры отражения для поверхностей после травления приведены на рис. 2. Обозначения у кривых соответствуют измерениям на выращенной ГЭС КРТ МЛЭ и после 11 травлений. Из рисунка видно изменение положения пиков отражения. Пунктиром показано изменение пика  $E_1 + \Delta_1$ . После первого травления положение пика резко сместилось в область более высоких энергий. Далее наблюдается постоянство положения пика  $E_1 + \Delta_1$  (травления 1–6). Наконец, дальнейшие изменения  $E_1 + \Delta_1$  соответствуют изменению эллипсометрических парамет-

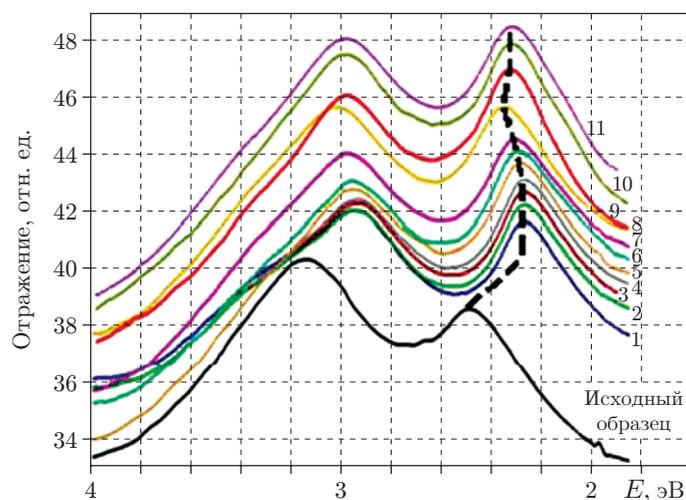


Рис. 2. Спектры отражения при последовательном травлении двухслойной ГЭС КРТ МЛЭ. Пунктирная кривая — изменение положения энергетического пика  $E_1 + \Delta_1$ . Для наглядности кривые разнесены по оси абсцисс

ров. Мы использовали экспериментальную зависимость состава твёрдого раствора КРТ ( $x_{\text{CdTe}}$ ) от положения пика отражения  $E_1 + \Delta_1$  ( $\nu$ , электронвольты), измеренного при комнатной температуре:

$$x_{\text{CdTe}} = -3,64440 \cdot 10^{-05} \nu^5 + 4,00998 \cdot 10^{-03} \nu^4 - \\ - 1,74543 \cdot 10^{-01} \nu^3 + 3,74934 \nu^2 - 39,5683 \nu + 163,483.$$

Эта калибровочная зависимость получена на основе сравнения экспериментальных результатов измерения состава по спектрам пропускания и отражения для выращенных структур различного состава.

На рис. 1, с точками представлены значения состава с доверительным интервалом, взятые из измерений спектров отражения при послойном травлении. Цифры у кривых соответствуют порядковому номеру травления и спектрам отражения (см. рис. 2). Видно хорошее совпадение результатов измерения составов ГЭС КРТ МЛЭ, полученное из эллипсометрических соотношений и спектров отражения.

Спектральные зависимости фотопроводимости измерялись для определения минимальной высоты барьера между слоями СВИК и ДВИК при температуре жидкого азота (78 К) с помощью инфракрасного фурье-спектрометра «Инфралюм-801», оборудованного специальной приставкой, которая позволяет регистрировать сигналы фотоприёмником МГ-32 или фотосопротивлением, изготовленным на основе ГЭС КРТ МЛЭ. Исследуемые образцы фотоприёмников имели размеры  $5 \times 1$  мм с двумя In-контактами, нанесёнными по краям в виде полосок шириной 0,5 мм на поверхности ДВИК-слоя. Фоновое излучение ограничивалось диафрагмой, охлаждаемой жидким азотом. Спектральная зависимость фотопроводимости исследуемого образца получается делением регистрируемого сигнала на опорный сигнал от штатного фотоприёмника МГ-32, который имеет свою спектральную характеристику, заданную его конструктивными особенностями и параметрами встроенного усилителя. Для учёта этих особенностей регистрируемый сигнал делится на «нормировочную» кривую, вид которой определяется конкретным прибором.

