

**АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА**

*На правах рукописи*

**ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ  
InSb и HgCdTe ДЛЯ ИК – ФОТОПРИЕМНИКОВ**

Специальность: 2203.01–Электроника

Отрасль науки: Физика

Соискатель: **Шихамир Осмат оглы Эминов**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора наук

**Баку – 2021**

Диссертационная работа выполнена в Лаборатории  
Инфракрасной фотоэлектроники и плазменных явлений  
Института Физики Национальной Академии Наук  
Азербайджана

**Научный руководитель**  
**(Научный консультант) :** -

Официальные оппоненты:

Член-корреспондент Национальной Академии Наук  
Азербайджана, доктор физико-математических  
наук, профессор

**Гасымов Октай Казым оглы**

Доктор физико-математических наук, профессор

**Магеррамов Вагиф Али оглы**

Доктор физико-математических наук, доцент

**Байрамов Аяз Идаят оглы**

Доктор наук по физике, доцент

**Гусейнов Тарлан Ханбаба оглы**

Одноразовый Диссертационный совет ВЕД 1.14 на основе  
Диссертационного совета ЕД 1.14 Высшей Аттестационной  
Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики,  
действующего на базе Института Физики Национальной  
Академии Наук Азербайджана

Председатель диссертационного совета:

Действительный член Национальной Академии Наук  
Азербайджана, доктор физико-математических наук, профессор

**Мамедов Назим Тимур оглы**

Ученый секретарь диссертационного совета:

Доктор наук по физике, доцент

**Мехтиева Рафига Забил кызы**

Председатель научного семинара:

Доктор наук по физике, доцент

**Ибрагимов Тахир Джумшуд оглы**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность и разработанность темы исследования:**

Разработка эффективных фотоприемников (ФП) инфракрасного (ИК) диапазона, имеющих широкий ряд практических применений, является одной из актуальных задач современной фотоэлектроники. Уникальные электрические и фотоэлектрические свойства InSb и HgCdTe обусловили их широкое применение в качестве фоточувствительных материалов фотодиодов и фоторезисторов в детекторах ИК излучения и термоэлектрических преобразователях энергии. InSb и HgCdTe совместно покрывают по фоточувствительности оба спектральных диапазона 3-5 и 8-14 мкм, эксплуатируемых в инфракрасной фотоэлектронике.

В последние десятилетия из-за целого ряда технологических причин и экономической целесообразности в технологии изготовления инфракрасных фотоприемников на основе InSb и HgCdTe происходит постепенная замена объемных монокристаллов на эпитаксиальные структуры. Основными промышленными эпитаксиальными технологиями в настоящее время являются жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ) и различные варианты паровой эпитаксии (МЛЭ, ГФЭ, МО ГФЭ). ЖФЭ выгодно отличается от других методов низкой себестоимостью и высокой производительностью, высокой чистотой эпитаксиальных слоев и пр. Разработки, направленные на дальнейшее усовершенствование этой технологии, имеют большое практическое значение для создания высокоэффективных фотоприемных устройств. Относительно быстрые темпы внедрения эпитаксиальных слоев HgCdTe и InSb в технологию изготовления фотоприемников способствовали образованию некоторого разрыва между уровнями разработок высокоэффективных фотоприемников, создаваемых на основе эпитаксиальных структур, и научных исследований ряда физических явлений, происходящих в них. В связи с этим

проведение комплекса исследований по установлению зависимостей электрофизических и фотоэлектрических свойств выращиваемых эпитаксиальных структур на основе InSb и HgCdTe от условий эпитаксиального процесса и последующей обработки при изготовлении из них ФП с заданными характеристиками является актуальной задачей.

В настоящее время рядом исследовательских групп в разных странах мира разрабатываются матричные инфракрасные фотоприемники на основе эпитаксиальных слоев HgCdTe, выращенных ЖФЭ и МЛЭ. Однако в них пока не используются возможности, предоставляемые наличием встроенного квазиэлектрического поля в таких эпитаксиальных слоях, которое обусловлено градиентом ширины запрещенной зоны по толщине (варизонностью) слоев. Проведение исследований по изысканию перспектив практического применения варизонного эффекта для разработки новых типов ИК- фотоприемников также актуально.

Физическое совершенство поверхности имеет исключительно важное значение для фоточувствительной эпитаксиальной структуры. Поэтому проведение исследований по установлению механизмов влияния химико-механического и химического воздействия различных реагентов, температурного отжига, анодного окисления и пр. на свойства поверхности подложек InSb и CdZnTe, а также эпитаксиальных слоев, выращенных на них, имеет принципиальное значение. Установление механизмов дефектообразования в эпитаксиальных слоях и структурах при жидкофазной эпитаксии, изыскание способов его подавления, а также разработка новых устройств и оснасток для проведения эпитаксиального роста, создающих благоприятные условия для бездефектного эпитаксиального роста, занимает важное место среди перечисленных актуальных проблем.

InSb и HgCdTe характерна очень малая эффективная масса и высокая подвижность электронов и легких дырок. Из-за недостаточной эффективности взаимодействия электронов и

легких дырок с акустическими фононами при низких температурах в эпитаксиальных структурах  $p^+$ - $p$ -типа на основе  $p$ -InSb возможно разогревать легкие дырки излучением и обеспечивать его фоточувствительность в дальней ИК-области. Поэтому исследования в этой области, проведенные в работе, также имеют важное практическое значение и также актуальны.

Детальное 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. Все эти перечисленные обстоятельства в целом обуславливают актуальность темы диссертации.

#### **Объект и предмет исследования:**

Исследования проводились на эпитаксиальных структурах из InSb и HgCdTe, выращенных методом жидкофазной эпитаксии. Выбор этих объектов исследования определялся прежде всего тем, что InSb и HgCdTe совместно по фоточувствительности оба спектральных диапазона 3-5 и 8-14 мкм, эксплуатируемых в ИК-фотоэлектронике. InSb широко используется в качестве модельного полупроводникового материала для различных теоретических построений, а HgCdTe, обладающий свойствами плавного регулирования ширины запрещенной зоны при изменении в нем содержания ртути и кадмия, приобретает те же характерные особенности физических свойств, присущих узкозонным полупроводникам группы  $A^3B^5$ , таких, как InSb. Все это дает основание для рассмотрения с единой точки зрения и обобщения физических процессов в фотоприемниках, изготовленных из эпитаксиальных слоев InSb и HgCdTe, причем выращенных единообразной технологией жидкофазной эпитаксии.

В диссертационной работе изучалась кинетика химических процессов протекающих на поверхности подложек  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$  и  $\text{InSb}$  при их подготовке к эпитаксии, кинетика процессов анодного окисления эпитаксиальных слоев  $\text{HgCdTe}$ , влияние режимов синтеза растворов-расплавов  $\text{In-Sb}$  и  $(\text{Hg}_{1-z}\text{Cd}_z)_{1-y}\text{Te}_y$ , служащих источниками эпитаксиального роста, а также особенностей их легирования атомами примеси на электрофизические и фотоэлектрические свойства эпитаксиальных структур. Здесь также исследовалось воздействие на эти свойства условий, в которых производился рост эпитаксиальных слоев и их последующая (“пост-эпитаксиальная”) температурная и химическая обработка. Специальным объектом исследований стало дефектообразование в эпитаксиальных слоях.

Для обоснования выбора исходных материалов подложек и компонентов источников эпитаксиального роста, а также для прогнозирования физических параметров структур и обоснования новых физических принципов действия ИК фотоприемников проводились модельные количественные расчеты, а их результаты сопоставлялись с экспериментально полученными данными. Исследования проводились при изучении физико-химических особенностей растворов-расплавов  $\text{In-Sb}$  и  $(\text{Hg}_{1-z}\text{Cd}_z)_{1-y}\text{Te}_y$  и процессов кристаллизации и эпитаксиального роста из них, кинетики химических процессов на поверхности полупроводниковых кристаллов  $\text{InSb}$  и  $\text{CdZnTe}$ , атомной диффузии различных примесей, электрофизических, оптических и фотоэлектрических явлений, а также процессов дефектообразования в эпитаксиальных слоях и структурах на их основе. К числу исследуемых явлений относятся также примесная фотопроводимость и разогрев легких дырок излучением в  $p^+$ - $n$  и  $p^+$ - $p$ -структурах на основе  $\text{InSb}$ , рассеяние дырок в  $\text{InSb}$  и рекомбинация носителей заряда в эпитаксиальных слоях  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  с разными составами, исследованные в

температурном интервале 80–300К и спектральном диапазоне 2–14 мкм.

### **Цель и задачи исследования :**

Целью данной работы является усовершенствование физических и физико-химических основ технологии выращивания совершенных эпитаксиальных структур на основе InSb и HgCdTe, а также разработка фотоприемников инфракрасного излучения с высокими параметрами чувствительности и расширенными функциональными возможностями.

