

Конструирование и выращивание фоточувствительных структур на основе КРТ МЛЭ для ИК-фотоприемников

Ю. Г. Сидоров, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов,
М. В. Якушев, В. С. Варавин, В. В. Васильев,
А. О. Сусяков, В. Н. Овсяк

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Разработана и изготовлена установка молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) с аналитическими средствами контроля процессов роста для выращивания соединений A^2B^6 , в том числе и ртутьсодержащих соединений. Разработана технология выращивания гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) твердых растворов кадмий—ртуть—теллур (КРТ) методом МЛЭ с заданным изменением состава КРТ по толщине. Сконструированы и выращены ГЭС КРТ МЛЭ на подложках $CdZnTe/GaAs$ с варизонными слоями на границах раздела пленки КРТ. Структуры были использованы для изготовления высококачественных как одиночных, так и многоэлементных фоторезисторов и фотодиодов, работающих при температурах 77 и 200–250 К в диапазонах длин волн 3–5 и 8–12 мкм, до и более 20 мкм. Широкозонные слои на границах пленки КРТ используются как пассивирующее покрытие. Узкозонный слой в пленке КРТ на границе пленка—буфер используется для снижения последовательного сопротивления в фотодиодах. Для снижения темновых токов матрицы фотодиодов, работающей при температурах вблизи 200 К, были использованы ГЭС КРТ МЛЭ со специальным распределением состава по толщине.

Базовым материалом для разработки и производства инфракрасных (ИК) фотоприемников (ФП) является твердый раствор кадмий—ртуть—теллур. ИК-ФП на основе КРТ различного состава обеспечивают регистрацию ИК-излучения в широком диапазоне длин волн (от 1 до 20 мкм и более). Использование различных физических процессов дает возможность конструировать различные типы ИК-ФП, работающие в широком интервале температур (от температуры жидкого азота до комнатной температуры).

Основное развитие ИК-ФП происходит в направлении создания большеформатных линеек фотосопротивлений и фотодиодных матриц с числом элементов до 1024×1024 и более. Для создания таких ИК-ФП необходимо иметь материал КРТ большой площади с высокими однородностью состава и электрофизическими параметрами.

В процессе изготовления ИК-ФП необходимо устранять такие негативные явления, как токи утечки по поверхности и последовательное сопротивление $p-n$ -перехода, которые влияют на характеристики приборов.

Для пассивации поверхности обычно используют диэлектрические слои [1], осаждающиеся на поверхности ИК-ФП в отдельном технологическом процессе. Упростить технологию пассивации можно при выращивании широкозонного слоя на поверхности в едином процессе при приготовлении материала [2].

Последовательное сопротивление R_s для диодных ИК-ФП совместно с емкостью $p-n$ -перехода может являться лимитирующим фактором, определяю-

щим предельную рабочую частоту фотоприемника. Более существенна роль R_s в случае гетеродинного приема, когда наряду с частотным ограничением большая величина R_s приводит к сильному изменению рабочей точки (напряжению смещения) фотодиода из-за протекания больших токов до 10 мА, так как типичные мощности "гетеродинного" (опорного) пучка достигают единиц милливатт. Большая величина R_s может быть существенна и для "низкочастотных" матричных и линейчатых фотоприемников. В таких приемниках базовый контакт по технологическим соображениям делается в виде контура вокруг матрицы или линейки фотоприемников так, что последовательное сопротивление является сопротивлением растекания по базовому слою и имеет различную величину для центральных и периферийных элементов. Суммарный фототок от отдельных $p-n$ -переходов, текущий в базовом слое, может достигать такой величины, что падение напряжения в базовом слое, обусловленное им, изменяет рабочую точку фоточувствительных элементов. Проблема понижения R_s , которая существенна для быстродействующих, гетеродинных и матричных ФП [3], может быть решена с помощью создания в материале КРТ тонкого узкозонного слоя, который имеет высокую проводимость.

Весьма привлекательной является задача создания матричных ФП, работающих при комнатной температуре или при слабом охлаждении с помощью термоэлектрических охладителей (ТЭО). Однако здесь на первый план выходит проблема считывания сигнала из-за больших темновых токов $p-n$ -переходов. Использование материала КРТ со специальным профилем состава позволяет значительно снизить темновые токи $p-n$ -переходов [4]. Фотодиоды, изготовленные на основе такого материала для спектрального диапазона 3÷5 мкм, будут работать с типовыми мультиплексорами, которые используются для работы с охлаждаемыми матричными ИК-ФП.

Можно надеяться, что путем специального конструирования профиля состава возможно практическое создание как слабоохлаждаемых фотодиодов с рабочей длиной волны в области 10 мкм с высокими параметрами, так и охлаждаемых до азотных температур с длинноволновой границей в районе 20 мкм и более.

Следовательно, конструирование структур на основе КРТ, имеющих различное изменение состава в материале, позволит упростить технологию изготовления приборов, а также создать новое поколение ИК-ФП.

