

На правах рукописи

ТАРЛАН ИБРАГИМ оглы ИБРАГИМОВ

**ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ HgCdTe , ВЫРАЩЕННЫХ В
ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ КАНАЛАХ CdZnTe**

2203.01 – Электроника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии по физике

Баку - 2017

Работа выполнена в Институте Физики имени академика
Г.М. Абдуллаева НАН Азербайджана

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Гусейнов Э.К.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Бархалов Б.Ш.

доктор физико-математических наук,
профессор

Сардарлы Р.М.

Ведущая организация: Бакинский Государственный Университет
(кафедра «Физическая электроника»)

Защита состоится « 28 » 06 2017 г. в « » часов на заседании
Диссертационного Совета Д.01.011 при Институте Физики Национальной
Академии Наук Азербайджана.

Адрес: г. Баку, AZ1143, проспект Г.Джавида 131
e-mail: director@physics.ab.az

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Физики
имени академика Г.М. Абдуллаева НАН Азербайджана.

Автореферат разослан « » 2017 года.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

Д.Г.АРАСЛЫ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Все передовые страны мира интенсивно развивают производство устройств регистрации инфракрасного излучения, которые используются в различных сферах: медицине, транспорте, строительстве, экологическом мониторинге, пилотажно-навигационных системах. Подавляющее большинство современной аппаратуры ИК диапазона спектра создается с использованием узкозонных полупроводниковых твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Благодаря возможности плавного изменения ширины запрещенной зоны (E_g) с изменением химического состава, диапазон спектральной чувствительности фотоприемников, изготовленных на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, перекрывает полосы поглощения большинства газов, имеющих в атмосфере, и включает в себя основные окна прозрачности атмосферы, в том числе в средневолновой (3–5 мкм) и длинноволновой (8–14 мкм) областях ИК спектра. Широкие возможности управления электрофизическими свойствами позволяют получать $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с концентрацией и подвижностью носителей заряда, обеспечивающими возможность создания как фоторезисторов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ n-типа, так и фотодиодов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ p-типа проводимости с высокими эксплуатационными характеристиками. Актуальным направлением развития ИК-техники является увеличение числа чувствительных элементов фотоприемников (ФП) и переход от многорядных сканируемых систем крупноформатным матричным фотоприемным устройствам (МФПУ) "смотрящего" типа, в которых каждому элементу изображения соответствует свой фоточувствительный элемент. Исходя из этого, выдвигаются требования к фоточувствительному материалу, который должен иметь высокую однородность распределения состава, электрофизических и фотоэлектрических свойств на большой площади, обладать высоким структурным совершенством и качеством поверхности, пригодным для приборного применения. В случае $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ перечисленным требованиям наиболее полно удовлетворяют эпитаксиальные технологии выращивания. В настоящее время практически весь объем выпуска фоторезисторов со спектральной чувствительностью в области 8÷14 мкм базируется на использовании объемных кристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ n-типа проводимости. Новые возможности для совершенствования

технологии изготовления многоэлементных фоторезисторов (ФР) и снижения их стоимости открывает использование эпитаксиальных структур со слоем $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ n-типа проводимости и толщиной $8 \div 50$ мкм, высоким качеством поверхности, электрофизическими и фотоэлектрическими свойствами на уровне объемных кристаллов. На сегодняшний день в мире активно развиваются три основных метода эпитаксии $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$: жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ), молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений (ГФЭМОС). Несмотря на то, что МЛЭ и ГФЭМОС обеспечивают получение эпитаксиальных слоев (ЭС) большой площади с зеркальной поверхностью, основным промышленным методом выращивания ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в мире является ЖФЭ. При выращивании однослойных структур, которые используются для изготовления многоэлементных ФР и крупноформатных матричных ФПУ, на передний план выходят такие достоинства метода как высокая производительность, простота технологического оборудования, высокая чистота ЭС, дополнительная очистка от ряда примесей при кристаллизации из раствора-расплава.

Опережающие темпы практических разработок по $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в области освоения дальнего ИК диапазона и относительно быстрая замена в последние десятилетия объемных кристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, в силу их специфических недостатков и экономической целесообразности, на эпитаксиальные слои способствовало образованию некоторого разрыва между уровнями разработок высокоэффективных фотоприемников, создаваемых на основе этих материалов, и научных исследований ряда физических явлений в них. К этим явлениям, можно отнести рекомбинационные процессы в эпитаксиальных слоях. Механизмы рекомбинации, доминирующие в рабочем интервале температур, определяют время жизни носителей тока, являющееся одним из основных параметров фоточувствительного полупроводникового материала, и в конечном итоге - характеристикой фотоприемника. В силу противоречивого характера литературных данных относительно механизмов рекомбинации в эпитаксиальных пленках $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ природа центров рекомбинации Шокли–Рида в эпитаксиальных пленках и фоточувствительных структурах, созданных на их основе, в настоящее время все еще остается неустановленной и на данный момент этот

вопрос остается открытым. Поэтому проведение исследований в этой области носит принципиальный характер.