В соответствии с этой целью, в работе ставились и решались следующие задачи:

- Обосновать выбор параметров исходных материалов подложек (InSb и CdZnTe) и компонентов растворов In-Sb и  $(\text{Hg}_{1-z}\text{Cd}_z)_{1-y}\text{Te}_y$ , использующихся в качестве источников эпитаксиального роста слоев, соответственно InSb и HgCdTe, типа и концентрации легирующих примесей, а также разработать методы синтеза этих растворов;
- Усовершенствовать научно обоснованную технологическую схему подготовки подложек InSb и CdZnTe к эпитаксии с качеством поверхности, отвечающим требованиям современного производства детекторов инфракрасного излучения, включающую механическое шлифование, химико-механическое полирование и финишное химико-динамическое травление;
- Усовершенствовать и оптимизировать режимы выращивания методом ЖФЭ гомоэпитаксиальных р-п и р<sup>+</sup>-р структур InSb, а также эпитаксиальных слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  на поверхности изолирующей подложки CdZnTe, внутри канавок и на ступеньках, созданных в ее приповерхностной области;
- Установить зависимость составов эпитаксиальных

слоев и их электрофизических и фотоэлектрических свойств от типа и уровня легирования раствора-расплава примесью, а также от режимов термического воздействия на него на этапе его синтеза;

- Выявить особенности механизмов дефектообразования, присущих методу жидкофазной эпитаксии, в эпитаксиальных слоях InSb и CdHgTe и разработать методы его предотвращения;
- Разработать и изготовить новые устройства для проведения эпитаксиального роста, обеспечивающие благоприятные условия в эпитаксиальном реакторе для получения эпитаксиальных слоев с минимальным уровнем дефектности поверхности;
- Разработать и оптимизировать методы пост-эпитаксиальной обработки эпитаксиальных структур на основе InSb и HgCdTe (химическое травление, анодное окисление, диффузионное легирование, термический отжиг и пр.) для достижения электрофизических и фотоэлектрических характеристик, обеспечивающих их пригодность для изготовления ИК - фотоприемников;
- Выяснить механизмы токопрохождения, фотопроводимости, рассеяния и рекомбинации неравновесных носителей в эпитаксиальных структурах на основе InSb и CdHgTe;
- Разработать конструкции и методы изготовления новых высокоэффективных фоточувствительных элементов на основе эпитаксиальных структур InSb и HgCdTe с параметрами, пригодными для изготовления ИК- фотоприемников.



### **Методы исследования:**

Проведенные исследования включали профилометрию морфологии, сканерную (растровую) электронную, атомно-силовую и оптическую микроскопии поверхности эпитаксиальных слоев и подложек, рентгеноструктурный и элементный анализы, термозондирование типа электропроводности, измерения холловской подвижности носителей заряда и электропроводности, оптических и фотоэлектрических спектральных характеристик при разных температурах, измерения толщин слоев, глубин проникновения примеси при диффузии и эпитаксии, а также профиля ее распределения по глубине. Были использованы также методики исследования релаксации фотопроводимости в широком интервале температур для изучения механизмов рекомбинации неосновных носителей заряда (ННЗ) и определения характеристик эпитаксиальных структур и фоточувствительных элементов, изготовленных из них. На основе экспериментальных данных производилась оценка значений ряда величин-коэффициентов сегрегации примеси в растворе-расплаве, коэффициентов термической диффузии и энергии активации различных атомов примеси, длины свободного пробега и диффузионной длины неравновесных носителей тока, коэффициентов оптического поглощения, характера распределения состава по толщине эпитаксиальных слоев и пр. По планарной и меза-технологиям были изготовлены фоточувствительные элементы на основе  $p^+$ - $p$  фоторезисторов и  $n$ - $p$  переходов  $\text{InSb}$ , а также на основе варизонных эпитаксиальных структур  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ . В широких спектральных диапазонах (3-5, 8-14 мкм) и температурных интервалах (77-300К) измерялись вольтамперные характеристики, динамическое сопротивление и фоточувствительность этих элементов, а также оценивались диффузионная длина и время жизни неравновесных носителей заряда в них.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Процессы взаимной диффузии компонентов подложки CdZnTe и раствора-расплава  $(\text{Hg}_{1-z}\text{Cd}_z)_{1-y}\text{Te}_y$  в процессе ЖФЭ обуславливают формирование градиента состава и ширины запрещенной зоны (варизонности) по всей толщине эпитаксиальных слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращенных непосредственно на поверхности подложки  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ , на ступеньках и внутри канавок, созданных в ее приповерхностной области. При этом профиль распределения состава по толщине определяется составом раствора-расплава Hg-Cd-Te, температурой и временем протекания эпитаксиального роста.
2. Методика оценки влияния режимов синтеза раствора-расплава  $(\text{Hg}_{1-z}\text{Cd}_z)_{1-y}\text{Te}_y$  на вариации температуры его ликвидуса  $\theta_1(^{\circ}\text{C})$  и состав ( $x$ ) эпитаксиальных слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращенных из него, основанная на использовании эмпирических выражений для кривых ликвидуса и солидуса теллурического угла фазовой диаграммы состояния системы Hg-Cd-Te. В процессе синтеза раствора-расплава  $(\text{Hg}_{1-z}\text{Cd}_z)_{1-y}\text{Te}_y$  его температура ликвидуса, а также состав эпитаксиальных слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращиваемых из него, может варьировать в определенных пределах. На примере раствора с исходным составом  $(\text{Hg}_{0.946}\text{Cd}_{0.054})_{0.194}\text{Te}_{0.806}$  показано, что  $\theta_1^{\circ}\text{C}$  может варьировать в пределах  $\theta_1^{\circ}\text{C} = T_1 \pm 1.8^{\circ}\text{C}$ , а  $x$  - в пределах  $x \pm 0.003$ .
3. Механизмы формирования дефектов в эпитаксиальных структурах InSb и  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращенных методом ЖФЭ, и их классификация. Установлено, что в таких структурах формируются более 10 разных типов дефектов, обусловленных кинетикой кристаллизации из жидкого раствора, кристаллографическими особенностями подложек, условиями проведения эпитаксиального процесса, а также

конструкциями устройств и оснасток, использующихся для проведения эпитаксии.

4. Механизм воздействия анодного окисления эпитаксиальных слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  с р-типом проводимости с последующим термическим отжигом в инертном газе на их фотоэлектрические свойства. Он включает в себя следующие стадии: прохождение химической реакции между анодным окислом и компонентами эпитаксиального слоя  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , резкий рост накопления ртути в междоузлиях решетки приповерхностного слоя, диффузия этой ртути в объем эпитаксиального слоя с аннигиляцией с вакансиями ртути с изменением его типа проводимости в n-тип.
5. Механизм рекомбинации неравновесных носителей заряда в эпитаксиальных слоях  $n\text{-Hg}_{0.71}\text{Cd}_{0.29}\text{Te}$  в области температур 80-300К, согласно которому в температурных областях, как собственной (200-300К) так и примесной проводимости (80-200К) в них происходит межзонная излучательная рекомбинация неравновесных носителей. При этом в области 80-200К время жизни определяется одновременным действием двух механизмов- межзонной излучательной рекомбинации и рекомбинации Шокли-Рида-Холла через глубокий уровень акцепторного типа  $E_{vr} = 80$  мэВ в запрещенной зоне. При температурах выше 300К доминирующим механизмом рекомбинации является ударный Оже-механизм.
6. Характер поведения акцепторной примеси атомов Cd в эпитаксиальных слоях InSb, выращенных из раствора-расплава In-Sb на подложках p InSb и n-InSb. В области слабого легирования  $C_L < 1 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup> раствора In-Sb акцепторной примесью (Cd) коэффициент сегрегации  $K_s$  в эпитаксиальных слоях p-InSb явно зависит от типа легирующей примеси подложки (Te в n-InSb или Ge в p-InSb). В слоях, выращенных на подложках n-InSb, при этом уровне легирования, акцепторная примесь частично компенсируется

донорной примесью Te, поступающей в раствор из подложки, и поэтому концентрация дырок уменьшается. В области легирования  $C_L \approx 1 \times 10^{17} - 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  величина  $K_s$  имеет значение  $K_s \sim 0.30$ , а в области  $C_L \approx 5 \times 10^{18} - 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  - значение  $K_s \sim 0.25$ .

7. Механизмы рассеяния дырок в эпитаксиальных слоях p-InSb, выращенных методом ЖФЭ. В эпитаксиальных слоях p-InSb во всей области концентраций дырок  $1 \times 10^{16} - 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  действует смешанный механизм рассеяния дырок на акустических фонах и на ионах примеси, а влияние оптического фонного рассеяния можно полностью исключить. С ростом концентрации дырок выше  $p > 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  влияние рассеяния на ионах примеси возрастает.
8. Экспериментальные данные по зависимости коэффициента примесного поглощения  $\alpha(p^+)$  ИК-излучения с энергией  $\sim 0.12 \text{ эВ}$  ( $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$ ) от концентрации дырок в эпитаксиальных  $p^+$ -слоях InSb с высокой степенью легирования акцепторной примесью (Cd) в области  $p^+ \geq 3 \cdot 10^{18} - 1.2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .
9. Усовершенствованная единообразная методика подготовки поверхности подложек InSb и  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$  к жидкофазной эпитаксии и выращивания, соответственно, гомоэпитаксиальных структур InSb p-n и  $p^+$ -p типа, а также варизонных эпитаксиальных слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  на поверхности изолирующей подложки  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ , на ступенях и внутри канавок, созданных в ее приповерхностном слое.
10. Физические принципы действия, конструктивные решения организации фоточувствительных элементов и методы изготовления перечисленных ниже типов ИК-фотоприемников на основе эпитаксиальных слоев InSb и  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ :

-Фотоприемника на основе варизонных структур  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ -  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращенных в узких канавках,

сформированных в приповерхностной области подложки  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ ;

-Трехцветного фотоприемника с варизонными эпитаксиальными слоями  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращенными на ступенчатой подложке  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ ;

-Фотодиода на основе  $p^+$ - $n$  структуры из  $\text{InSb}$ ;

-Фотоприемника ИК излучения дальнего диапазоне из  $\text{InSb}$  на основе эффекта фотопроводимости, обусловленной разогревом легких дырок излучением на эпитаксиальном  $p^+$ - $p$  барьере из  $\text{InSb}$ .