Наиболее простым и гибким для решения поставленного ряда задач является метод молекулярно-лучевой эпитаксии. Преимущества метода МЛЭ при создании эпитаксиальных слоев [5, 6] делают его наиболее технологичным и простым. МЛЭ позволяет значительно снизить стоимость получения КРТ с высокой однородностью параметров [6] при использовании подложек из арсенида галлия и из кремния большого диаметра с эпитаксиальным слоем CdZnTe. Применение аналитических средств дает возможность проводить процессы эпитаксии с тщательным контролем параметров роста и растущей пленки в реальном времени. Наиболее информативным и менее воздействующим на процессы при росте КРТ МЛЭ является метод эллипсометрии, который позволяет измерять скорость роста на начальной стадии, состав растущего слоя для сложных соединений, изменение рельефа растущей поверхности, температуру. Разработанная нами методика контроля параметров при росте ГЭС КРТ МЛЭ с помощью автоматического эллипсометра [7, 8] позволяет создавать заданный профиль изменения состава по толщине пленки КРТ при конструировании ГЭС КРТ МЛЭ для ИК-ФП.

Цель работы — решение задач выращивания ГЭС КРТ МЛЭ с высокой однородностью состава на большой площади и различным распределением состава по толщине для решения технологических проблем пассивации и уменьшения последовательного сопротивления, а также показ принципиально новых возможностей в создании как одиночных, так и матричных диодных ФП.

Результаты и обсуждение

Установка МЛЭ для выращивания ртутьсодержащих соединений

Разработано и изготовлено оборудование для МЛЭ с автоматизированной системой управления технологическими процессами и средствами контроля качества слоев в процессе роста *in situ*, ориентированное на промышленное производство эпитаксиального материала КРТ на различных подложках.

Установка МЛЭ представляет собой технологическую линию, построенную на основе проведенных физико-химических исследований процессов эпитаксии из молекулярных пучков на подложках CdTe и GaAs [5]. Она включает три технологических модуля (ТМ) и три камеры загрузки-выгрузки подложек (ЗВП). Два ТМ и модули ЗВП имеют конструкцию модулей установки МЛЭ “Катунь”, третий ТМ имеет оригинальную конструкцию и служит для выращивания ГЭС методом МЛЭ, в том числе и ртутьсодержащих. Подложки загружаются в камеру ЗВП в специальных носителях в обеспыленной атмосфере в ламинарном боксе.

В ТМ предэпитаксиальной подготовки поверхности подложек проводятся процессы удаления остаточных оксидов и получение атомарно-чистой поверхности. В случае использования подложек из GaAs температура удаления остаточных оксидов составляет ~ 580 °С. При таких температурах наличие остаточных паров теллура, взаимодействующих с чистой поверхностью арсенида галлия, приводит к образованию соединений. При последующем росте CdZnTe такое неконтролируемое образование соединений приведет к повышенной плотности дефектов как буферного слоя, так и слоя КРТ. Поэтому технологические операции подготовки поверхности и выращивание буферного слоя на подложке из GaAs пространственно разнесены по разным ТМ.

Остаточная атмосфера ТМ предэпитаксиальной подготовки поверхности подложек не содержит паров теллура. В этом модуле проводится термическое удаление остаточных оксидов с поверхности подложки. Модуль оснащен дифрактометром быстрых электронов (ДБЭ), молекулярным источником мышьяка.

В ТМ выращивания буферных слоев имеются молекулярные источники кадмия, цинка и теллура, ДБЭ и встроенный автоматический эллипсометр (АЭ).

Для выращивания ГЭС КРТ МЛЭ сконструирован и изготовлен ТМ выращивания ртутьсодержащих соединений, оснащенный оригинальной системой молекулярных источников, которые решают проблему выращивания однородных по площади слоев КРТ большого диаметра (до 102 мм) без вращения подложки. Молекулярные источники кадмия и ртути имеют кольцевые рассеиватели потоков. Цилиндрический источник теллура установлен соосно с рассеивателями молекулярных потоков кадмия и ртути. Эта система источников обеспечивает высокую однородность состава эпитаксиальных пленок КРТ на большой площади при минимальном расходе испаряемых материалов. Из расчета следует, что такая система при точной юстировке источников может обеспечить однородность состава не хуже $0,0002 \text{ см}^{-1}$, что на порядок выше самых жестких требований к однородности. С помощью АЭ измеряется скорость роста КРТ на начальной стадии и осуществляется не-

прерывный контроль состава и морфологии растущего слоя КРТ в реальном масштабе времени. Контроль температуры подложки осуществляется в процессе роста с помощью поляризационного пирометра, принцип работы которого основан на измерении разности ортогонально поляризованных компонент теплового излучения поверхности в длинноволновой ИК-области спектра (20—35 мкм).

Технология выращивания ГЭС КРТ МЛЭ

На данной установке МЛЭ разработана технология выращивания ГЭС КРТ МЛЭ с заданными распределениями состава КРТ по толщине и параметрами, удовлетворяющими производству высокоэффективных многоэлементных ИК-ФП для диапазонов длин волн 3—5 и 8—14 мкм, создающая основу для разработки новых поколений ИК-ФП.

В качестве подложек используется полуизолирующий GaAs ориентации (310), диаметром 50,8 и 76,2 мм. Перед загрузкой в установку поверхность подложек травится в полирующем травителе на основе серной кислоты. Финишная стадия подготовки проводится по методике [9], позволяющей получить на поверхности тонкий пассивирующий слой мышьяка. Загрузка подложек в носители происходит в обеспыленном ламинарном боксе. Затем носители с подложками помещаются в модуль ЗВП. После откачки до вакуума 10^{-6} Па носитель с подложкой передается в ТМ предэпитаксиальной подготовки подложки.