Результаты измерения спектральных характеристик фотоприёмников, изготовленных из трёх ГЭС КРТ МЛЭ с различными барьерными слоями, представлены на рис. 3, а—с. Параметры слоёв приведены в табл. 1.

Спектры фотопроводимости ДВИК-слоя измерены при падении излучения со стороны подложки и со стороны поверхности структуры при температуре жидкого азота (78 К). Видно, что при падении излучения со стороны поверхности спектральная зависимость ДВИК-слоя задаётся составом более узкозонного слоя и соответствует типичной «треугольной» зависимости. При падении излучения со стороны подложки наблюдается низкая величина фотопроводимости ДВИК-слоя в коротковолновой области спектра, которая, как и граница начала увеличения фотопроводимости, зависит от толщины СВИК-слоя и его состава.

Из данных измерений была определена минимальная величина барьера, при котором взаимное влияние СВИК- и ДВИК-слоёв при работе ДФП будет минимальным.

Видно, что на рис. 3, а наблюдается существенное различие в спектрах фотопроводимости при засветке со стороны плёнки (классический «треугольник») и со стороны подложки (СВИК-слой работает как отрезающий фильтр). На рис. 3, б приведены результаты значительного уменьшения влияния СВИК-слоя на спектры фотопроводимости и, наконец, на рис. 3, с влияние практически не наблюдается. В последнем случае фотоносители, генерированные в СВИК-слое, при засветке со стороны подложки дают вклад в фотопроводимость, т. е. влияние барьерного слоя отсутствует, а в первом случае влияние барьерного слоя максимально, соответственно СВИК-слой работает как отрезающий