### **Научная новизна исследования:**

В диссертационной работе *впервые*:

1. Разработана методика жидкофазной эпитаксии слоев  $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$  ( $x=0.2-0.30$ ) на подложке  $\text{CdZnTe}$  со ступенчатым профилем, а также в узких канавках, созданных в ее приповерхностном слое. Установлено, что фотоэлектрические свойства таких эпитаксиальных структур определяются встроенным квазиэлектрическим полем, обусловленным особым распределением  $\text{Cd}$  по толщине эпитаксиальных слоев, и профиль которого зависит от технологических условий их роста.
2. Установлены механизмы химико-механического и химического воздействия на поверхность полупроводниковых кристаллов  $\text{CdZnTe}$  и  $\text{InSb}$  с использованием различных абразивов и химических реагентов и разработана технология подготовки пластин из этих материалов к жидкофазной эпитаксии.
3. Установлены значения коэффициента сегрегации  $K_s$  атомов кадмия в эпитаксиальных  $p^+$ -слоях  $\text{InSb}$ , выращенных на подложках  $\text{InSb}$  с  $n$  и  $p$ -типом проводимости, а также зависимости концентрации и подвижности дырок в них от содержания примеси атомов

Cd в жидкой фазе раствора In-Sb в области их концентраций  $1 \times 10^{17}$ - $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Установлено, что верхний предел растворимости атомов кадмия в эпитаксиальных слоях p-InSb составляет  $C_s \approx 5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Значение коэффициента сегрегации атомов кадмия  $K_s$  в этих слоях при слабом легировании раствора  $C_L < 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  зависит от типа примеси (Te или Cd), которой легирована подложка InSb. В области  $C_L \approx 1 \times 10^{17}$ - $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$   $K_s \sim 0.30$ , а в области  $C_L \approx 5 \times 10^{18}$ - $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$   $K_s \sim 0.25$ .

4. Установлены механизмы рассеяния дырок в эпитаксиальных слоях p-InSb. Показано, что при концентрациях дырок  $p > 10^{16} \text{ см}^{-3}$  действует смешанный механизм рассеяния дырок на акустических фононах и на ионах примеси. С ростом концентрации дырок влияние рассеяния на ионах примеси возрастает, и оно особенно сильно проявляется в области концентраций  $> 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .
5. Получены данные по зависимости коэффициента примесного поглощения  $\alpha(p^+)$  ИК-излучения с энергией  $\sim 0.12$  эВ от концентрации дырок в эпитаксиальных структурах n-p<sup>+</sup>-InSb, выращенных методом ЖФЭ, легированных Cd в области легирования  $p^+ \geq 3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  -  $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .
6. В температурном интервале 77–300К проведен комплекс исследований по установлению доминирующих механизмов рекомбинации неравновесных носителей в эпитаксиальных слоях HgCdTe, выращенных методом ЖФЭ.
7. Разработана методика выращивания фотоувствительных эпитаксиальных структур p<sup>+</sup>-n типа из InSb и изготовления фотодиодов с обнаружительной способностью  $D^* = 5 \cdot 10^{10}$ - $4 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$  на их основе.
8. Разработаны и изготовлены новые устройства для жидкостной эпитаксии InSb и HgCdTe в открытых и закрытых системах эпитаксиального роста,

предотвращающие дефектообразование в эпитаксиальных слоях и создающие условия для получения их поверхности с высоким качеством, пригодным для изготовления высокочувствительных фотоприемников.

9. На основе экспериментально полученных данных установлено, что в эпитаксиальных слоях InSb и HgCdTe, выращенных методом ЖФЭ, формируются дефекты более 10 разных типов, связанные с процессом роста. Проведена подробная классификация этих дефектов, установлены и описаны механизмы их формирования.
10. Разработана методика количественной оценки влияния вариаций давления ртути в ампуле в процесса синтеза раствора-расплава с исходным составом  $(Hg_{1-z}Cd_z)_{1-y}Te_y$  на величины вариаций температуры ликвидус ( $\theta_l$  °C) синтезируемого раствора, а также состава ( $x$ ) эпитаксиальных слоев  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ , выращиваемых из него. На примере раствора с исходным составом  $(Hg_{0.946}Cd_{0.054})_{0.194}Te_{0.806}$  показано, что  $\theta_l$  °C может варьировать в пределах  $\pm 1.8$  °C, а  $x$  - в пределах  $\pm 0.003$ . Получено новое эмпирическое выражение  $\theta_l$  °C = 1144 – 845.4y + 672.6z для кривой ликвидуса телурического угла фазовой диаграммы системы Hg-Cd-Te, которое лучше согласуется с экспериментально полученными данными, по сравнению с известными аналогичными выражениями.
11. Разработаны физические основы методики изготовления и конструкции 2 типов фотоприемников на основе эпитаксиальных варизонных структур из HgCdTe, выращенных на изолирующей подложке CdZnTe с двумя разными профилями поверхности:
  - а) внутри канавок, созданных в подложке CdZnTe; при этом встроенное квазиэлектрическое поле в эпитаксиальных слоях использовано для ограничения поверхностной рекомбинации ННЗ на границе раздела подложки и эпитаксиального слоя;

б) на ступеньках, созданных на поверхности подложки CdZnTe, причем варизонность эпитаксиальных слоев по толщине использована для создания многополосного ИК-фотоприемника.

### **Научная и практическая значимость исследования:**

Практическая значимость работы заключается в том, что разработаны физические и физико-химические основы методики выращивания эпитаксиальных слоев CdHgTe из растворов-расплавов  $(Hg_{1-z}Cd_z)_{1-y}Te_y$  на поверхности, внутри канавок, изготовленных в приповерхностном слое и на ступенях подложки CdZnTe, а также эпитаксиальных фоторезистивных ( $p^+$ - $p$  типа) и фотодиодных ( $p$ - $n$  типа) структур на основе InSb. Эти методики позволяют получать эпитаксиальные структуры с толщиной и профилем распределения состава по толщине, качеством поверхности, электрофизическими и фотоэлектрическими характеристиками, позволяющими изготавливать на их основе многоэлементные ИК-фотоприемники с расширенными функциональными возможностями. Они также позволяют разрабатывать конкретные типовые технологические маршруты для практического использования при создании фоточувствительных элементов макетных образцов ИК фотоприемников на основе HgCdTe и InSb. Различные кассеты для проведения эпитаксии в открытых и замкнутых средах, разработанные в диссертации, обеспечивают оптимальные условия для выращивания эпитаксиальных слоев с минимальной дефектностью и также представляют практическую ценность.

Научная значимость работы заключается в том, что результаты исследований предоставляют возможность прогнозировать основные параметры и фотоэлектрические свойства  $p$ - $n$  и  $p^+$ - $p$  структур из InSb, а также варизонных структур и отдельно взятых эпитаксиальных слоев,  $n$ - и  $p$ -типа электрической проводимости на основе HgCdTe, в зависимости от условий их выращивания, легирования и термообработки. Сведения о механизмах токопрохождения в  $p^+$ - $p$  и  $p$ - $n$  структурах



из InSb и их фотоэлектрических свойствах, а также о механизмах рекомбинации носителей заряда и особенностях фотоэлектрических процессов в структурах с эпитаксиальными слоями из HgCdTe создают основу для дальнейшей оптимизации приборных структур из этих материалов. Экспериментальные данные по механизмам дефектообразования в эпитаксиальных слоях и классификация дефектов, характерных слоям, выращенных методом жидкофазной эпитаксии InSb и HgCdTe, дают вклад в развитие научных основ эпитаксиальной технологии узкозонных материалов. Разработанные принципы изготовления многоцветных формирователей сигнала изображения на основе варизонных эпитаксиальных структур из HgCdTe, выращенных в узких приповерхностных каналах подложки CdZnTe и на ступеньках, созданных на ее поверхности, значительно упрощают технологию изготовления ИК фотоприемников с высокой чувствительностью и обнаружительной способностью, по сравнению с существующими технологиями. Предлагаемый в работе принцип действия ИК фотоприемника на фотоэффекте, основанном на разогреве легких дырок излучением в  $p^+$ -р-структуре из InSb, создает перспективы применения этого материала для детектирования излучения, наряду со средним ИК- диапазоном, также и в дальнем ИК- диапазоне, и поэтому расширяет область применения этого материала в ИК- фотоэлектронике.

#### **Апробация результатов исследования:**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- II научная конференции “Фотоэлектрические явления в полупроводниках”, 1991, Ашгабад, Туркменистан;
- V Республиканская Межвузовская конференция по физике, 1992, Баку, Азербайджан ;
- Республиканская Межвузовская конференция по физике “Физика-93”, 1993, Баку, Азербайджан;
- IX Российская Конференция по росту кристаллов, 2000,

- Москва, Россия;
- 12-й Международный симпозиум “Тонкие пленки в электронике”, 2001, Харьков, Украина;
  - Харьковская научная асамблея, 2002, Харьков, Украина;
  - “YAP-ın 10-illik yubileyinə həsr olunmuş “Rabitə və elmi-texniki tərəqqi” elmi Konfransı , 2002, Баку, Азербайджан;
  - 3-я и 4-я Международные конференции “Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов” (г. Харьков, 2002 ,2003, Харьков, Украина;
  - XIII Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии, РЭМ-2003, 2003, Москва, Россия;
  - “Fizika-2005” Beynəlxalq elmi Konfransı, 7-9 iyun, 2005, Баку, Азербайджан;
  - “Fizika-2010” Beynəlxalq elmi Konfransı , 2010, Баку, Азербайджан;
  - III, IV и V Международные конференции “Аморфные и микрокристаллические полупроводники”, 2002-2006, Ст.-Петербург, Россия;
  - The International Conference “ICTM-17”, 27-30 September, 2010, Баку, Азербайджан;
  - “Fizikanın Müasir Problemləri” IV Respublika Konfransı, 24-25 dekabr, 2010 , Баку, Азербайджан;
  - The Conference “Perspectives of peaceful use of nuclear energy”, –8-10 November, 2010, Bakı, Azərbaycan;
  - 16<sup>th</sup> Iranian Conference on Optics and Photonics, 2010, Yazd, Iran
  - 5<sup>th</sup> International Workshop on Crystal Growth Technology, June 26- 30, –2011, Berlin, Germany;
  - “Alternativ və bərpa olunan enerji mənbələrindən istifadənin perspektivləri” Konfransı, 1-2 iyun , 2011, Bakı, Azərbaycan;
  - Конференции стран СНГ по росту кристаллов, 1-5 октября, 2012 ,Харьков,Украина;
  - XVI–XXIV Международные конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 2000-2016 г.г

Москва, Россия ;

- Международная конференция МТСМР-2018 , посвященная 100-летию академика Г.Б.Абдуллаева, 2018, Баку, Азербайджан;
- на научных семинарах Института Физики НАН Азербайджана.