Неохлаждаемые фотоэлектромагнитные приемники излучения (ФЭМ-детекторы) на основе твердых растворов теллурида кадмия ртути составов $x < 0,2$ находят применение в оптоэлектронных системах с использованием излучения CO_2 -лазера с длиной волны 10,6 мкм. К преимуществам таких детекторов можно отнести отсутствие внешнего электрического питания, что снижает уровень шумов и значительно уменьшает тепловую нагрузку на фотоприемник, а также высокое быстродействие, что позволяет использовать их в гетеродинных системах регистрации. К моменту постановки данной работы исследования ФЭМ-эффекта в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ проводились в объемных монокристаллах, а ФЭМ-детекторы в основном производились только на основе объемных монокристаллов. Поэтому проведение исследований по ФЭМ-эффекту в эпитаксиальных структурах, а также возможности использования уникальных физических свойств эпитаксиальных слоев для усовершенствования характеристик ФЭМ-детекторов является актуальной задачей. В этой связи, принципиальное, практическое и научное значение приобретают проведение теоретических и экспериментальных исследований зависимости основных параметров неохлаждаемого ФЭМ детектора (удельная обнаружительная способность, вольтовая чувствительность) от уровня легирования акцепторной примеси и приложенного магнитного и электрических полей с учетом уникальных особенностей эпитаксиальных слоев.

Подробное изучение затронутых проблем позволяет решать ряд актуальных задач физики узкозонных полупроводников и приборов на их основе, открывает перспективы создания новых типов высокочувствительных ИК-фотоприемных устройств и способствует научному обоснованию прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих высокую эффективность и надежность приборов электронной техники

Целью диссертационной работы является разработка новых физических принципов создания ИК-фотоприемников на основе эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в приповерхностных каналах полупроводниковой подложки $\text{Cd}_{0,96}\text{Zn}_{0,04}\text{Te}$ и установление их электрических, фотоэлектрических и оптических параметров.

Основные задачи. Для достижения намеченной цели были поставлены и выполнены следующие задачи:

- разработать методику создания узких поверхностных канавок в подложке $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ и усовершенствовать физико-химические основы технологии выращивания эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в этих канавках;

- исследовать электрофизические и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных структур, выращенных на поверхности и в приповерхностных каналах подложки;

- использовать наличие квазиэлектрического поля в варизонной эпитаксиальной структуре для разработки физических принципов создания многоканального формирователя сигнала изображения;

- оптимизировать электрофизические параметры эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, обеспечивающих максимальную чувствительность неохлаждаемых ИК детекторов для спектральных диапазонов 3-5 и 8-12 мкм.

Научная новизна.

Впервые разработана методика выращивания высококачественных эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, ($x=0.2-0.22$) внутри узких канавок в изолирующей подложке $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$.

Получено аналитическое выражение для кривой ликвидуса Te -угла фазовой диаграммы состояния системы Hg-Cd-Te , которое позволило получить слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с более точными значениями x .

Установлено, что варизонный слой, формирующийся между fotocувствительным узкозонным слоем $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ и подложкой $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$, значительно снижает поверхностную рекомбинацию на границе их раздела и обуславливает особенности их фотоэлектрических свойств.

Разработан новый тип матричных ИК-детекторов на основе полосок из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных в канавках приповерхностной области изолирующей подложки $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$.

Проведен теоретический анализ модели неохлаждаемого ФЭМ-детектора на основе разработанных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ методом оптимизации параметров и показано, что оптимальное акцепторное легирование $p=(5-6)n_i$ позволяет значительно повысить как вольтовую чувствительность, так и удельную обнаружительную способность неохлаждаемого ФЭМ-детектора. Теоретические расчеты были

подтверждены экспериментально полученными данными на основе макетного образца. Реализованные значения фотоэлектрических параметров лабораторного образца ФЭМ - детектора при $T = 295$ К и при значении индукции магнитного поля $B \approx 0.4$ Тл составили: длина волны максимума чувствительности $\lambda_m \approx 6.5-7.0$ мкм, вольтовая чувствительность $S_{\lambda_m}^* = 0.3 - 0.5$ В/Вт, удельная обнаружительная способность $D_{\lambda_m}^* = (0.5 - 1.0) \cdot 10^8$ см $\cdot$ Гц $^{1/2}$ Вт $^{-1}$.

На основе эпитаксиальных структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ созданы высокочувствительные неохлаждаемые фоторезисторы типа «меандр» и полученные значения составили для вольтовой чувствительности $S_{\lambda_{max}}^* = 15-20$ В/Вт и удельной обнаружительной способности $D_{\lambda_{max}}^* = (0.7-1.0) \cdot 10^9$ см Гц $^{1/2}$ Вт $^{-1}$ для $\lambda_{max} = 4.6-5$ мкм при $T = 295$ К. Для состава $x = 0.2$ реализованные значения фотоэлектрических параметров при $T = 295$ К оказались: $\lambda_m = 7-7.3$ мкм, $S_{\lambda_m}^* \approx (1-2)$ В/Вт, $D_{\lambda_m}^* \approx (1-2) \cdot 10^7$ см Гц $^{1/2}$ Вт $^{-1}$.

Практическая значимость проведенных исследований.