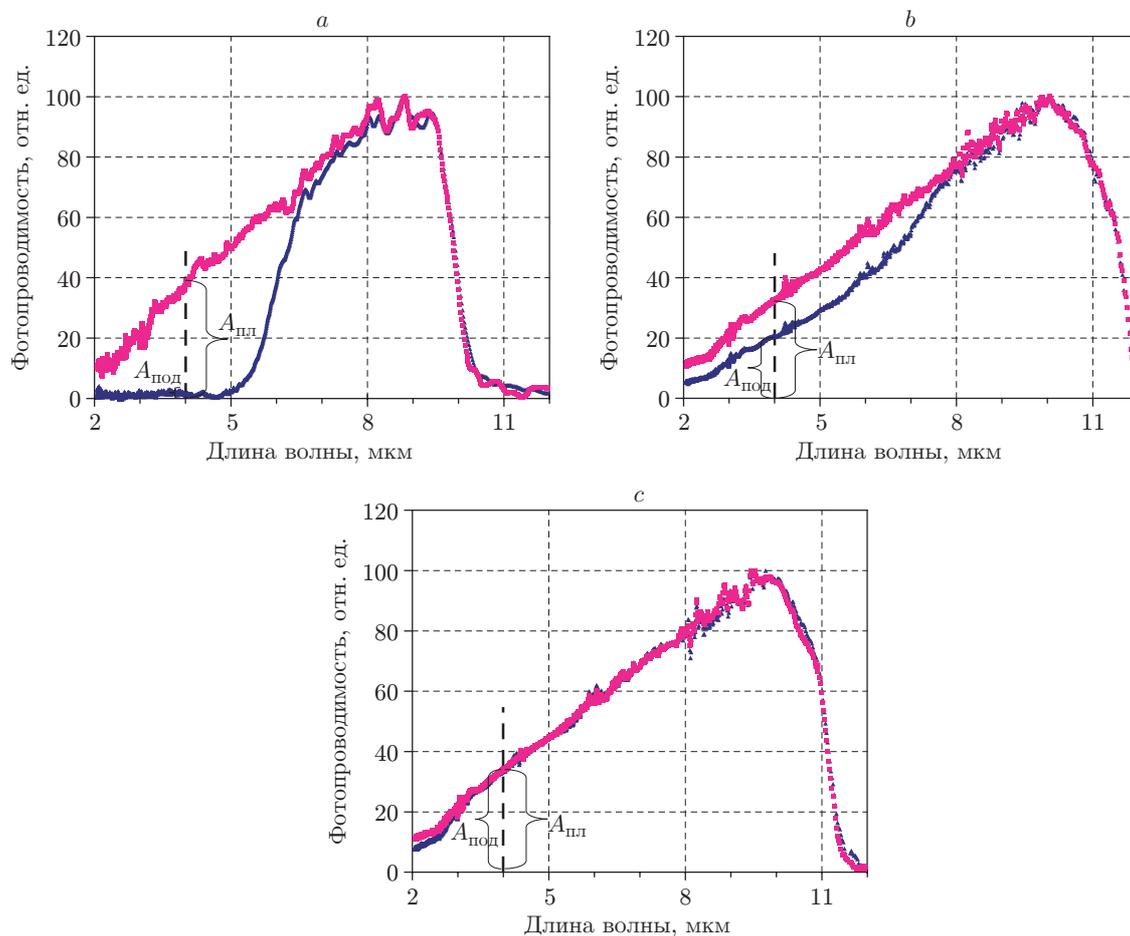


Рис. 3. Спектры фотопроводимости ДВИК-слоя для фоторезисторов (78 К) трёх структур при засветке со стороны подложки (чёрные кривые) и со стороны плёнки (серые кривые):  $a$  — КРТ070215,  $b$  — КРТ070209,  $c$  — КРТ070306

Таблица 1

№ образца	$x_{\text{СВИК}}$ , мол. дол.	$d_{\text{СВИК}}$ , мкм	$x_{\text{бар}} - x_{\text{СВИК}}$ , мол. дол.	$d_{\text{бар}}$ , мкм	$x_{\text{ДВИК}}$ , мол. дол.	$d_{\text{ДВИК}}$ , мкм	$A_{\text{под}}/A_{\text{пл}}$
КРТ070215	0,26	3,6	0,055	0,8	0,225	7,2	0,063
КРТ070209	0,25	7,6	0,028	0,9	0,226	7,8	0,57
КРТ070306	0,260	7,2	0,015	0,7	0,224	7,9	0,95
КРТ070212	0,25	7,1	0,043	0,8	0,226	8,1	0,12
КРТ070213	0,25	7,3	0,031	0,5	0,226	7,2	0,33
КРТ070214	0,25	6,1	0,03	0,5	0,226	7,9	0,44

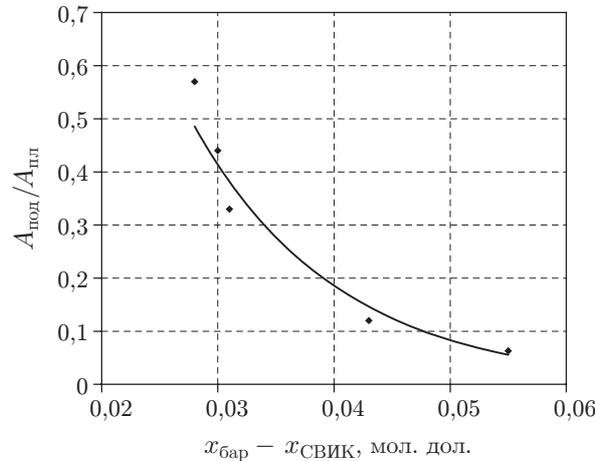


Рис. 4. Зависимость соотношения фотопроводимости  $A_{\text{под}}/A_{\text{плл}}$  от величины барьера

фильтр. Для численной характеристики этого факта мы выбрали отношение амплитуд сигналов фотопроводимости при засветке со стороны подложки  $A_{\text{под}}$  к амплитуде сигнала при засветке со стороны плёнки  $A_{\text{плл}}$  для длины волны 4 мкм. Выбор длины волны определён с учётом максимальных изменений спектров фотопроводимости ДВИК-слоя при измерении параметров барьерного слоя и минимальном влиянии толщины СВИК-слоя. В этом случае эффективность работы СВИК-слоя как отрезающего фильтра максимальна при стремлении отношения сигналов к нулю.