Термическое удаление оксидов с поверхности GaAs производится в три этапа: выдержка при температуре 150 °С в течение 1 ч, нагрев до температуры 580 °С с заданной скоростью и 10-минутный отжиг при 580 °С. Второй и третий этапы отжига проводятся при разогревом источнике мышьяка. Давление As над поверхностью подложки во время отжига составляет порядка $1,5 \cdot 10^{-5}$ Па. Для контроля процесса используется ДБЭ. При сгоне оксида в азимуте $[-1 \ 3 \ 5] \times [-1 \ 3 \ -2]$ наблюдается сверхструктурный переход (1×1) в (1×2). При этом в азимуте [001] появляются дополнительные рефлексы. После остывания подложки до 150 °С проводится передача носителя с подложкой в ТМ роста буферных слоев.

Рост буферных слоев начинают с осаждения слоя ZnTe до толщины 0,2 мкм при температуре роста (320 ± 10) °С. Подложка охлаждается до температуры (280 ± 10) °С, и происходит рост слоя CdTe толщиной 5—7 мкм. Скорость роста — 1—2 мкм/ч. Процессы роста контролируются с помощью АЭ и ДБЭ. При анализе временных изменений эллипсометрических параметров Ψ и Δ от условий роста была разработана модель, описывающая оптические свойства слоев CdZnTe в процессе роста. Полученные данные позволяют контролировать начальные стадии роста — образование зародышей роста, их разрастание, слияние и образование сплошного слоя; определять скорости роста; измерять оптические постоянные растущего соединения; контролировать рельеф и температуру поверхности роста. При выращивании картины ДБЭ показывают, что в азимуте $[-1 \ 3 \ 5] \times [-1 \ 3 \ -2]$ наблюдаются структуры (1×1) и (1×2). Установлено, что структура (1×2) соответствует избытку теллура на растущей поверхности, а структура (1×1) — избытку кадмия или цинка. При росте с избытком теллура на поверхности развивается рельеф и наблюдаются только точечные рефлексы, соответствующие трехмерной дифракции. При росте с избытком кадмия или цинка рельеф не развивается и наблюдается двумерная дифракция. В азимуте [001] дифракционные рефлексы вытягиваются, и максимумы их интенсивностей смещаются в сторону тени от об-

разца. По-видимому, это можно объяснить выглаживанием поверхности и формированием четкой системы эквидистантных ступеней. В этом случае получаются зеркально гладкие буферные слои с минимальной плотностью морфологических дефектов. Данные условия роста позволяют воспроизводимо производить рост только одной ориентации буферного слоя (310) и устраняют появление неупорядоченной фазы на начальной стадии роста. После остывания до 100 °С носитель с подложкой передается в ТМ роста КРТ через модуль ЗВП для накопления структур с буферным слоем.

Процесс роста КРТ проводится при температурах ~180–195 °С; скорость роста пленок КРТ — 2–5 мкм/ч. Контроль процесса роста проводится с помощью АЭ. На начальной стадии роста происходят сильные изменения эллипсометрических параметров Ψ и Δ из-за различия оптических постоянных подложки и пленки. В координатах $\Psi - \Delta$ временная зависимость этих параметров на начальной стадии роста имеет вид сворачивающейся спирали. Сравнение получаемой зависимости с теоретической дает возможность определить скорость роста пленки КРТ. В конечной точке спирали (после достижения определенной толщины) параметры Ψ и Δ зависят от состава, морфологии и температуры [7].

Рост ГЭС КРТ МЛЭ с пассивирующими слоями на границах раздела начинается обычно с состава $X_{\text{CdTe}} = 0,3-0,4$. Можно начинать выращивание КРТ с составов, близких к CdTe. За счет увеличения потока теллура состав растущего слоя КРТ плавно изменяется до требуемого значения ($X_{\text{CdTe}} = 0,2-0,22$ или $0,3-0,35$) на толщине 1–2 мкм. Затем проводится рост слоя постоянного состава толщиной 6–15 мкм. В конечной стадии за счет уменьшения потока теллура проводится выращивание слоя КРТ переменного состава толщиной 0,5–1 мкм с увеличением содержания кадмия к поверхности. Состав на поверхности выращенной ГЭС КРТ МЛЭ имеет типичные значения $X_{\text{CdTe}} = 0,3-0,5$. Возможно выращивание ГЭС КРТ МЛЭ с составом X_{CdTe} , близким к CdTe на поверхности. Знание скорости роста на начальной стадии и состава растущей пленки КРТ дает возможность с точностью 5 % прогнозировать толщину и общее время роста пленки. Типичное распределение состава в пленке КРТ приведено на рис. 1. В процессе роста проводится измерение температуры поверхности.