Созданы высокочувствительные неохлаждаемые ИК-детекторы на диапазон 3-5 и 8-14 мкм на основе высококачественных эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$, ($x=0.2-0.3$), выращенных в изолирующей подложке $Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te$, которые могут быть использованы в широких областях ИК-оптоэлектроники.

Научные положения, выносимые на защиту:

Методика выращивания высококачественных эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$, ($x=0.2-0.22$) внутри узких канавок в изолирующей подложке $Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te$.

Аналитическое выражение $T = 1144 - 845.4y + 672.6z$ для кривой ликвидуса Te -угла фазовой диаграммы состояния системы $Hg-Cd-Te$, которое позволило получить слои $Cd_xHg_{1-x}Te$ с более точными значениями x .

Варизонный слой, формирующийся между фоточувствительным узкозонным слоем $Cd_xHg_{1-x}Te$ и подложкой $Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te$, значительно снижает поверхностную рекомбинацию на границе их раздела и обуславливает некоторые особенности фотоэлектрических свойств.

Принцип создания матричных ИК-детекторов на основе полосок из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных в канавках приповерхностной области изолирующей подложки $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ значительно упрощает технологию изготовления надежных высокочувствительных элементов и структур на их основе.

Теоретический анализ модели неохлаждаемого ФЭМ-детектора на основе разработанных структур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ методом оптимизации параметров показал, что оптимальное акцепторное легирование $p=(5-6)n_i$ позволяет значительно повысить как вольтовую чувствительность, так и удельную обнаружительную способность неохлаждаемого ФЭМ-детектора. Теоретические расчеты были подтверждены экспериментально полученными данными на основе макетного образца. Реализованные значения фотоэлектрических параметров лабораторного образца ФЭМ - детектора при $T = 295 \text{ K}$ и при значении индукции магнитного поля $B \approx 0.4 \text{ Тл}$ составили: длина волны максимума чувствительности $\lambda_m \approx 6.5-7.0 \text{ мкм}$, вольтовая чувствительность $S_{\lambda m}^* = 0.3 - 0.5 \text{ В/Вт}$, удельная обнаружительная способность $D_{\lambda max}^* = (0.5 - 1.0) \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Харьковской научной ассамблее, “Высоко чистые металлические и полупроводниковые материалы”, ISPM-8, г. Харьков, 2002, XIII Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии РЭМ-2003, г. Москва, 2003, 4-ой Международной Конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов», г. Харьков, 2003, 4-й Международной Конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники, г. Санкт-Петербург, 2004, Международной конференции ICTM-17, Баку, 2010, XVIII-XXI Международных Конференциях по фото-электронике и приборам ночного видения, (Москва, 2004-2010).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 27 печатных работ в республиканской и зарубежной печати, из них 4 статьи опубликованы в журналах, имеющих международный индекс цитирования (SCI).

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 153 страницах, иллюстрируется 57 рисунком, сопровождается 2 таблицами и включает в себя введение, 4 главы, заключение и список используемой литературы, включающий 152 наименования.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость диссертации.

В первой главе приведены литературные данные о физико-химических, оптических, электрофизических и фотоэлектрических свойствах твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Подробно рассмотрены особенности метода ЖФЭ как наиболее перспективного для разработки и организации производства ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Особое внимание уделено вопросам поддержания стабильности состава жидкой фазы и удаления остатков раствора-расплава с поверхности, выращенных ЭС при использовании различных вариантов метода ЖФЭ. Проведен анализ литературных данных о фазовых равновесиях в системе Cd-Hg-Te применительно к выбору условий проведения ЖФЭ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. На основе обзора сформулированы требования к ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ пригодных для создания многоэлементных фоторезисторов и фотодиодных матричных фотоприемников приводится постановка задач, которые необходимо было решить для достижения целей работы.

Эпитаксиальные методы выращивания $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ по сравнению с объемными методами, дают возможность выращивать эпитаксиальные слои большой площади ($>30 \text{ см}^2$) и сложные многослойные структуры с крутыми и сложными профилями состава и профилями легирования полупроводника, необходимые для достижения высоких рабочих характеристик фотодетекторов. Среди эпитаксиальных методов наиболее развитым методом выращивания качественных однородных пленок и многослойных структур является жидкофазная эпитаксия.

Жидкофазную эпитаксию можно проводить при относительно низких температурах (400-500°C). Этим методом получают слои

многокомпонентных систем и многослойные эпитаксиальные структуры необходимой конфигурации (с помощью маски). Все методики ЖФЭ обусловлены соотношениями между температурой и растворимостью, определенными на основании фазовых диаграмм, и динамическими процессами диффузии, конвекции и зародышеобразования, зависящими от используемой установки и методики.

Состав эпитаксиального слоя $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ определяется составом $(\text{Cd}_z\text{Hg}_{1-z})_{1-y}\text{Te}_y$ раствора-расплава, из которого он выращивается. При подборе соотношения компонент раствора, выраженного формулой $(\text{Cd}_z\text{Hg}_{1-z})_{1-y}\text{Te}_y$ необходимо определить температуру T_L фазового равновесия (ликвидус), и состав твердой фазы, выражаемой формулой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ которая находится в фазовом равновесии с жидким раствором при температуре T_L и учесть давления насыщенных паров ртути и других компонентов раствора. точность с которой можно получить заданную величину состава эпитаксиального слоя определяется правильностью подбора соотношения компонент раствора-расплава Hg-Cd-Te , а также с методикой его синтеза и гомогенизации.