Основное содержание диссертационной работы изложено в 69 научных работах, опубликованных в республиканских и зарубежных научных изданиях, в том числе в 9 статьях в журналах с международным индексом цитирования. Список этих работ приведен в конце автореферата.

#### **Название организации, в которой выполнена работа:**

Диссертационная работа выполнена в Лаборатории Инфракрасной фотоэлектроники и плазменных явлений Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 407,172 знака, включая 129 рисунков и 9 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, описаны объекты и методы проведенных исследований, показана научная новизна, методы и практическая ценность, научная значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также перечислена апробация результатов исследования.

**В первой главе** представлен аналитический обзор работ, посвященных исследованию физико-химических, электрофизических, оптических и фотоэлектрических свойств антимолибдита индия и твердых растворов теллурида кадмия-ртути,

а также современным фотоприемным устройствам на основе этих материалов. Описаны области практического применения ИК-фотоприемников на основе InSb и HgCdTe. Показано, что эти материалы совместно покрывают по фото-чувствительности оба спектральных диапазона 3-5 и 8-14 мкм, соответствующих “среднему” и “дальному” окнам прозрачности атмосферы, и поэтому их совместное рассмотрение в диссертации имеет также важное прикладное значение. Описаны основные отличительные и общие физические свойства InSb и HgCdTe. При описании отличительных черт этих материалов показано, что InSb относится к бинарным соединениям группы  $A^3B^5$ , а CdHgTe- к твердым растворам переменного состава группы  $A^2B^6$ . Их общими свойствами является то, что оба материала относятся к узкозонным полупроводникам - обширному классу полупроводниковых материалов с шириной запрещенной зоны менее 0.5 эВ, соответствующей красной границе межзонного поглощения на длинах волн более 2 мкм. Они являются прямозонными полупроводниками с рекордно высокими значениями подвижности и малой эффективной массой электронов. Они имеют одинаковую структуру кристаллической решетки цинковой обманки и по структуре энергетических зон относятся к кейновским полупроводникам. Такая общность свойств этих материалов дает основание для рассмотрения и обобщения физических процессов в фотоприемниках на основе InSb и HgCdTe, изготовленных единообразной технологией, с единой точки зрения. Уникальные оптические и фотоэлектрические свойства InSb и HgCdTe обусловили их широкое применение в качестве рабочего вещества в детекторах ИК-излучения, используемых в различных областях техники.

В настоящее время многие фирмы в США, Канаде, Великобритании, Франции, Германии, России, Израиле, Индии и др. активно разрабатывают и совершенствуют ИК-приемники как военного, так и гражданского применения. ИК-системы в военной области преимущественно используются в лазерных

прицелах, системах самонаведения ракет, приборах ночного видения и пр. Они используются в медицине для диагностики воспалительных процессов, в экологии для мониторинга окружающей среды, тепловом контроле ядерных реакторов, средствах контроля и управления технологическими процессами и неразрушающего контроля качества продукта, пилотировании и навигации, в астрономии и других научных исследованиях. К настоящему времени уже установилась своеобразная классификация основных типов фотоприемников по областям их применения в окнах прозрачности земной атмосферы. Для диапазона 1.5-2.5 мкм - это фоторезисторы на основе PbS, действующие в температурной области 293-195 К; для 3-5 мкм - фоторезисторы из PbSe, фоторезисторы и фотодиоды из HgCdTe ( $x=0.3$ ) (температурная область 195-77 К) и фотодиоды из InSb (77К); 8-14 мкм- фотодиоды и фоторезисторы из HgCdTe ( $x=0.2$ ) (77К). Большинство фотодиодов, фоторезисторов и фотоэлектромагнитных детекторов для тепловизионной техники, работающей в инфракрасных диапазонах 3-5 и 8-14 мкм создается на основе HgCdTe и InSb. Применение фотоприемников на основе HgCdTe быстро растет. Однако InSb, которому присуща долговременная стабильность физических свойств и технология которого более проста, может конкурировать с HgCdTe. Когда требуется высокая чувствительность и быстроедействие в диапазоне 3-5 мкм, то предпочтение отдается приемникам из InSb а для дипазона 8-14 мкм – приемникам на основе HgCdTe. К настоящему времени уже сформировались установившиеся технологии их изготовления. Тем не менее, для улучшения характеристик фотоприемников при одновременном снижении их себестоимости, геометрических размеров, массы, энергопотребления и пр. решение задач, связанных со сравнением уже известных технологий и их модификаций, а также оптимизация важнейших технологических операций остается актуальным.

Далее дано краткое описание основных физических

свойств InSb. Описана зонная структура этого материала, представлена фазовая диаграмма состояния бинарной системы In-Sb, температурная зависимость подвижности носителей заряда, механизмы их рассеяния, оптические свойства и пр. Далее дано краткое описание методов выращивания объемных монокристаллов InSb по Бриджмену и Чохральскому. Омечены преимущества и недостатки этих методов. Показано, что качество монокристаллических объемных кристаллов InSb к настоящему времени достигло своего совершенства и дальнейшее улучшение параметров InSb металлургическими способами в процессе выращивания монокристаллов в настоящее время практически невозможно. Описаны диффузионные и ионно-имплантационные методы изготовления фоточувствительных фотодиодных структур на основе объемных кристаллов InSb. Показано, что эти методы сталкиваются с проблемой изменения типа проводимости-термоконверсии подложки при тепловой обработке при высоких температурах, которую обычно необходимо проводить для пост-имплантационного восстановительного отжига, а также при термической диффузии атомов примеси. Далее описаны методы эпитаксиального выращивания тонких слоев InSb. Дано краткое описание методик молекулярной и газовой эпитаксии, а также ионной имплантации. Дан обзор работ по получению структур на InSb методом имплантации. Жидкофазная эпитаксия, в общих чертах определена как метод выращивания ориентированного кристаллического слоя материала из насыщенного или пересыщенного жидкого раствора на монокристаллической подложке, которая, по структуре и размерам решетки подобна выращиваемому слою в такой степени, чтобы при выращивании продолжение кристаллической структуры происходило когерентным образом. Описаны работы по выращиванию гомоэпитаксиальных жидкофазных эпитаксиальных слоев InSb на подложках из InSb, а также гетероструктур  $A^2B^6$ - $A^3B^5$ ,  $A^3B^5$ - $A^3B^5$  и Si- $A^3B^5$  на примере структур CdTe-InSb, ZnTe-InSb, GaAs-

InSb и Si-InSb на альтернативных подложках (Si, сапфир, GaAs и пр.), оптически прозрачных для ИК излучения, но с большим рассогласованием по параметрам решеток. Показано, что проблема нежелательного изменения типа проводимости (термоконверсия) и эрозия поверхности подложек n- и p- InSb при термическом воздействии без пассивирующего защитного покрытия при температурах выше 400°C, накладывает ограничения на температуру и продолжительность времени нагрева. В этой связи, отмечено, что ЖФЭ InSb, которая обычно может проводится в области температур 200-400°C, которые значительно ниже температуры его плавления (525°C), является наиболее пригодной технологией для изготовления структур из InSb с высоким уровнем легирования вплоть до концентраций дырок  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Следует особо отметить, что наличие таких выражений имеют большое практическое значение при проведении расчетов составов растворов для выращивания кристаллов тройных и четвертных твердых растворов с заданным составом.

Далее проанализированы работы по выращиванию объемных монокристаллов HgCdTe методом Бриджмена, а также эпитаксиальных слоев этого материала. Первые объемные монокристаллы и первые эпитаксиальные слои HgCdTe были выращены в СССР в середине 1960-х годов. Тогда же методом высокотемпературной диффузии атомов Hg при отжиге в насыщенных парах были изготовлены первые фотодиоды с p-n переходом. Показано, что метод Бриджмена позволяет получить монокристаллы HgCdTe диаметром около 50 мм с неоднородностью по составу  $\pm 0,005$  мол. % CdTe, концентрацией электронов  $n = (1-5)10^{14} \text{ см}^{-3}$ , подвижностью  $\mu_n = 1,5-3 \times 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , а также временем жизни  $\tau \geq 10^{-6} \text{ с}$ . Малоугловые границы, включения второй фазы в кристаллах отсутствуют, а плотность дислокаций ниже  $10^5 \text{ см}^{-2}$ . В большинстве кристаллов, полученных методом Бриджмена, наблюдалась неоднородность состава (x) материала не только в продольном направлении, в

соответствии с коэффициентом сегрегации, но и в поперечном направлении. Тем не менее, такие кристаллы позволяют изготавливать многоэлементных фоторезисторов со средним значением обнаружительной способности  $D^* \sim 8 \cdot 10^{10} \text{ смГц}^{1/2}\text{Вт}^{-1}$ , которое близко к теоретическому пределу для приведенных условий измерений.