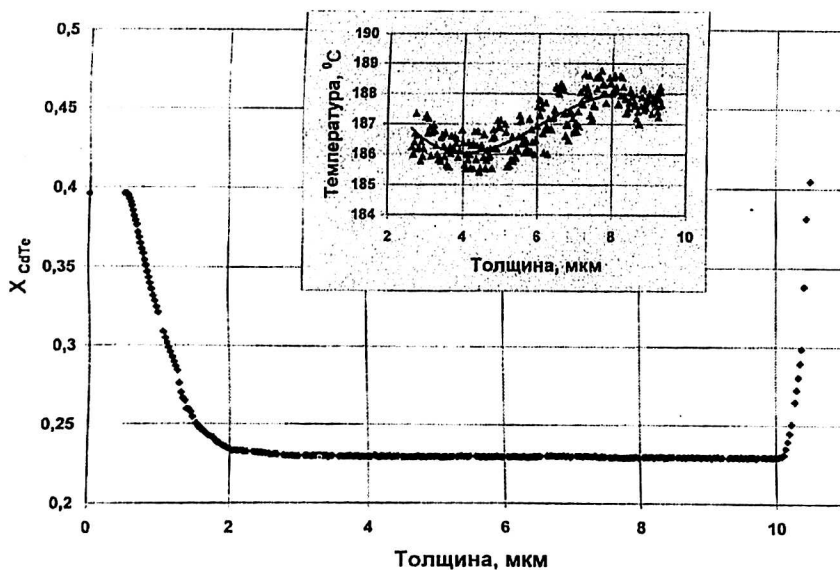


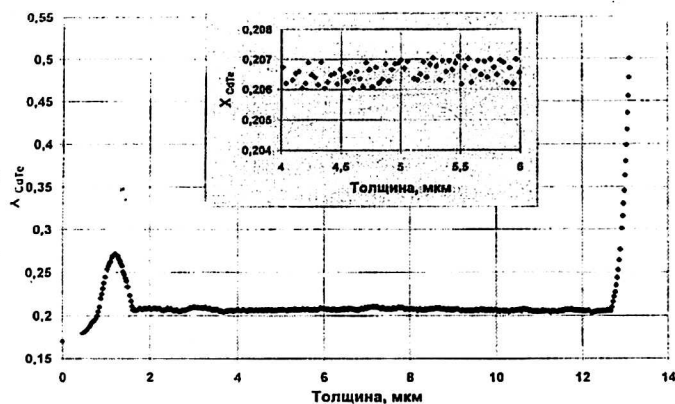
Рис. 1. Зависимость состава ГЭС КРТ МЛЭ с широкозонными варизонными слоями на границах раздела.

На вставке приведена зависимость температуры от времени выращивания. Точность поддержания температуры в процессе роста составляет ± 1 °С

При выращивании ГЭС КРТ МЛЭ, используемых для создания ИК-ФП с пониженным R_s , рост пленки КРТ начинается с составов, более узкозонных, чем в рабочем слое, и составляет $X_{CdTe} = 0,15-0,18$ для ИК-ФП дальнего диапазона 8—14 мкм и $X_{CdTe} = 0,2-0,25$ для ИК-ФП среднего диапазона 3—5 мкм. Возможно начинать рост с составов, близких к $HgTe$. На толщине 1—2 мкм проводится увеличение состава растущего слоя за счет снижения потока теллура до составов, по величине аналогичных в случае начала роста широкозонных варизонных слоев (см. рис. 1). Далее понижается состав до рабочей величины и в конце роста поверхности выращивается широкозонный варизонный слой. Между рабочим и узкозонным слоями образуется "горбик". Типичное распределение состава для ГЭС КРТ МЛЭ с узкозонным слоем приведено на рис. 2.

Рис. 2. Зависимость состава ГЭС КРТ МЛЭ с узкозонным варизонным слоем на границе раздела пленка КРТ—буферный слой.

На вставке приведена зависимость состава КРТ от времени выращивания. Состав при измерении изменяется в интервале $X_{CdTe} = 0,001$



Характеристики ГЭС КРТ МЛЭ

Было проведено исследование однородности состава ГЭС КРТ МЛЭ по площади. Для ГЭС КРТ МЛЭ диаметром 50,8 мм состав измерялся по спектрам пропускания, полученным на спектрометре ИКС-31 с локальностью 20 мм². Измерения проводились в 16 точках, равномерно распределенных по площади. Получены следующие характеристики распределения состава: среднее значение $X_{CdTe} = 0,20171$, стандартное отклонение $\Delta X = 0,000164$, относительное отклонение $\Delta X/X_{CdTe} = 0,08\%$. Для ГЭС КРТ МЛЭ диаметром 76,2 мм измерения состава проводились по спектрам пропускания, полученным на фурье-спектрометре фирмы Bruker. Измерения проводились по двум взаимно перпендикулярным осям с шагом 5 мм и локальностью 0,5 мм². Относительное отклонение по составу $\Delta X/X_{CdTe}$ на ГЭС диаметром 76 мм составило 0,654%. Достигнутые значения однородности на ГЭС КРТ МЛЭ сравнимы с лучшими зарубежными данными, но полученными при вращении подложки [10, 11]. Такая однородность слоев по площади удовлетворяет требованиям многоэлементных линейчатых и матричных ИК-ФП.

Электрические характеристики определялись из измерений эффекта Холла при 77 К методом Ван-дер-Пау.