Во второй главе приводятся результаты разработки методики подготовки подложки $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ к эпитаксии, а также технологических основ ЖФЭ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ из растворов-расплавов на основе Te в запаянной кварцевой ампуле с удалением раствора-расплава с помощью разработанного с участием диссертанта нового устройства для ЖФЭ. Его применение в целом приводит к улучшению качества поверхности эпитаксиальных слоев по сравнению со слоями, получаемыми в обычных устройствах. Здесь же, рассмотрены физико-химические основы ЖФЭ. На основе анализа результатов исследований фазовых диаграмм системы Cd-Hg-Te выведено новое уравнение для теллурического угла фазовой диаграммы состояния системы Hg-Cd-Te , которое лучше согласуется с экспериментально полученными данными по сравнению с аналогичными выражениями, полученными другими авторами. Представлено описание методики проведения синтеза раствора-расплава. Проведена численная оценка влияния этого процесса на температуру фазового равновесия из данного раствор-расплава и на состав эпитаксиальных слоев, выращиваемых из него. Представлена методика получения приповерхностных каналов в виде параллельных и равномерно

удаленных друг от друга канавок с мелкими поперечными размерами.

В третьей главе представлены результаты исследований морфологии поверхности, электрических, фотоэлектрических и оптических свойств, выращенных эпитаксиальных слоев, а также структур, сформированных в приповерхностных каналах подложки $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$. Проведена подробная классификация типичных дефектов, наблюдающихся в эпитаксиальных слоях, а также описаны механизмы их формирования. Методом послойного травливания и измерения спектра оптического пропускания выявлена варизонность (наличие градиента запрещенной зоны по толщине эпитаксиального слоя) приповерхностного слоя установлено, что эпитаксиальный слой толщиной до 5-10 мкм, примыкающий к стенкам и дну канавок, по всему контуру поперечного сечения канавки имеет резко выраженную варизонную структуру ширины запрещенной зоны с профилем распределения состава x , имеющим три области, отличающиеся различными градиентами (640 эВ/см; 80 эВ/см и 0,002 эВ/см) с постепенным выравниванием состава до $x=0,20$ во внутренней области канавок, таким обусловленным обогащением границы раздела подложка-раствор кадмием за счет взаимодиффузии Cd из подложки в эпитаксиальный слой и ртути из эпитаксиального слоя в подложку в процессе эпитаксиального роста. Показано, что пространственная неоднородность запрещенной зоны вызывает формирование квазиэлектрического поля которое сильно воздействует на основные фотоэлектрические свойства структуры.

Выращенные эпитаксиальные слои имели дырочный тип проводимости. Концентрация дырок $1 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ при 77К После отжига слои имели электронный тип проводимости и при малых значениях магнитного поля (до 0,05 Тл) эффективная концентрация (величина $1/|qR_n|$, где q -элементарный заряд) составлял $(2-5) \cdot 10^{14} \text{см}^{-3}$, а эффективная подвижность ($\mu_n = |\sigma R_n|$) составляет $4 \cdot 10^4 - 1.3 \cdot 10^5 \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при температуре 77 К.

В частности, независимо от градиента концентрации в растворе, из-за больших коэффициентов взаимной диффузии Cd и Hg в твердой фазе по обе стороны границы раздела подложка-эпитаксиальный слой происходит взаимодиффузия этих элементов. В подложке CdZnTe идет процесс твердотельного замещения Cd атомами Hg, а в нарастающей пленке HgCdTe происходит противоположный по направлению процесс замещения атомов ртути

атомами Cd. Механизм формирования градиентного концентрационного профиля в структуре является комбинацией двух механизмов: кристаллизации при изменении температуры раствора и взаимодиффузии элементов между подложкой и растущим слоем.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию и разработке неохлаждаемых ФП и ФЭМ детекторов на основе эпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ для областей спектра 2-6 и 8-14 мкм. Проведена количественная оценка уровня акцепторного легирования монокристаллов и эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, обеспечивающего оптимизацию фотоэлектрических параметров неохлаждаемых ИК детекторов для спектральных диапазонов 3-5 и 8-12 мкм. Представлены результаты совместных исследований фотопроводимости и ФЭМ эффекта в образцах эпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ р-типа с $x = 0.25$ и $x = 0.2$ легированных медью, выбранной в качестве акцепторной примеси при разных температурах. Определены значения времени жизни неравновесных носителей заряда и амбиполярной длины диффузии при комнатной температуре.

На рис.1. представлены зависимости вольтовой чувствительности $R_\lambda(z)$ и удельной обнаружительной способности $D_\lambda^*(z)$, вычисленные при длине волны $\lambda=6,7$ мкм ($h\nu \approx 1,2 E_g$).