Далее в обзоре отмечено, что, постоянно прогрессируя, промышленное и лабораторное производство HgCdTe, начавшееся с выращивания объемных кристаллов из расплава при высокой температуре выше  $700^\circ\text{C}$  и давлений до 100 ат в замкнутом объеме кварцевых ампул, пришло к низкотемпературной жидкофазной эпитаксии. В начале 1990-х годов с началом интенсивного развития эпитаксиальных методов выращивания начался процесс вытеснения объемных кристаллов HgCdTe тонкими слоями, выращенными молекулярной и жидкофазной эпитаксией. Этот процесс обусловлен тем, что тонкопленочные эпитаксиальные технологии позволяют получать материал, более однородный по сравнению с объемными кристаллами, и выращивать фоточувствительные слои с заданным составом и толщиной на подложках высокого качества. Фоторезисторы из объемных материалов HgCdTe, используемые в настоящее время, практически уже достигли теретически максимально возможных параметров. При промышленном массовом производстве фотоприемных устройств возникают определённые трудности в достижении их предельных параметров. Использование эпитаксиальных пленок позволяет исключить дорогостоящие и трудоемкие процессы механической и химико-механической обработки для получения кристаллов нужной толщины. Поскольку эпитаксия происходит при относительно низких температурах, создается возможность уменьшения плотности собственных дефектов. Давление ртути при эпитаксии из жидких растворов Hg-Cd<sub>Te</sub>, обогащенных теллуром мало (0.1 атм.), поэтому нет необходимости в толстостенных кварцевых ампулах. Выращенные таким образом



эпитаксиальные слои для улучшения кристалличности могут быть отожжены при относительно низкой температуре (200-300°C). На качественных эпитаксиальных пленках сразу же после выращивания, отжига и неглубокого химического травления можно начать операции по формированию топологии чувствительных элементов. Эпитаксиальные методы дают возможность выращивать тонкие слои HgCdTe с площадью (~30 см<sup>2</sup>), значительно большей по сравнению с объемными методами. Они также позволяют получать сложные многослойные структуры с крутыми и сложными профилями состава и профилями легирования полупроводника.

Далее в кратком обзоре работ по фотоприемникам на основе InSb и HgCdTe дана классификация основных типов современных фотодетекторов и описаны их основные статические характеристики. Представлены результаты экспериментальных работ по созданию фоточувствительных эпитаксиальных слоев, фоторезисторов и фотодиодов из InSb, основанных на различных вариантах p<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup>, p<sup>+</sup>-p-p<sup>+</sup>, p-i-n и p-n переходов, а также на МДП структурах. Показано, что области применения InSb можно расширить за счет использования тройных твердых растворов InAsSb, InBiSb и InTlSb.

Описаны механизмы фотопроводимости в p-InSb в области примесного поглощения ( $\lambda=10,6 \mu\text{m}$ ) в условиях ограничения инжекции электронов в фоточувствительную p-область с применением выращенными нами p<sup>+</sup>-p структур с эпитаксиальными p<sup>+</sup>- контактами, являющимися запирающими для электронов.

Такие переходы широко используются в фотодиодах с двойной инжекцией на одном из контактов, на базовом контакте биполярных транзисторов, в детекторах СВЧ излучения на горячих носителях заряда и пр. При исследованиях ВАХ p<sup>+</sup>-p структур с заведомо запирающим для электронов p<sup>+</sup>-слоем было обнаружена ранняя нелинейность ВАХ, обусловленные инжекцией электронов из эпитаксиального p<sup>+</sup> слоя в базовую p-

область. Посредством определения знака точечной термо-э.д.с. в разных точках пробной пластины из InSb, прошедшей ту же тепловую обработку, что и структура с эпитаксиальным слоем, в этой пластине были выявлены области с n-типом проводимости. На основе этого было установлено, что образование микроскопических n-областей в объеме пластины компенсированного InSb p-типа возможно, как за счет флуктуации потенциала в компенсированном образце, так и за счет инверсии типа проводимости в его приповерхностном слое при термическом воздействии на этот образца в процессе эпитаксии.

Далее отмечено, что в последние десятилетия получили интенсивное развитие неохлаждаемые фотоэлектромагнитные (ФЭМ) детекторы на основе HgCdTe, пригодные для приема излучения CO<sub>2</sub> лазера. Показано, что наилучшие параметры ФЭМ детектора достигаются в слаболегированном дырочном HgCdTe, причем мерой пригодности материала для неохлаждаемого приемника является степень его акцепторного легирования  $Y = \alpha\tau(z + \frac{1}{z})/n_i$ , где  $\alpha$ - коэффициент поглощения излучения,  $z = p/n_i$ -характеристика уровня легирования. На основе анализа литературных данных показано, что величина  $Y$  достигает максимума при  $z = 3$ . Показано, что оптимальное акцепторное легирование кристаллов медью на уровне  $p=(5-6)n_i$  позволяет повысить как вольтовую чувствительность, так и удельную обнаружительную способность ФЭМ детектора из-за увеличения амбиполярной диффузионной длины в магнитном поле. Рост применения неохлаждаемых фотоприемников делает актуальным проведение исследований процессов рекомбинации в HgCdTe и изучения возможностей применения эпитаксиальных слоев в дальнейших разработках высокоэффективных неохлаждаемых ИК детекторов.

Далее вкратце описаны основные этапы методики изготовления фотоприемных устройств из объемных

монокристаллов HgCdTe и отмечены их недостатки, связанные с конструкциями матричных детекторов. К этим недостаткам относится их недостаточная надежность, обусловленная использованием клеевой композиции при составлении архитектуры матричной структуры, сложность изготовления, связанная с необходимостью применения технологии "контактов со спуском" и пр. Показано, также, что в современных ИК-детекторах на основе эпитаксиальных пленок HgCdTe практически не используются широкие возможности, которые предоставляет формирование квазиэлектрического встроенного поля, обусловленного градиентом ширины запрещенной зоны по толщине (варизонностью) в эпитаксиальных слоях, полученных методом жидкофазной эпитаксии.

**Во второй главе** представлены результаты исследований процессов химико-механического и химического полирования поверхности подложек InSb и CdZnTe, которые были проведены для их подготовки к жидкофазной эпитаксии. Отмечено, что состояние поверхности, физическая природа и кристаллическая структура монокристаллической подложки являются определяющими факторами роста эпитаксиального слоя на ней и получения высококачественных эпитаксиальных структур. Это обусловлено тем, что в процессе жидкофазной эпитаксии начало кристаллизации на подложке определяется характером взаимодействия жидкой и твердой фаз на границе раздела поверхности подложки и раствора- расплава, а также кинетикой поверхностной реакции осаждения атомов кристаллизующегося материала. Приводится обоснование выбора InSb и CdZnTe в качестве материала для подложек. Показано, что при жидкофазной эпитаксии InSb и HgCdTe чаще всего используются подложки InSb и CdZnTe, имеющих кристаллографическую ориентацию (111), причем рост осуществляется на стороне (111)В. Такой выбор обусловлен полярностью плоскостей (111) и направлений [111], присущей кристаллической структуре цинковой обманки, энергетической выгодностью и большей

устойчивостью роста кристалла на стороне (111)В, по сравнению с ростом на стороне (111)А. При обосновании выбора подложки для проведения эпитаксии HgCdTe отмечено, что объемные полупроводниковые материалы Si, GaAs, InSb, InP и лейкосапфир являются высококачественными и относительно дешевыми и доступными материалами, которые в этом случае можно использовать. Однако, большое рассогласование параметров их решеток с решеткой HgCdTe (с GaAs на 13.6%, а с Si- ~19%) ведет к образованию большой плотности дислокаций несоответствия и прорастающих дислокаций в эпитаксиальных слоях. На основе анализа сравнения параметров этих материалов с параметрами  $Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te$  сделано заключение о том, что, этот материал, несмотря на его недостатки и привлекательные свойства альтернативных материалов, на сегодняшний день все же остается наилучшим материалом подложек для эпитаксии HgCdTe. Здесь же представлены результаты экспериментальных исследований процессов химико-механического и химического полирования поверхности подложек  $Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te$  и InSb, проводимых с целью их подготовки к жидкофазной эпитаксии. Подробно описана разработанная нами методики подготовки поверхности подложек. Эта методика включает в себя механическое и химико-механическое полирование (МП и ХМП) с применением и без применения абразивных материалов, а также химико-динамическое полирование (ХДП) в различных химических травителях. Показаны результаты наших комплексных исследований по химическому травлению поверхности подложек InSb и CdZnTe. Они были проведены с целью выбора составов химических травителей, обеспечивающих получение поверхности подложек с физическим состоянием, позволяющих проведение на ней эпитаксии. Исследования проводились на пластинах монокристаллического  $Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te$  и InSb. Пластины  $Cd_{0.96}Zn_{0.04}Te$ , приобретенные в ФГУП ГИРЕДМЕТ (Россия), имели кристаллографическую ориентацию (111), толщину 1000

мкм и диаметр 20 мм. Исследована зависимость качества поверхности подложки от выбранной методики полирования. Опробована методика ее поэтапного полирования, включающая МП и ХМП и ХДП с использованием абразивов  $Al_2O_3$  и  $MgO$  с различной зернистостью 1-3 мкм, растворенных в этиленгликоле при различных заданных скоростях вращения полировальника. Исследовалось также ХП в бромистом растворе с составом 0,5 мл. Br: 500 мл. этиленгликоля без использования абразивов. Эксперименты показали, что по окончании полирования абразивы оседают на поверхность пластины и сцепляются с ней под действием двойного электрического межфазного слоя ионов, образующегося на поверхности частиц в результате адсорбции ионов из раствора ( т.н. дзета  $\zeta$ - потенциал). Сложные проблемы удаления этих частиц абразивов, с полированной поверхности делают эту методику ХМП полирования технически трудоемкой и при наличии альтернативы экономически нецелесообразной для подготовки подложки. Установлено, что наиболее приемлемой методикой является именно химико-механическое полирование без применения абразивных материалов.