Непосредственно после выращивания ГЭС КРТ МЛЭ имеют *n*-тип проводимости. Концентрация и подвижность составляют $10^{14}-10^{15}$ см⁻³ и $(1-1,5) \cdot 10^5$ см²/(В·с) для составов $X_{CdTe} \sim 0,20-0,22$ и $(8-50) \cdot 10^{13}$ см⁻³ и $(3-4) \cdot 10^4$ см²/(В·с) — для составов $X_{CdTe} \sim 0,30-0,35$, соответственно.

Время жизни неравновесных носителей в ГЭС КРТ МЛЭ после выращивания достигает 2—3 мкс для $X_{\text{CdTe}} \sim 0,2-0,22$ и 5—15 мкс — для $X_{\text{CdTe}} \sim 0,30-0,35$. Широкозонные варизонные слои на границах ГЭС КРТ МЛЭ создают встроенные электрические поля, которые оттесняют неравновесные носители заряда от поверхностей с повышенной скоростью рекомбинации и выступают в роли пассивирующих покрытий [12, 13]. Стравливание верхнего широкозонного варизонного слоя приводит к снижению времени жизни в 3—5 раз.

Для получения ГЭС КРТ МЛЭ p -типа проводимости проводились термические отжиги в атмосфере гелия. Отжиг при температурах 200—250 °С при низком давлении паров ртути приводит к получению p -типа проводимости с концентрацией дырок $5 \cdot 10^{15} \div 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

ИК-ФП на основе ГЭС КРТ МЛЭ с варизонными слоями

Фоторезисторы

Для изготовления фоторезисторов (ФР), охлаждаемых до температуры жидкого азота, использовались пленки ГЭС КРТ МЛЭ n -типа, а для слабоохлаждаемых фоторезисторов — в основном пленки p -типа. ГЭС КРТ МЛЭ имели широкозонные варизонные слои у границы раздела пленка—подложка и у поверхности. Типичная толщина такого поверхностного слоя составляет $0,5 \div 1 \text{ мкм}$, с изменением состава на поверхности относительно состава рабочего слоя $\Delta X_{\text{CdTe}} = +(0,15 \div 0,3)$ при толщине рабочего слоя в диапазоне $5 \div 15 \text{ мкм}$.

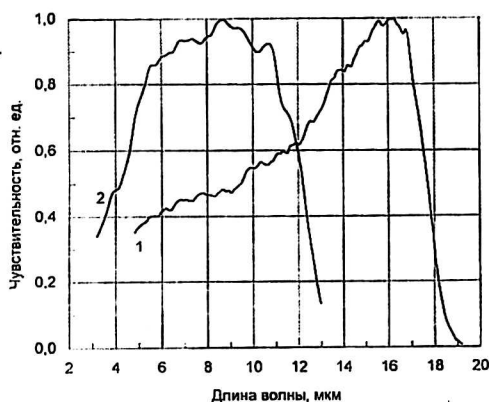
ФР представляют собой мезаструктуры с активной площадью от $0,1 \times 0,1$ до $1 \times 1 \text{ мм}^2$ и изготавливаются по стандартной технологии с использованием низкотемпературной фотолитографии ($T < 90 \text{ °C}$). В целях защиты боковых поверхностей мезаструктур обычно проводилась дополнительная пассивация. Для пассивации использовались слои естественного окисла, SiO_2 , Si_3N_4 , ZnS . Слой ZnS также были использованы в качестве просветляющего покрытия.

Типичные фоточувствительные параметры ФР (77 К) с длинноволновым краем чувствительности (λ_c) в области $10 \div 12 \text{ мкм}$ и менее соответствуют приводимым в литературе аналогичным параметрам ФР, изготовленным из объемных кристаллов и пленок, полученных методом ЖФЭ. Такие ФР в реальных условиях применения работают в режиме ограничения фоном.

Для длинноволновых ФР с λ_c до 20 мкм и более типичная величина D^* составляет порядка $5 \cdot 10^{10} \text{ (см} \cdot \text{Гц}^{1/2})/\text{Вт}$, достигая на лучших более $2 \cdot 10^{11} \text{ (см}^2 \cdot \text{Гц}^{1/2})/\text{Вт}$. На рис. 3, кривая 1, представлена спектральная характеристика фоторезистора с $\lambda_c = 17,7 \text{ мкм}$, с чувствительной площадкой $0,1 \times 0,1 \text{ мм}^2$ и $D^*(\lambda_{\text{max}}, 20 \text{ °}, 1 \text{ Гц}) = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ (см}^2 \cdot \text{Гц}^{1/2})/\text{Вт}$. Резкий длинноволновый край свидетельствует о высокой однородности состава рабочего слоя исходной ГЭС КРТ МЛЭ.