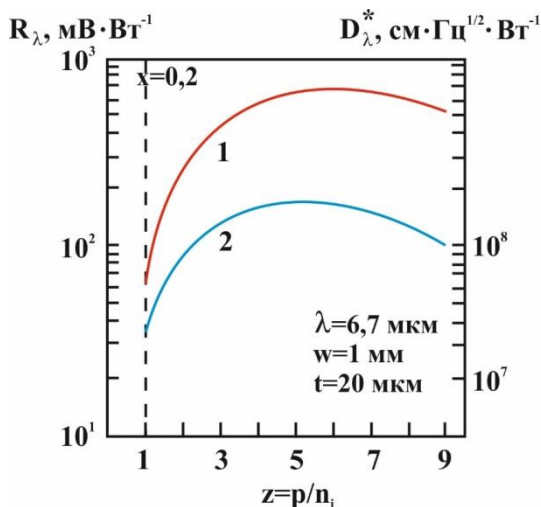


Рис. 1. Расчетные зависимости напряжения фотоотклика (1) и приведенной обнаружительной способности (2) ФЭМ-детектора от уровня акцепторного легирования.

При вычислениях были приняты значения $\eta \approx 1$ для квантовой эффективности и $S_1 = 0$ (при не очень высоких значениях скорости поверхностной рекомбинации величина находится в пределах 10^{-2} - 10^{-3}). Как видно из рис.1, оптимальный уровень акцепторного легирования лежит в области $p \approx (5-6)n_i$.

Обычно ФЭМ-детекторы на основе собственных узкозонных монокристаллов КРТ при $T=300$ К имеют очень слабую чувствительность. Оптимальное акцепторное легирование позволяет существенно повысить значения вольтовой чувствительности и обнаружительной способности ФЭМ-детектора. Чувствительность резко возрастает вблизи длинноволновой границы ФЭМ-эффекта (приблизительно на 25-30 %) по сравнению с коротковолновой областью, $kL \gg 1$. Соответственно, при слабом акцепторном легировании граница ФЭМ-эффекта из-за увеличения амбиполярной диффузионной длины, легко сдвигается в длинноволновую сторону. Необходимо отметить, что этот оптимизационный метод применим как для ФЭМ, так и для неохлаждаемых фотопроводящих ИК-детекторов на основе узкозонных кристаллов КРТ.

На рис. 2. приведены спектральные характеристики фотопроводимости легированных медью образцов $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с $x = 0.25$ (кривая 1) и $x = 0,2$ (кривая 2).

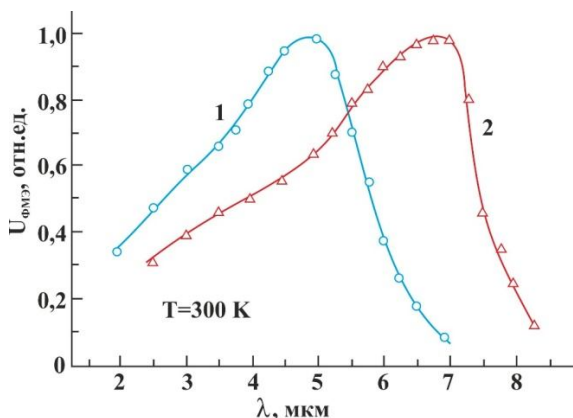


Рис. 2. Спектральное распределение фотопроводимости для $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$: 1 – $x = 0.25$; 2 – $x = 0.2$

При комнатной температуре максимум спектральной чувствительности для образца с $x = 0.25$ расположен в области 4.5-5 мкм, а для образца с $x = 0.2$ - в области 7.0-7.3 мкм. Значение ширины запрещенной зоны E_g при $T = 300$ К, найденное из зависимости $U_s(\lambda)$, составило $E_g \approx 0.23$ эВ для состава $x \approx 0.25$ и $E_g \approx 0.16$ эВ для состава $x \approx 0.2$.

Сделан вывод, что достаточный уровень фотосигнала в области 3-6 мкм и 5-8 мкм и линейная зависимость его от интенсивности света позволяют считать изучаемый материал перспективным для создания на его основе неохлаждаемых ИК-детекторов на среднюю ИК-область спектра. Данные по конструкции и фотоэлектрическим параметрам и характеристикам разработанных ИК-детекторов содержатся в заключительном параграфе диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Варизонный слой, формирующийся между фоточувствительным узкозонным слоем $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ и подложкой $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$, значительно снижает поверхностную рекомбинацию на границе их раздела и обуславливает некоторые особенности фотоэлектрических свойств. В частности, спектральная локализация инверсии знака фотоотклика эпитаксиальных структур объясняется в рамках модели фотопроводимости, учитывающей воздействие этого квазиэлектрического поля.

2. Теоретический анализ модели неохлаждаемого ФЭМ-детектора на основе разработанных структур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ методом оптимизации параметров показал, что оптимальное акцепторное легирование $p = (5-6)n_i$, позволяет значительно повысить как вольтовую чувствительность, так и удельную обнаружительную способность неохлаждаемого ФЭМ-детектора. Теоретические расчеты были подтверждены экспериментально полученными данными на основе макетного образца. Реализованные значения фотоэлектрических параметров лабораторного образца ФЭМ - детектора при $T = 295$ К и при значении индукции магнитного поля

$\lambda_m \approx 0.4$ Тл составили: длина волны максимума чувствительности $\lambda_m \approx 6.5-7.0$ мкм, вольтовая чувствительность $S_{\lambda_m}^* = 0.3 - 0.5$ В/Вт, удельная обнаружительная способность $D_{\lambda_m}^* = (0.5 - 1.0) \cdot 10^8$ см $\cdot$ Гц $^{1/2}$ Вт $^{-1}$.