На основании результатов, представленных в табл. 1, построена зависимость отношения сигналов  $A_{\text{под}}/A_{\text{плл}}$  от величины барьерного слоя  $\delta x = x_{\text{бар}} - x_{\text{СВИК}}$  (рис. 4). Точками представлены экспериментальные результаты. Линия аппроксимирует экспериментальные результаты экспонентой. Из рисунка хорошо видно, что при увеличении высоты барьерного слоя  $x_{\text{бар}} - x_{\text{СВИК}}$  наблюдается экспоненциальное уменьшение отношения амплитуд фотосигналов  $A_{\text{под}}/A_{\text{плл}}$ . При достижении высоты барьера  $x_{\text{CdTe}} = 0,05$  мол. дол. это отношение становится менее 0,1. Толщина барьерного слоя во всех экспериментах была больше 0,5 мкм.

Таким образом, взаимовлияние коротковолнового и длинноволнового слоёв при засветке со стороны подложки минимально, если величина барьера превышает 0,05 мол. дол. теллурида кадмия.

**Получение  $p$ -типа проводимости слоёв ГЭС КРТ.** Проведён термодинамический расчёт образования вакансий при термическом отжиге в однослойных структурах с различным составом [27]. Результаты расчёта позволяют прогнозировать концентрацию дырок в слоях различного состава двухслойной структуры для ДФП. Для типичной температуры термического отжига (220 °С) при активности теллура  $a_{\text{Te}} = 1$  в ДВИК-слое (с  $x = 0,22$ ) концентрация дырок примерно в 2 раза больше, чем в СВИК-слое (с  $x = 0,32$ ). Таким образом, в двухслойной структуре возможно получение  $p$ -типа проводимости в каждом слое в едином процессе отжига.

Термический отжиг двухслойных структур проводился в стандартном режиме, используемом для получения  $p$ -типа с концентрацией дырок ( $P$ ) около  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> в однослойных структурах с  $x = 0,22$ . Измерения эффекта Холла двухслойных ГЭС КРТ МЛЭ дают эффективные значения концентрации и подвижности. Детальную информацию о параметрах слоёв будем иметь при последовательном стравливании плёнки КРТ с помощью дифференциального эффекта Холла. На рис. 5 показано распределение концентрации по толщине двухслойной ГЭС КРТ МЛЭ (номер образца КРТ100325) после термического

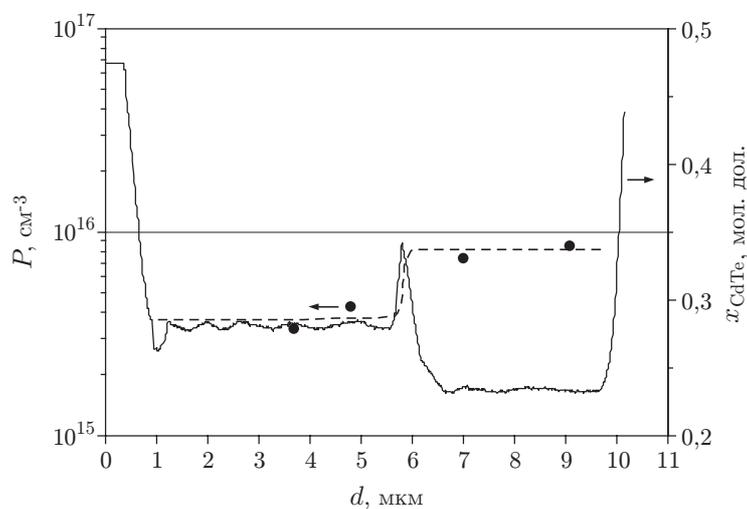


Рис. 5. Распределение состава (сплошная кривая) и концентрации дырок (точки) по толщине двухслойной ГЭС КРТ МЛЭ после термического отжига. Концентрация дырок в стравленных слоях определялась из измерений дифференциальным методом Холла с послойным травлением