Слабоохлаждаемые ФР ($T = 200 \div 230 \text{ К}$) изготавливались в основном с $\lambda_c = 5-7,5 \text{ мкм}$. Обнаружительная способность для фоторезисторов с $\lambda_c \sim 5 \text{ мкм}$ $D^*(\lambda_{\text{max}}, 60 \text{ °}, 1 \text{ Гц}) = (7 \div 9) \cdot 10^{10} \text{ (см}^2 \cdot \text{Гц}^{1/2})/\text{Вт}$, а с $\lambda_c \sim 6,5 \text{ мкм}$ $D^*(\lambda_{\text{max}}, 60 \text{ °}, 1 \text{ Гц}) = (3 \div 5) \cdot 10^{10} \text{ (см}^2 \cdot \text{Гц}^{1/2})/\text{Вт}$. На основе этих ФР освоено производство фотоприемного модуля, включающего в себя ФР с ТЭО, усилитель, согласованный по шумам, и электронный блок, обеспечивающий необходимую стабилизацию рабочей точки (температуру и напряжение смещения) [14].

Рис. 3. Спектральные зависимости длинноволнового ФР (кривая 1) и типичного ФД матричного ФП (кривая 2).
Рабочая температура 77 К



Периодические измерения параметров ФР при хранении в обычной атмосфере при комнатной температуре показали следующее. D^* для ФР малой площади ($< 10^{-4}$ см²) со временем падает в основном из-за уменьшения чувствительности. В течение года с момента изготовления чувствительность ФР с дополнительной пассивацией диэлектрическими слоями уменьшается в $1,0 \div 1,2$ раза и в $1,0 \div 1,3$ раза — ФР без дополнительной пассивации. После пяти лет хранения наблюдается уменьшение чувствительности в $1,1 \div 2$ раза. Обычно большее падение чувствительности, как правило, наблюдается у ФР с большей толщиной рабочего слоя. Изменение чувствительности ФР с площадью 1×1 мм² через пять лет хранения обычно не превышает нескольких процентов. Существенное изменение параметров фоторезисторов малой площади и большей толщины рабочего слоя может быть объяснено увеличением поверхностной рекомбинации на боковых поверхностях мезоструктур, не защищенных широкозонными варизонными слоями, тогда как для ФР большой площади влияние боковых поверхностей менее существенно.

Фотодиоды

Из ГЭС КРТ МЛЭ с широкозонными варизонными слоями изготавливались одиночные фотодиоды (ФД) различной площади ($1,6 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-2}$ см²), линейки и матрицы $p-n$ -переходов. Была использована планарная технология. На пленках КРТ p -типа формировался слой n -типа при ионной имплантации бора. В некоторых случаях слой n -типа получали при диффузии ртути из анодного окисла. Обычно проводилась пассивация диэлектрическими слоями, которые использовались как просветляющее покрытие и как изолятор под металлические проводники. Исследования показали, что при наличии широкозонных варизонных поверхностных слоев параметры ФД не зависят от дополнительной пассивации диэлектрическими слоями.

Параметры ФД при температуре жидкого азота в целом соответствуют лучшим результатам, приведенным в литературе. Так, значения R_0A достигают $8 \cdot 10^6$, $6,4 \cdot 10^5$ и 150 Ом·см² для фотодиодов с $\lambda_0 = 5,2$, $6,0$ и $10,5$ мкм, соответственно.

Для снижения последовательного сопротивления ФД применялись ГЭС КРТ МЛЭ с тонким узкозонным слоем со стороны подложки [3]. На рис. 3,

кривая 2, приведена спектральная характеристика ФД матричного ФП (формат 256×256, шаг 40 мкм) с $\lambda_c = 12,2$ мкм. Среднее значение R_0A $p-n$ -переходов матрицы равно $6,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, а последовательное сопротивление — $R_f < 80 \text{ Ом}$.

Начаты работы по созданию слабоохлаждаемых ФП на спектральную область 3÷5 мкм из ГЭС КРТ МЛЭ со специальным профилем состава по толщине. На рис. 4 приведены спектральные (а), вольт-амперные (б) характеристики и дифференциальное сопротивление (в) $p-n$ -переходов двух матричных ФП № 1 (кривые 1) и ФП № 2 (кривые 2) (128×128 , шаг 50 мкм) с $\lambda_c = 3,96$ мкм при температуре 210 К, изготовленных на пленках с различным профилем состава. Обе пленки имеют одинаковые состав, толщину, уровень легирования рабочего слоя и одинаковые широкозонные слои на поверхности. Для ФП № 1 были использованы ГЭС КРТ МЛЭ, в которой на границе пленка КРТ — буферный слой имеется узкозонный слой, отделенный от рабочего слоя “горбиком” (см. рис. 2), а также встроенный барьер для неосновных носителей. Видно значительное уменьшение темновых токов и R_f у элементов ФП № 1. Среднее значение пороговой облученности для матрицы ФП № 1 равно $6,38 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/см}^2$, а для ФП № 2 — $1,45 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$ при временах накопления 150 мкс.