3. На основе эпитаксиальных структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ созданы высокочувствительные неохлаждаемые фоторезисторы типа «меандр» и полученные значения составили для вольтовой чувствительности $S_{\lambda_m}^* = 15-20$ В/Вт и удельной обнаружительной способности $D_{\lambda_m}^* = (0.7-1.0) \cdot 10^9$ см Гц $^{1/2}$ Вт $^{-1}$ для $\lambda_{\max} = 4.6-5$ мкм при $T = 295$ К. Для состава $x = 0.2$ реализованные значения фотоэлектрических параметров при $T = 295$ К оказались: $\lambda_m = 7-7.3$ мкм, 1-2) В/Вт, $D_{\lambda_m}^* \approx (1-2) \cdot 10^7$ см Гц $^{1/2}$ Вт $^{-1}$.

4. Из совместных исследований фотопроводимости и ФЭМ эффекта при $T=295$ К определены значения времени жизни неравновесных носителей заряда ($\tau \approx (4-6) \cdot 10^{-8}$ сек для $x = 0.25$ и $\tau \approx 0.8 \cdot 10^{-8}$ сек и для $x = 0.2$ и длины диффузии ($L_D \approx 12-15$ мкм для $x = 0.25$ и $L_D \approx 5-7$ мкм для состава $x = 0.2$) на образцах эпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.2$ и 0.25) р-типа проводимости, легированием медью до уровня от $2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ до $8 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$.

5. Выведено аналитическое выражение $T = 1144 - 845.4y + 672.6z$ для кривой ликвидуса Te -угла фазовой диаграммы состояния системы Hg-Cd-Te , которое позволило получить слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с более точными заданными значениями x .

6. Разработана методика выращивания высококачественных эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, ($x=0.2-0.22$) внутри узких канавок в изолирующей подложке $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$.

7. Исследованы особенности и установлены механизмы формирования микрорельефа и ростовых дефектов на поверхности ЭС. Проведена классификация дефектов и экспериментальным путем установлено, что формирование дефектов эпитаксиальных слоев напрямую связано с дефектообразованием поверхности подложки под действием паров ртути на этапе гомогенизации раствора-расплава

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Эминов Ш.О., Ибрагимов Т.И. Цветной ИК-фотоприемник на основе / $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ Fizikanın aktual Problemləri, II Respublika elmi konfransı, Bakı, oktyabr 2001, с.30-31
2. Эминов Ш.О., Гусейнов Э.К., Раджабли А.А., Ибрагимов Т.И. Особенности роста ЖФЭ слоев из InSb / Харьковская научная ассамблея, Высокочистые металлические и полупроводниковые матер. ISPM-8, Харьков, 2002 с.20-22
3. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Мухтарова Р.И., Ибрагимов Т.И. Влияние термической обработки на характеристики фотодиодов, изготовленных из сплава теллурид ртути – теллурид кадмия / 4-я Межд. Научно-техн. Конф. «Оборудование и технология термической обработки металлов и сплавов», Харьков, 2003 г., 19-23 мая
4. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Ибрагимов Т.И. Зависимость состояния морфологии поверхности эпитаксиальных пленок InSb от условий роста / Тезисы докладов XIII Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии РЭМ-2003» Москва, 2003, стр.111
5. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Дадашев А.А., Ибрагимов Т.И. Совместное изучение ВАХ и продольной фотопроводимости в эпитаксиальных структурах из InSb // AMEA Xəbərləri Fizika-Riyaziyyat və tex. elm. seriyası, 2003, №2, s.76-79
6. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Ибрагимов Т.И. Воздействие импульсного гамма-излучения и импульсного нейтронного облучения на фотоэлектрические свойства ионно – имплантационных p-n переходов из HgCdTe / Сб.трудов Национальной Конф. РСНЭ, Москва, 2003
7. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Гусейнов Ф.Х., Ибрагимов Т.И. Оптическое пропускание и фотопроводимость в эпитаксиальных слоях InSb / Сб. трудов 4-й Международной Конференции. Аморфные и микрокристаллические полупроводники, Санкт-Петербург, 2004, с.378-379
8. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Ибрагимов Т.И. Воздействие ионизирующего излучения на фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе CdHgTe / Тезисы докладов XVIII Межд. Конф.