Таблица 2

№ образца	СВИК-слой		ДВИК-слой		Концентрация и подвижность после роста		Концентрация и подвижность после термического отжига	
	Толщина КРТ, мкм	Состав, мол. дол.	Толщина КРТ, мкм	Состав, мол. дол.	$n_{78 \text{ К}}$ , $\text{см}^{-3}$ , $\times 10^{14}$	$\mu n_{78 \text{ К}}$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ , $\times 10^3$	$p_{78 \text{ К}}$ , $\text{см}^{-3}$ , $\times 10^{15}$	$\mu p_{78 \text{ К}}$ , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
КРТ090817-1	4,35	0,292	4,12	0,222	1,0	43	10	422
КРТ090819	5,48	0,297	4,83	0,223	1,0	47	6,2	551
КРТ090819-1	4,76	0,299	4,63	0,225	1,2	44	7,0	490
КРТ091229-1	4,85	0,301	4,01	0,221	2,1	43	6,2	438
КРТ090324	4,65	0,281	3,11	0,227	1,7	39	—	—
КРТ090324-1	4,98	0,279	3,15	0,225	1,5	43	6,2	438
КРТ090325	4,65	0,280	3,09	0,232	4,1	28	6,0	484
КРТ090325-1	4,61	0,279	3,02	0,233	1,76	36	—	—
КРТ090329-1	4,78	0,287	3,01	0,227	1,9	41	—	—
КРТ090429	5,35	0,285	2,86	0,226	1,5	47	—	—
КРТ090504	5,24	0,280	4,24	0,226	2,4	39	—	—

отжига. Как видно, концентрация дырок составляет  $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  в ДВИК- и СВИК-слоях соответственно.

В табл. 2 приведены параметры двухслойных ГЭС КРТ МЛЭ для ДФП. После выращивания ГЭС КРТ МЛЭ имеют электронный тип проводимости, а после термического отжига — дырочный тип проводимости.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан дизайн и проведено выращивание двухслойной структуры КРТ с фоточувствительными слоями составов, обеспечивающими чувствительность в спектральных диапазонах 3–5 и 8–12 мкм, барьерным слоем между ними и широкозонными варизонными слоями на подложке GaAs с буферными слоями ZnTe и CdTe.

2. Контроль состава и толщины слоёв в реальном масштабе времени и *ex situ* проводился эллипсометрическим методом и по измерениям пиков отражения  $E_1$  и  $E_1 + \Delta_1$  при послойном травлении. Получено хорошее соответствие данных по измерению составов двухслойной структуры различными методами.

3. Экспериментально установлена минимальная величина барьера для устранения взаимного влияния фоточувствительных слоёв, которая должна быть на 0,05 мол. дол. теллурида кадмия больше, чем состав фоточувствительного слоя, обеспечивающего чувствительность в диапазоне спектра 3–5 мкм.

4. Определены условия термического отжига для получения необходимой концентрации дырок в фоточувствительных слоях проводимости при температуре 220–240 °С. Концентрация дырок в фоточувствительных слоях различается в 2 раза и составляет  $(4\text{--}10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $(8\text{--}20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  при 78 К для материала *p*-типа проводимости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Blazejewski E. R., Arias J. M., Williams G. M. et al.** Bias-switchable dual-band HgCdTe infrared photodetector // Journ. Vac. Sci. Technol. B. 1992. **10**, Is. 4. P. 1626–1632.
2. **Wilson A., Patten E. A., Chapman G. R. et al.** Integrated two-color detection for advanced focal plane array (FPA) applications // Proc. SPIE. 1994. **2274**. P. 117–125.
3. **Rajavel R. D., Jamba D. M., Jensen J. E. et al.** Molecular beam epitaxial growth and performance of HgCdTe-based simultaneous-mode two-color detectors // Journ. Electron. Mater. 1998. **27**, Is. 6. P. 747–751.
4. **Radford W. A., Patten E. A., King D. F. et al.** Third generation FPA development status at Raytheon Vision Systems // Proc. SPIE. 2005. **5783**. P. 331–339.
5. **Smith E. P. G., Pham L. T., Venzor G. M. et al.** HgCdTe focal plane arrays for dual-color mid- and long-wavelength infrared detection // Journ. Electron. Mater. 2004. **33**, Is. 6. P. 509–516.
6. **Smith E. P. G., Patten E. A., Goetz P. M. et al.** Fabrication and characterization of two-color midwavelength/long wavelength HgCdTe infrared detectors // Journ. Electron. Mater. 2006. **35**, Is. 6. P. 1145–1152.
7. **King D. F., Radford W. A., Patten E. A. et al.** 3rd-generation 1280 × 720 FPA development status at Raytheon Vision Systems // Proc. SPIE. 2006. **6206**. 62060W.
8. **Reine M. B., Hairston A. W., O'Dette P. et al.** Simultaneous MW/LW dual-band MOVPE HgCdTe 64 × 64 FPAs // Proc. SPIE. 1998. **3379**. P. 200–212.
9. **Destefanis G., Baylet J., Ballet P. et al.** Status of HgCdTe bicolor and dual-band infrared focal arrays at LETI // Journ. Electron. Mater. 2007. **36**, Is. 8. P. 1031–1044.
10. **Zanatta J. P., Badano G., Ballet P. et al.** Molecular beam epitaxy growth of HgCdTe on Ge for third-generation infrared detectors // Journ. Electron. Mater. 2007. **35**, Is. 6. P. 1231–1236.