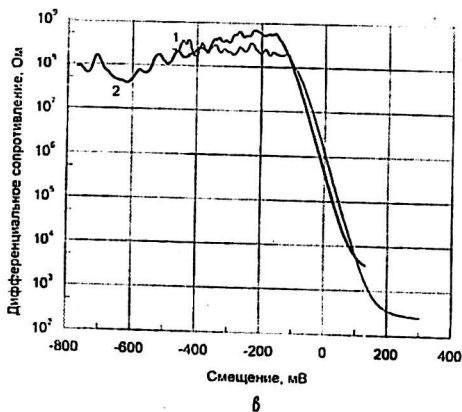
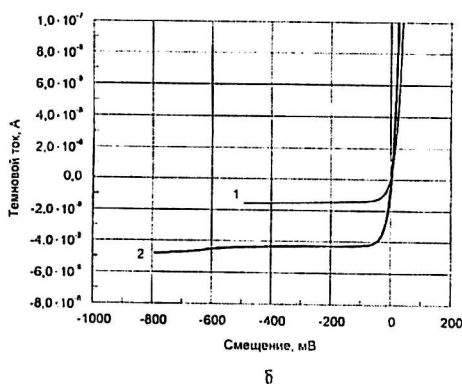
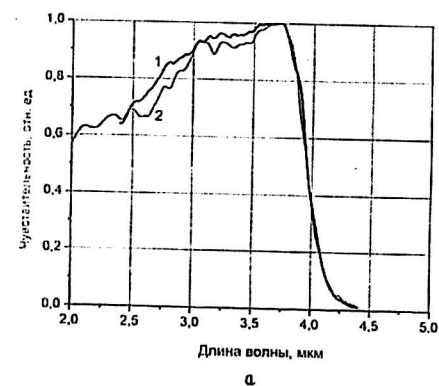


Рис. 4. Типичная зависимость фотоэлектрических параметров ФД двух матричных ФП (128×128 , шаг 50 мкм) с $\lambda_c = 3,96$ мкм:
 а — спектральная зависимость;
 б — вольт-амперная характеристика;
 в — дифференциальное сопротивление.
 Рабочая температура 210 К

На рис. 5 приведены спектральная (а), вольт-амперная (б) характеристики ФД матричного ФП (128×128, шаг 50 мкм) с $\lambda_c = 5,16$ мкм при температуре 210 К и дифференциальное сопротивление (в). Обнаружительная способность достигает $7 \cdot 10^{10}$ (см·Гц^{1/2})/Вт.

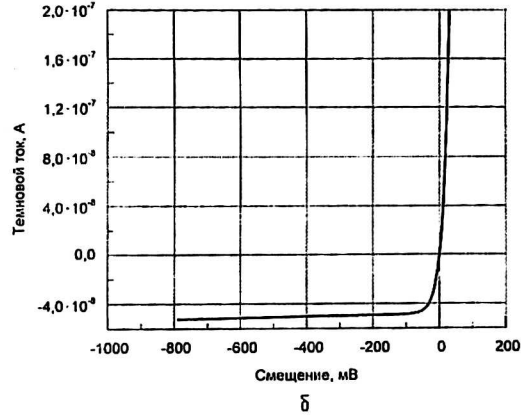
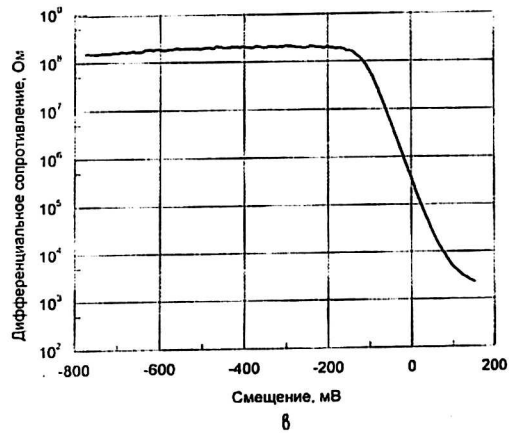


Рис. 5. Типичная зависимость фотоэлектрических параметров ФД матричного ФП (128×128, шаг 50 мкм) с $\lambda_c = 5,16$ мкм:
 а — спектральная зависимость;
 б — вольт-амперная характеристика;
 в — дифференциальное сопротивление.
 Рабочая температура 210 К



Выводы

Разработаны и изготовлена установка с аналитическими средствами контроля процессов роста *in situ* для выращивания ГЭС КРТ МЛЭ, а также технология выращивания ГЭС КРТ МЛЭ с заданным распределением состава по толщине на подложках GaAs диаметрами 51 и 76 мм.

Достигнута высокая однородность состава ГЭС КРТ МЛЭ по площади структуры, которая позволяет изготавливать многоэлементные ИК-ФП. Широкозонные варизонные слои в ГЭС КРТ МЛЭ на границах раздела используются для пассивации. Узкозонные варизонные слои на границе пленка КРТ — буферный слой в ГЭС КРТ МЛЭ используются для снижения последовательного сопротивления диодных фотоприемников. Электрические свойства ГЭС КРТ МЛЭ удовлетворяют самым высоким требованиям при производстве ИК-ФП как фоторезисторов, так и фотодиодов.

Из выращенных ГЭС КРТ МЛЭ изготовлены одиночные ФР, матрицы ФД размерностью до 256×256 элементов, обладающие чувствительностью в спектральных диапазонах 3–5 и 8–14 мкм, работающие при температурах 200 К

и жидкого азота, с фотоэлектрическими параметрами, ограниченными фоновым излучением. Для матриц ФД, работающих при температуре 200 К, сконструированы и изготовлены структуры со специальным распределением состава КРТ по толщине.