по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2004, стр.99

9. Gaziyeve F.N., Nasibov I.A., Huseynov E.K., Ibrahimov T.I. HgCdTe based PEM detector for middle of IR-spectrum / 18th International Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices, Moscow, 2004, vol. 5834, pp. 123-132

10. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Ибрагимов Т.И. Влияние радиационного облучения на характеристики диффузионных и имплантационных фотодиодов из KPT // Azərb.MEA "Fizkia-2005" Beynəlxalq Konfrans, məqalələr toplusu, Bakı, 2005, s.684-687,

11. Эминов Ш.О., Гусейнов Э.К., Раджабли А.А., Исмаилов Н.Д., Ибрагимов Т.И. Влияние отжига на свойства эпитаксиальных слоев Cd HgTe с анодным окислением / XIX между. н.-т. конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2006, с.49

12. Eminov Sh.O., Radjabli A.A., Ibragimov T. I. Growth features and surface morphology of Insb LPE layers / Сб.трудов 5-й Между. Конф. Аморфные и микрокристаллические полупроводники, Санкт-Петербург, 2006

13. Gaziyeve F.N., Nasibov I.A., Huseynov E.K., Ibrahimov T.I. HgCdTe based PEM detector for middle range of IR-spectrum // Applied Physics, Moscow, 2006, vol. №1, pp. 64-69

14. Huseynov E.K., Eminov Sh.O., Radjabli A.A., Ismayilov N.D., Ibragimov T.I. Thermal annealing impact on the properties of Cd_xHg_{1-x}Te epitaxial layers with anodic oxidation // Proceedings of SPIE, 19th Int. Conf. On Photoelectronics and Night Vision Devices, Moscow, 2007, vol. 6636

15. Эминов Ш.О., Гусейнов Э.К., Раджабли А.А., Ибрагимов Т.И. Воздействие ионизирующего излучения на электрические и фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе Cd_xHg_{1-x}Te // Прикладная физика, Москва, 2007, №4, с. 115-118

16. Эминов Ш.О., Гусейнов Э.К., Раджабли А.А., Исмаилов Н.Д., Ибрагимов Т.И. Термоконверсия типа проводимости анодно-окисленных эпитаксиальных слоев Cd_xHg_{1-x}Te // АМЕА Хəbərləri Fizika-Riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, 2007, cild XXVII, № 5, s.99-102

17. Гусейнов Э.К., Алиев А.А., Исмаилов Н.Д., Насибов И.А., Ибрагимов Т.И. Неохлаждаемый ФЭМ-детектор на основе CdHgTe

для приема CO_2 – лазерного излучения // Прикладная физика, Москва, 2007, №2, с. 106-110

18. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Аббасов И.И., Ибрагимов Т.И. Характеристики эпитаксиальных слоев HgCdTe , полученных методом жидкофазной эпитаксии / Fizikanın müasir problemləri, I Respublika Konfransı, Bakı, 2007, s. 150-152

19. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Исмаилов Н.Д., Ибрагимов Т.И. Влияние отжига на свойства эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с анодным окислением // Прикладная физика, Москва, 2008, №4, с. 132-135

20. Эминов Ш.О., Гусейнов Э.К., Раджабли А.А., Мамедова Э.А., Мухтарова Р.И., Ибрагимов Т.И. Кассета для жидкофазной эпитаксии в горизонтальном реакторе // АМЕА Хəбərləri Fizika-Riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, 2009, №5, s. 148-152

21. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Дадашев А.А., Магеррамов А.Б., Ибрагимов Т.И. Зависимость состояния поверхности подложек CdZnTe от методики полирования // АМЕА Хəбərləri Fizika-Riyaziyyat və texnika elmləri seriyası 2010, cild XXX, №2, s. 148-154

22. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Ибрагимов Т.И. Влияние методики полирования подложек CdZnTe на жидкофазную эпитаксию слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // Неорганические материалы, 2010, т. 46, №, с. 796-800

23. Эминов Ш.О., Гусейнов Э.К., Раджабли А.А., Алиев А.А., Ибрагимов Т.И. Особенности роста ЖФЭ слоев HgCdTe / Тезисы докладов XXI межд. н.-т. конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2010, с. 203-204

24. Huseynov E.K., Eminov Sh.O., Rajabli A.A., Mamedova E.A., Ibrahimov T.I. The characteristic study of InSb epitaxial layers grown by LPE // Azerbaijan Journal of Physics, 2010, vol. XVI, No. 2, pp. 42-46

25. Huseynov E.K., Eminov Sh.O., Rajabli A.A., Ismaylov N.J., Ibrahimov T.I. Growth features of HgCdTe LPE layers / International Conference ICTM-17, Baku, 2010

26. Huseynov E.K., Eminov Sh.O., Rajabli A.A., Ibrahimov T.I. Valuation of composition reproducibility of HgCdTe epitaxial layers grown in novel liquid phase epitaxy apparatus // Japanese Journal of Applied Physics, 2011, v.50, p. 05FB16-1-05FB16-2

27. Эминов Ш.О., Алиев А.А., Насибов И.А., Ибрагимов Т.И., ИК-фотоприемник на основе HgCdTe с варизонными

эпитаксиальными слоями, выращенными в приповерхностном слое CdZnTe подложки // Azərb. MEA Xəbərləri Fizika-Texnika və Riyaziyyat elmləri Seriyası, 2017, cild XXXVII, №2, s. 56-63

***CdZnTe səthyanı kanallarında yetişdirilmiş HgCdTe epitaksial
təbəqələrinin fotoelektrik xassələri***

XÜLASƏ

Dissertasiya işi CdZnTe səthyanı kanallarında yetişdirilmiş HgCdTe epitaksial təbəqələrinin fotoelektrik xassələrinin tədqiqinə həsr olunub.