Далее описана разработанная нами методика идентификации типа стороны (111)А и (111)В поверхности подложки  $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$  и показано ( Рис.1)., что при ее травлении в растворе с составом  $HF:H_2O_2:H_2O=3:2:1$  на стороне (111)А проявляются фигуры травления в форме треугольников, а на стороне (111)В - в форме окружности. В случае  $InSb$  объектами исследования были образцы из разных партий пластин  $InSb$  с разным типом проводимости, толщиной 500 мкм и диаметром до 50 мм, приобретенные у разных производителей (МЭП Калуга, ФГУП “Гиредмет”, Россия и “Firebird Technology” Канада). Пластины p- $InSb$ , компенсированные Ge, имели концентрацию дырок  $5 \times 10^{12} - 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , а пластины, n- $InSb$ , легированные теллуrom, имели концентрацию электронов  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

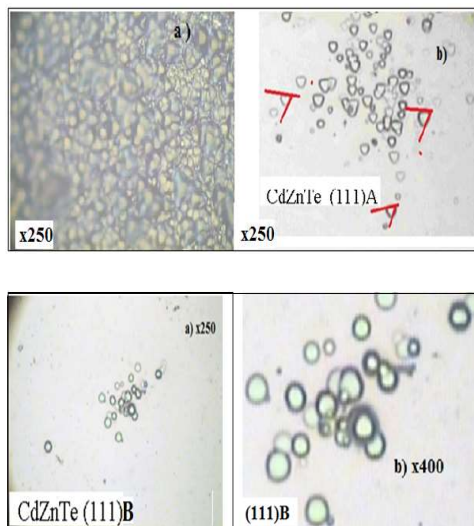


Рис.1. Фигуры травления на поверхностях (111)А и (111)В полированной подложки CdZnTe

Плотность дислокаций во всех пластинах составляла  $\leq 200 \text{ см}^{-2}$ . Пластины были ориентированы в кристаллографическом направлении [111]. Сторона (111)А пластин обеих партий была отшлифована фирмой производителя. Нами же была разработана методика МП, ХМП и ХДП противоположной ей рабочей стороны (111)В. Полирование проводилось в два этапа - сначала МП в суспензии с составом 6г  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :300 мл Этиленгликоль, а затем - ХМП в суспензии  $\text{ZrO}_2$  в 20%-ном растворе винной кислоты в кислой среде ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) с последующей очисткой от абразивов в щелочной среде. Изучено ХДП полярных сторон (111)In и (111)Sb подложек InSb, прошедших циклы МП и ХМП в различных травильных химических растворах. Показано, что при травлении в растворе на основе молочной кислоты на поверхности подложки формируется типичная для анизотропного травления сеть плоскостей, которые наклонены к

исходной поверхности под углом, близким к углу разориентации от кристаллографической плоскости (111). Установлено, что раствор на основе винной кислоты зеркально гладко полирует сторону (111)B(Sb)-подложки, не оставляя на ней видимых следов окисления. На стороне (111)A проявляются круглые фигуры травления (Рис.2), позволяющие проводить четкую идентификацию этой стороны подложки. Определена скорость травления этой стороны, а также глубина и структура нарушенного слоя, остающегося после ХМП.

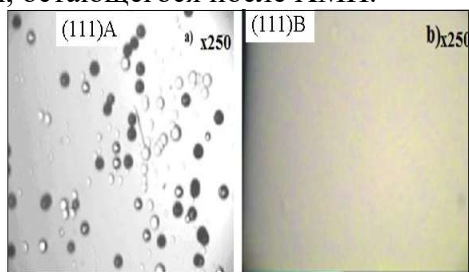


Рис.2. Микрофотографии поверхности подложки InSb после травления в виннокислотном травителе

Установлено, что нарушенный слой состоит из трех участков: трещиноватого, дислокационного и участка упругих остаточных деформаций. Сделано заключение, что при подготовке пластин к ЖФЭ после ХМП необходимо проводить ХДП на глубины не менее 40-50 мкм для удаления нарушенного слоя. Природа глубокого слоя остаточных деформаций, точно не установлена, однако, возможно, что она связана с особенностями роста исходного “материнского” монокристалла, из которого нарезана пластина. Зона нарушений участка упругих остаточных деформаций на свойства фотопреобразователей особо не воздействует и поэтому допустимо травление подложек на меньшие глубины до 10-15 мкм, на которых краевой завал еще не существен.

**В третьей главе** описаны аппаратурно-методические особенности жидкофазной эпитаксии и аппаратурное

оформление эпитаксиального процесса, применительно к физико-химическим особенностям InSb и HgCdTe, представлен обзор работ по конструкциям кассет-держателей подложек и установок для различных вариантов ЖФЭ. Показано, что одной из важных и еще не решенных задач технологии ЖФЭ, является проблема полного удаления расплава-раствора с поверхности выращенного эпитаксиального слоя без остаточных капель, остающихся на ней после окончания процесса наращивания. Показано, что эта проблема тесно связана с физическими свойствами материала раствора- расплава, основными из которых являются величина его поверхностного натяжения, состояние поверхности слоев, способы проведения ЖФЭ, а также конструкция кассет для эпитаксии. Сделан обзор работ, в которых описаны устройства с наклоняемым реактором, вертикальные устройства с погружением подложки в емкость с раствором, устройства с опрокидыванием ампулы, а также горизонтальные сдвиговые кассеты. Проведена классификация устройств для проведения эпитаксии по способам обеспечения контакта раствора с подложкой и перечислены их технические преимущества и недостатки.

В ходе выполнения работы нами были разработаны новые различные устройства для ЖФЭ в открытых и замкнутых системах эпитаксиального роста, защищенные авторскими свидетельствами на изобретение, создающие условия для полного удаления раствора-расплава с поверхности эпитаксиального слоя. Приведено описание кассеты для ЖФЭ в вертикальном реакторе, двух устройств для ЖФЭ HgCdTe внутри кварцевой ампулы, а также кассеты для ЖФЭ в горизонтальной системе в потоке водорода. Представлен детальный сравнительный анализ преимуществ этих устройств по сравнению с их аналогами и прототипами.

**В четвертой главе** рассмотрены физико-химические основы ЖФЭ HgCdTe и InSb. Представлено описание методики проведения синтеза растворов-расплавов In-Sb и  $(\text{Hg}_z\text{Cd}_{1-z})_{1-y}\text{Te}_y$ ,



а также режимов роста эпитаксиальных слоев InSb и HgCdTe. Проведена количественная оценка влияния вариаций давления ртути внутри ампулы в процессе синтеза раствора  $(\text{Hg}_z\text{Cd}_{1-z})_{1-y}\text{Te}_y$  на температуру ( $\theta_l^\circ\text{C}$ )- ликвидуса раствора-расплава и на состав эпитаксиальных слоев  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , выращиваемых из него. Установлено новое эмпирическое выражение  $\theta_l^\circ\text{C} = 1144 - 845.4y + 672.6$  для кривой ликвидуса теллурического угла фазовой диаграммы состояния системы Hg-Cd-Te, которое лучше согласуется с литературными экспериментально полученными данными, по сравнению с известными аналогичными выражениями. На примере раствора с исходным составом  $(\text{Hg}_{0.946}\text{Cd}_{0.054})_{0.194}\text{Te}_{0.806}$  показано, что  $\theta_l^\circ\text{C}$  в этом случае может варьировать в пределах  $\pm 1.8^\circ\text{C}$ , а состав слоев  $x$  - в пределах  $\pm 0.003$ .

Отмечено, что с учетом скоротечности термической диффузии различных примесей в HgCdTe, толстые объемные подложки являются более удобным модельным объектом исследования механизмов атомной диффузии этих примесей, по сравнению с тонкими эпитаксиальными слоями. Описаны методика исследований по диффузии атомов Hg, Cu, Au, In и Pt в объемные кристаллы HgCdTe и изготовления фоточувствительных элементов на их основе, которые были проведены с целью использования результатов в качестве модельных базовых данных при проведении диффузии примеси в эпитаксиальных слоях.

Далее описаны методики и режимы проведения процесса выращивания эпитаксиальных  $p^+$ -  $p$  и  $p^+$ - $n$  структур из InSb, синтеза раствора  $(\text{Cd}_z\text{Hg}_{1-z})_{1-y}\text{Te}_y$  и слоев  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Здесь же представлены результаты исследований особенностей формирования микрорельефа на поверхности эпитаксиальных слоев InSb и HgCdTe, выращенных методом ЖФЭ. проведена классификация основных дефектов, присущих эпитаксиальным слоям и структурам на основе  $p$ - $n$  и  $p^+$ - $p$  из InSb и из CdZnTe-HgCdTe, выращенных методом жидкофазной эпитаксии.