Л и т е р а т у р а

1. Pal R., Bhan R. K., Chhabra K. C., Agnihotri O. P. Analysis of effect of surface passivant charges on HgCdTe photoconductive detectors//Semicond. Sci. Techn. 1996. V. 11. P. 231.
2. Musca C. A., Siliquini J. F., Fynn K. A., Nener B. D., Faraone L., Irvine S. J. C. MOCVD-grown widerbandgap capping layers in HgCdTe long-wavelength infrared photodetectors//Ibid. P. 1912.
3. Варавин В. С., Васильев В. В., Захарьяш Т. И. и др. Фотодиоды с низким последовательным сопротивлением на основе варизонных эпитаксиальных слоев $Cd_xHd_{1-x}Te$ //Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 12. С. 69.
4. Васильев В. В., Есаев Д. Г., Кравченко А. Ф. и др. Исследование влияния варизонных эпитаксиальных слоев на эффективность работы фотодиодов на основе твердых растворов $Cd_xHd_{1-x}Te$ //ФТП. 1999. Т. 39. № 7. С. 877.
5. Sidorov Yu. G., Dvoretzky S. A., Yakushev M. V., Mikhailov N. N., Varavin V. S., Liberman V. I. Peculiarities of the MBE growth physics and technology of narrow-gap II—VI compounds//Thin Solid Films. 1997. V. 306. P. 253.
6. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Варавин В. С., Анциферов А. П. Молекулярно-лучевая эпитаксия узкозонных соединений $Cd_xHd_{1-x}Te$. Оборудование и технология//Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 1. С. 39.
7. Svitashov K. K., Dvoretzky S. A., Sidorov Yu. G., Shvets V. A., Martezhov A. S., Nus I. E., Varavin V. S., Liberman V. I., Remesnik V. G. Using ellipsometry at growth of HgCdTe by molecular beam epitaxy//Cryst. Res. Techn. 1994. V. 29. P. 238.
8. Свиташев К. К., Швец В. А., Мардежов А. С., Дворецкий С. А., Сидоров Ю. Г., Варавин В. С. Эллипсометрия in situ при выращивании пленок твердых растворов кадмий—ртуть—теллур методом МЛЭ//ЖТФ. 1995. Вып. 165. С. 110.
9. Болховитянов Ю. Б., Рудая Н. С., Юдаев В. И. Влияние обработки поверхности подложки на начальные стадии образования пленок арсенида галлия//Изв. АН. Сер. Неорг. мат. 1993. Т. 29. № 1. С. 21.
10. He L., Yang J. R., Wang S. L., Guo S. P., Yu M. F., Chen X. Q., Fang W. Z., Qiao Y. M., Zhang Q. Y., Ding R. J., Xin T. I. A study of MBE growth and thermal annealing of p-type long wavelength HgCdTe//J. Cryst. Growth. 1997. V. 176. P. 677.
11. Wijewarnasuriya P. S., Zandian M., Edwall D. D., McLevige W. V., Chen C. A., Pasko J. G., Hildebrandt G., Chen A. C., Arias J. M., D'Souza A. I., Rujirawat S. and Sivananthan S. MBE p-on-n heterostructure detectors on silicon substrates//J. of Electronic Materials. 1998. V. 27. № 6. P. 546.
12. Осадчий В. М., Сусяков А. О., Васильев В. В., Дворецкий С. А. Эффективное время жизни носителей заряда в варизонных структурах на основе CdHgTe//ФТП. 1999. Т. 33. Вып. 3. С. 293.
13. Войцеховский А. В., Денисов Ю. А., Коханенко А. П., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Ю. Г., Якушев М. В. Особенности спектральных и рекомбинационных характеристик МЛЭ-структур на основе CdHgTe//Автометрия. 1998. Вып. 4. С. 47.
14. Васильев В. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Захарьяш Т. И., Клименко А. Г., Марчишин И. В., Овсяк В. Н., Сидоров Ю. Г., Сусяков А. О., Якушев М. В. Фотоприемный модуль для тепловизора//Там же. С. 43.

Авторы выражают свою благодарность Л. Д. Бурдиной, О. И. Малышеву, А. П. Анциферову, Т. И. Захарьяш за помощь при создании фоточувствительных элементов.

Designing and growth of photosensitive structures on basis of MCT MBE for infrared devices

Yu. G. Sidorov, S. A. Dvoretzky, N. N. Mikailov, M. V. Yakushev, V. S. Varavin, V. V. Vasiliev, A. O. Suslyakov, V. N. Ovsyuk
Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

There has been developed and produced the molecular beam epitaxy (MBE) machine with integrated analytical equipment control for growth of A^2B^6 included mercury contained compounds. The technology of mercury cadmium telluride (MCT) heteroepitaxial structures (HS) growth by MBE with given composition distribution throughout the thickness has been developed. HS's MCT MBE on CdZnTe/GaAs were constructed and growing with varigap layers on interfaces of MCT film. These HS MCT MBE were used for fabricating high quality single and multi-elements photoresistors and photodiodes operated in wavelength range 3–5 and 8–12 μm and up to 20 μm and over at 77 K and 200–250 K. The widegap layers at interfaces of MCT film was used as a passivant. The narrowgap layer at interface of MCT film — buffer layer was used for decreasing of serial resistance of diodes. The HS's MCT MBE with special composition distribution throughout the thickness were used for decreasing of dark current of diodes operated at near 200 K.