CdZnTe altlığının səthində yaradılmış kanallarda HgCdTe epitaksial təbəqələrinin yetişdirmə texnologiyasının fiziki-kimyə əsasları işlənilib hazırlanmışdır.

Müəyyən olunmuşdur ki, CdZnTe səthyanı kanallarında yetişdirilmiş epitaksial təbəqələr, təbəqənin qalınlığı (640 eV/cm, 80 eV/cm, 0.002 eV/cm) boyu qadağan olunmuş zona eninin kəskin fəza müxtəlifliyinə malikdir. Bu, daxili kvazielektrik sahənin formalaşması ilə izah olunur. Kvazielektrik sahənin gərginliyi isə, öz növbəsində, əhəmiyyətli dərəcədə fotocavabın spektral asılılıq xarakterinə təsir göstərir.

CdHgTe epitaksial təbəqələrinin əsasında yaradılmış soyudulmayan İQ-detektorların fotoelektrik parametrlərinin aparılmış nəzəri hesablanması göstərmişdir ki, optimal $[p=(5-6)n_i]$ akseptor aşqarlanması FEM-detektorun həm xüsusi aşkaretmə qabiliyyətini, həm də volt həssaslığını xeyli artırmağa (25-30%) imkan verir.

3-8 və 2-6 mkm spektr sahəsi üçün $Hg_{1-x}Cd_xTe$ epitaksial təbəqələrinin əsasında soyudulmayan FEM-detektorun konstruksiyası və fotoelektrik parametrləri təqdim edilmişdir. Maqnit sahəsinin induksiyası $B \approx 0.4$ və $T = 295$ K temperaturunda FEM-detektorun laboratoriya nümunəsi üçün reallaşdırılmış fotoelektrik parametrlərinin qiymətləri bunlar olmuşdur: həssaslığın maksimum dalğa uzunluğu $\lambda_m \approx 6.5-7.0$ mkm, monoxromatik volt həssaslığı $S_{\lambda m}^* = 0.3 - 0.5$ B/BT, xüsusi aşkaretmə qabiliyyəti $D_{\lambda m}^* = (0.5 - 1.0) \cdot 10^8$ cm $\cdot$ Hz $^{1/2}$ BT $^{-1}$.

Photoelectric parameters of HgCdTe epitaxial layers have been grown on groove-patterned CdZnTe substrate

ABSTRACT

The dissertation is devoted to researches of photoelectric parameters of HgCdTe epitaxial layers have been grown on groove-patterned CdZnTe substrate

Physicochemical fundamentals of technology for $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ epitaxial layers growth on groove-patterned CdZnTe substrate have been done.

It is ascertained that epitaxial layers which were grown on groove-patterned CdZnTe substrate have a strongly pronounced spatial inhomogeneity of energy gap width along the thickness (640 eV/cm, 80 eV/cm, 0.002 eV/cm) of layers, which causes formation of embedded quasi-electrical field, intensity of which significantly affects character of photoresponse's spectrum.

Basic principles of solid-state signal shaper production were revised on $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ epitaxial layers basis, which were grown groove-patterned CdZnTe insulating substrate, which is considerably simplified technology of IR-photodetectors production

Theoretical evaluation of photoelectrical parameters of noncooled IR-detectors on $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0,2-0,3$) epitaxial layers basis showed that optimal p-type doping [$p=(5-6)n_i$] allowed to significantly increase (up to 25-30%) voltage sensitivity as well as specific detectivity of PEM detector.

Construction and photoelectrical parameters of noncooled PEM detector on $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epitaxial layers basis for spectral region 2-6 and 3-8 μm were submitted. Received values of photoelectrical parameters of laboratory pattern PEM detector by $T=295\text{ K}$ and by value of magnetic field induction $B \approx 0.4\text{ T}$ are as follows: peak sensitivity wavelength $\lambda_m \approx 6.5-7.0\text{ micrometers}$, monochromatic voltage sensitivity $S_{\lambda_m}^{\text{PEM}} = 0.3 - 0.5\text{ V/W}$, specific detectivity $D_{\lambda_m}^{\text{PEM}} = (0.5 - 1.0) \cdot 10^8\text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$.

Format 60x84 1/16
Sayı 100

“SƏDA” nəşriyyatının mətbəəsində

ap olunmuřdur

AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASI
akademik H.M. Abdullayev adına FİZİKA İNSTİTUTU

Əlyazması hüququnda

TƏRLAN İBRAHİM OĞLU İBRAHİMOV

CDZNTÉ SƏTHYANI KANALLARINDA YETİŞDİRİLMİŞ
HGCDTE EPİTAKSİAL TƏBƏQƏLƏRİNİN
FOTOELEKTRİK XASSƏLƏRİ

2203.01 – Elektronika

Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq
üçün təqdim olunmuş dissertasiyanın

A V T O R E F E R A T I

Bakı - 2017