11. **Destefanis G., Ballet P., Baylet J. et al.** Bi-color and dual-band HgCdTe infrared focal plane arrays at Defir // Proc. SPIE. 2006. **6206**. 62060R.
12. **Zanatta J. P., Ferret P., Loyer R. et al.** Single- and two-color infrared focal plane arrays made by MBE in HgCdTe // Proc. SPIE. 2000. **4130**. P. 441–451.
13. **Tribolet P., Vuillermet M., Destefanis G.** The third generation cooled IR detector approach in France // Proc. SPIE. 2005. **5964**. 596407.
14. **Gordon N. T., Abbott P., Giess J. et al.** Design and assessment of metal-organic vapor phase epitaxy-grown dual waveband infrared detectors // Journ. Electron. Mater. 2007. **36**, Is. 8. P. 931–936.
15. **Giess J., Glover M. A., Gordon N. T. et al.** Dual-waveband infrared focal plane arrays using MCT grown by MOVPE on silicon substrates // Proc. SPIE. 2005. **5783**. P. 316–324.
16. **Jones C. L., Hipwood L. G., Price J. et al.** Multi-color IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE // Proc. SPIE. 2007. **6542**. 654210.
17. **Dreiske P. D.** Development of two-color focal-plane arrays based on HDVIP // Proc. SPIE. 2005. **5783**. P. 325–330.
18. **Kinch M. A.** HDVIP FPA technology at DRS Infrared Technologies // Proc. SPIE. 2001. **4369**. P. 566–578.
19. **Aqariden F., Dreiske P. D., Kinch M. A. et al.** Development of molecular beam epitaxially grown  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  for high-density vertically-integrated photodiode-based focal plane arrays // Journ. Electron. Mater. 2007. **36**, Is. 8. P. 900–904.
20. **Tennant W. E., Thomas M., Kozlowski L. J. et al.** A novel simultaneous unipolar multispectral integrated technology approach for HgCdTe IR detectors and focal plane arrays // Journ. Electron. Mater. 2001. **30**, Is. 6. P. 590–594.
21. **Almeida L. A., Thomas M., Larsen W. et al.** Development and fabrication of two-color mid- and short-wavelength infrared simultaneous unipolar multispectral integrated technology focal-plane arrays // Journ. Electron. Mater. 2002. **31**, Is. 7. P. 669–676.
22. **Svitashev K. K., Shvets V. A., Mardezhov A. S. et al.** Ellipsometry as a powerful tool for control of epitaxial semiconductor structures in-situ and ex-situ // Mater. Sci. Eng. 1997. **B44**, Is. 1–3. P. 164–167.
23. **Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. и др.** Молекулярно-лучевая эпитаксия узкозонных соединений  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Оборудование и технология // Оптический журнал. 2000. **67**, № 1. С. 39–43.
24. **Varavin V. S., Vasiliev V. V., Dvoretzky S. A. et al.** HgCdTe epilayers on GaAs: growth and devices // Opto-electron. Rev. 2003. **11**, Is. 2. P. 99–111.
25. **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. and Technol. 1994. **29**, Is. 7. P. 931–937.
26. **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. 46–52.
27. **Варавин В. С., Сидоров Г. Ю., Сидоров Ю. Г.** Концентрация вакансий в подрешетке металла твердых растворов теллурида кадмия и ртути в зависимости от состава // Журнал физической химии. 2010. **84**, № 9. С. 1605–1612.