Показано, что в таких структурах возможно формирование более 10 разных типов дефектов роста и описаны механизмы их формирования, а в ряде случаев выработаны рекомендации по их предотвращению. Типы дефектов перечислены ниже: пирамиды роста, вызванные разориентацией поверхности относительно номинально ориентированных плоскостей; эрозия поверхности подложек из-за испарения летучих компонент материала подложки при термическом воздействии и подтравливании парами компонент раствора-расплава; Термоконверсия-протяженные области с измененным типом проводимости, формирующиеся в приповерхностном слое и внутри объема подложки при термическом воздействии в процессе эпитаксии.

**В пятой главе** изложены экспериментальные результаты исследований свойств фоточувствительных элементов на основе диффузионных p-n переходов из HgCdTe, полученных легированием Hg, Cu, In, Au и Pt, а также структурных, электрофизических, оптических и фотоэлектрических свойств эпитаксиальных слоев HgCdTe и структур CdZnTe-HgCdTe. Описана методика подготовки образцов и проведения измерений их различных характеристик. При исследовании фотоэлектрических свойств диффузионных фотодиодов на основе HgCdTe, установлено, что наиболее высокими отношениями сигнал-шум обладают фотодиоды, полученные легированием золота. При этом, фотодиоды, полученные диффузией ртути, имеют граничную частоту амплитудно-частотной характеристики, превышающую 1 ГГц. Это объясняется двухканальным механизмом диффузии ртути в HgCdTe, который совмещает вакансионный и междоузельный механизмы, и обеспечивает кристаллы относительно большей стехиометрией и однородностью свойств, по сравнению с материалом фотодиодов, полученных легированием других примесей и диффундирующих, либо только по вакансионному (Cu, In и Pt), либо по междоузельному механизму (Au).

Далее анализируются рентгеновские дифрактограммы и спектры оптического пропускания эпитаксиальных слоев HgCdTe, снятые до и после отжига, проведенного в парах ртути, обсуждены механизмы влияния отжига на структуру и состав эпитаксиальных слоев. Показано, что на дифракционной картине наблюдаются пики, соответствующие кубическим фазам с преимущественной ориентацией в плоскостях (111), свидетельствующие о высоком качестве кристаллического строения слоев.

На основе исследований оптических свойств и фотопроводимости в эпитаксиальных слоях  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x=0.2-0.30$ ) в температурном диапазоне 77-300К и в спектральном диапазоне 2–11 мкм определен профиль распределения состава  $x$  (мольная доля CdTe) по толщине слоев. Показано, что процессы взаимной диффузии компонентов раствора-расплава  $(\text{Hg}_{1-z}\text{Cd}_z)_{1-y}\text{Te}_y$  и подложки CdZnTe формируют градиент состава и варизонную структуру ширины запрещенной зоны по всей толщине эпитаксиальных слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращенных на поверхности подложек CdZnTe, а так же внутри канавок и на ступеньках, созданных в приповерхностном слое подложки CdZnTe. Профиль распределения состава определяется технологическими условиями проведения эпитаксиального роста: составом раствора-расплава, температурой и длительностью проведения процесса. Варизонность эпитаксиальных слоев приводит к формированию внутреннего квазиэлектрического поля, направленного от широкозонной части структуры к ее узкозонной части. Неравновесные дырки, генерированные излучением в объеме эпитаксиального слоя, отталкиваются этим полем от границы раздела с подложкой, способствуя ослаблению рекомбинационной активности на ее поверхности.

Далее представлены описаны спектры фотоотклика варизонных структур CdZnTe- HgCdTe с эпитаксиальным слоем  $n$ -типа, измеренных в спектральных диапазонах 2 – 5 и 8–12 мкм

при температурах 80К- 114К и при разных напряжениях и полярностях приложенного электрического поля. Происхождение пиков фотоотклика, наблюдаемых в диапазонах 2.3 – 2.5 мкм, 4.0 – 4.5 мкм и 7.0 – 10.0 мкм, и температурная зависимость их интенсивности объяснены влиянием встроенного квазиэлектрического поля. При исследовании полевой зависимости фотоотклика обнаружено, что каждому значению длины волны сигнального излучения соответствует определенное значение напряженности приложенного электрического поля, при котором происходит инверсия знака фотоэдс. Такая привязка между точкой инверсии и электрическим смещением открывает перспективы создания многоцветного фотоприемника со спектром фоточувствительности, управляемым электрическим полем.

Далее описаны результаты изучения воздействия анодного окисления (АО) поверхности эпитаксиальных слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$  в гальваностатическом режиме с последующим термическим отжигом в инертной среде на их электрофизические и фотоэлектрические свойства. Показано, что пики максимумов спектральной зависимости фоточувствительности структур с АО после отжига сдвигаются в длинноволновую область. Этот эффект объясняется изменением состава слоев из-за уменьшения относительного содержания Cd в них произошедшего в процессе анодного окисления. Предложен механизм этого воздействия, включающий следующие стадии: прохождение химической реакции между анодным окислом и компонентами эпитаксиального слоя  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , резкий рост накопления ртути в междоузлиях решетки приповерхностного слоя, диффузия этой ртути в объем эпитаксиального слоя с аннигиляцией с вакансиями ртути при последующем отжиге и изменением его типа проводимости в n-тип.

Представлены экспериментально полученные графики зависимости электропроводности, коэффициента Холла, времени жизни неосновных носителей заряда от температуры в

эпитаксиальных слоях HgCdTe различного состава и определены доминирующие механизмы их рекомбинации. На примере эпитаксиального слоя  $n\text{-Hg}_{0.71}\text{Cd}_{0.29}\text{Te}$  проведен совместный анализ экспериментальных и теоретических зависимостей времени жизни дырок от температуры. Установлено, что в этих слоях рекомбинация неравновесных носителей заряда в области температур 80-110К происходит по механизму Шокли-Рида-Холла (SRH) с участием примесного уровня акцепторного типа  $E_{vr} \approx 80$  мэВ. В области температур 115-120К время жизни  $\tau_{sr}$ , ограниченное SRH рекомбинацией, сравнивается с межзонным излучательным временем жизни  $\tau_{r..}$ . При дальнейшем росте температуры резкое усиление тепловой ре-эмиссии неравновесных дырок в валентную зону обуславливает увеличение  $\tau_{sr}$  до уровня, превышающего расчетное время межзонной излучательной рекомбинации. Таким образом, еще до установления собственной проводимости межзонная излучательная рекомбинация становится доминирующим рекомбинационным процессом в слое и она носит доминирующий характер вплоть до температур  $\approx 300\text{K}$ . При температурах, превышающих 300К, доминирующим механизмом рекомбинации становится межзонный ударный Оже-механизм.

**В шестой главе** представлены результаты исследования структурных, электрических, оптических и фотоэлектрических свойств эпитаксиальных слоев  $p\text{-InSb}$  и структур  $p\text{-n}$ - типа на их основе. Приведены результаты расчета влияния концентрации примеси в подложке и в эпитаксиальном слое на величину темного тока в  $p\text{-n}$ -переходе и на величину его квантовой эффективности и количественно обоснован выбор электрофизических параметров исходной подложки ( $n\text{-InSb}$ ,  $p\text{-InSb}$ ), толщины и величин концентрации носителей заряда в подложке  $\text{InSb}$   $n$ -типа и в эпитаксиальном слое  $p$ -типа, которые оптимальны для получения фотодиодов с заданной обнаружительной способностью ( $D_{5,3 \text{ мкм}}^* \sim 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ). Здесь также представлена методика расчета глубины залегания

p-n перехода, элементного состава и количественного содержания легирующих примесей в растворе–расплаве In-Sb. Показано, что при выборе исходной подложки с концентрацией электронов  $n \approx 1 - 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и минимальной толщиной 160 мкм, и толщины эпитаксиального слоя  $d \approx 1 \text{ мкм}$  возможно достигнуть величины максимальной обнаружительной способности.

Далее показаны результаты оценок коэффициента сегрегации легирующей примеси атомов кадмия  $K_s$  при росте эпитаксиальных слоев из раствора In-Sb. Показано, что  $K_s$  в области слабого легирования  $C_L < 1 \times 10^{17}$  зависит от типа примеси, которой легирована подложка InSb (Te в n-InSb или Ge в p-InSb). В области  $C_L \approx 1 \times 10^{17} - 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  значение  $K_s$  составляет  $\sim 0.30$ , а в области  $5 \times 10^{18} - 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  оно принимает значение  $K_s \sim 0.25$ .

Далее представлены результаты измерений оптического пропускания при 90К и примесной фотопроводимости при 90 и 60 К в структурах с  $p^+$ -контактами ( $p \approx 1 \cdot 10^{17} - 1.2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) в спектральном диапазоне 8–12 мкм с использованием спектрометра ИКС-14. Показана спектральная зависимость коэффициента оптического поглощения в подложках ( $\alpha \approx 1 - 3 \text{ см}^{-1}$ ) в оmeченном оптическом диапазоне. Показано, что в  $p^+$ -слоях коэффициент оптического поглощения  $\alpha$  достигает значения  $7000 \text{ см}^{-1}$  при  $p^+ \approx 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Эти данные по  $\alpha$  в эпитаксиальных слоях InSb для области легирования  $p \geq 3 \cdot 10^{18} - 1.2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  впервые получены нами. Фотопроводимость измерялась при продольном включении электрического поля к  $p^+$ -контактам, которые ограничивают инжекцию электронов в  $p^+$ -р область структуры. Использование такой геометрии продольного резистора определялось ее соответствием топологии двухкоординатной матрицы фотосопровитлений, а также -возможностью двукратного увеличения эффекта фотопроводимости за счет отражения излучения от нижнего электрода. Для исследования ФП спектрометр был преобразован в монохроматор с помощью

параболического зеркала, установленного за призмой и фокусирующего монохроматический поток на образец внутри азотного криостата. При сравнении данных по фотопроводимости было показано, что значение  $\alpha \approx 1-3 \text{ см}^{-1}$ , измеренное в подложках, завышено по сравнению с их оценками ( $\alpha \approx 0.1 \text{ см}^{-1}$ ). Объяснение этого различия было объяснено тем, что оптические переходы дырок, ответственные за фотопроводимость, маскируются переходами электронов в зону проводимости. Сечение фотоионизации для этих переходов не превышает  $1 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ .

На основе совместного анализа экспериментально полученной зависимости подвижности дырок от концентрации примеси в эпитаксиальных слоях p-InSb и теоретических моделей рассеяния носителей заряда установлены механизмы рассеяния дырок в них. Установлено, в частности, что во всем диапазоне концентраций  $1 \times 10^{16} - 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  действует смешанный механизм рассеяния на акустических фонах и на ионах примеси, а влиянием оптического фононного рассеяния можно полностью пренебречь. С ростом концентрации дырок выше  $p > 5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  влияние рассеяния на ионах примеси возрастает.

Далее представлены результаты изучения механизмов токопрохождения и фотопроводимости в эпитаксиальных p - n структурах из InSb. Обсуждены ВАХ, полевая зависимость дифференциального сопротивления, величины напряжения холостого хода фотодиодов, изготовленных на их основе, длины диффузии носителей тока  $L_n$  и пр. На кривых дифференциального сопротивления образцов при обратных смещениях величиной  $V = 75 \div 100 \text{ мВ}$  наблюдаются точки изломов, свидетельствующих о том, что именно при этих смещениях происходит смена рекомбинационно-генерационного механизма токопрохождения на диффузионный. Величина напряжения холостого хода фотодиодов при фоновом освещении находится в пределах 90 - 120 мВ, так же как и у мировых аналогов (Россия, США), изготовленных диффузией и ионной имплантацией, а

обнаружительная способность при  $\lambda=5.5 \mu\text{m}$  достигает значения  $D_{\lambda=5.5 \text{ мкм}}^* \approx 4 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ .

**В седьмой главе** представлено описание физических принципов действия и методов изготовления нижеперечисленных типов фоточувствительных элементов на основе эпитаксиальных структур из InSb и HgCdTe с параметрами, пригодными для изготовления ИК-фотоприемников, разработанных нами.

**А) Матричный ФП** на основе эпитаксиальных варизонных структур CdZnTe-HgCdTe, выращенных в узких канавках, сформированных на поверхности подложки CdZnTe (рис.3). В этом устройстве используются преимущества, предоставляемые варизонным характером эпитаксиальных слоев, а также близостью некоторых физических параметров эпитаксиальных слоев HgCdTe и подложки CdZnTe.

**Б) Многополосный ИК – фотоприемник** на основе варизонных слоев HgCdTe на подложке CdZnTe со ступенчатым профилем. Общий вид конструкции и подробный список его составных частей такого фотоприемника представлен на рис.4.

Его конструкция основана на фоточувствительных эпитаксиальных слоях, выращенных на подложке CdZnTe, на поверхности которой методами химического травления изготовлены несколько ступенек. Фотоприемник состоит из широкозонного полупроводника CdZnTe (1) и варизонного эпитаксиального слоя  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с верхней плоской поверхностью, общей и компланарной для всех спектральных полос ИК-сигнала (2). Из-за разницы в толщинах, эпитаксиальные слои, выращенные поверх каждой ступени подложки, имеют различные значения ширины запрещенной зоны на поверхности.



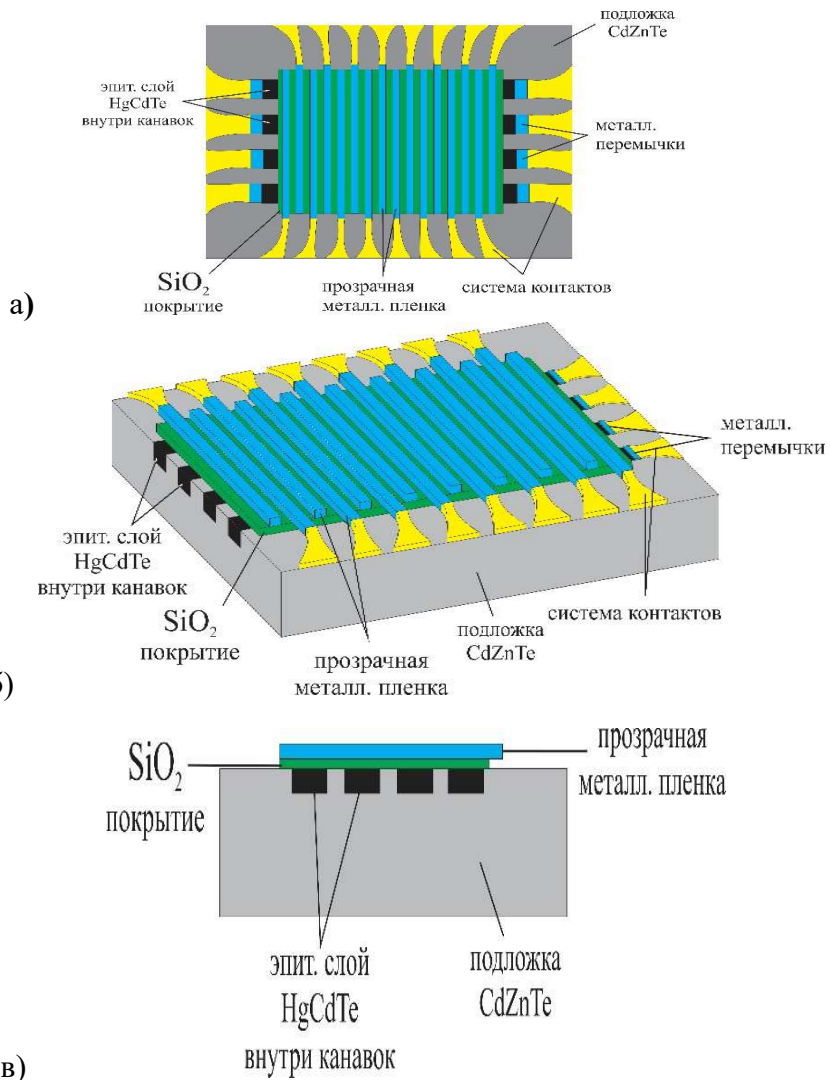


Рис. 3. Общий вид конструкции матричного фотоприемника а)- вид сверху ; б)объемное изображение с сечением справа в области концевых участков эпит.слоев (электрические контакты не показаны) ; в)поперечное сечение

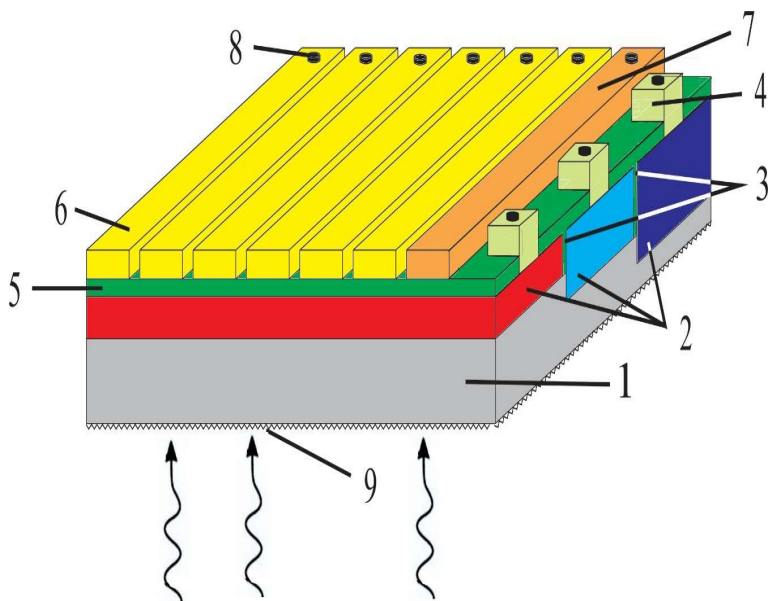


Рис.4. Общий вид конструкции ИК- фотоприемника с тремя спектральными каналами на подложке со ступеньками 1- подложка CdZnTe, 2-эпитаксиальный слой с дискретным распределением состава на разных ступеньках подложки, 3-разделительные канавки цветности, заполненные диэлектриком, 4- считывающие электроды, 5- слой изолятора-диэлектрика, 6- затворные электроды, 7- электрод накопления заряда, 8- контакты для монтажа структуры со схемой управления и обработки сигналов, 9- антиотражательный слой

Для разграничения каналов цветности фотопреобразователя участки слоя эпитаксиального слоя с разными составами (2) разделены узкими канавками (3), заполненными диэлектриком. Поверхность эпитаксиального слоя, за исключением области считывающих электродов (4), закрыта слоем прозрачного окисла (5), на который нанесены затворные (6) и накопительные электроды 7. Для монтажа структуры со схемой управления и

обработки сигналов изображения на всех электродах установлены контакты (8). На обратную сторону подложки нанесен антиотражающий слой (9).

Принцип работы устройства основан на принципе действия Приборов с зарядовой связью (ПЗС). Сигнальное излучение, подлежащее регистрации, в течение времени экспонирования генерирует носители заряда на поверхности эпитаксиального варизонного слоя. Эти носители накапливаются в потенциальных ямах, а после завершения экспозиции при сбросе напряжения они немедленно переносятся вдоль каждой из строк ПЗС на устройства вывода информации. Таким образом, подсоединив считывающий электрод (4) к схемам полевых транзисторов внешних усилителей, можно осуществлять считывание последовательности сигналов, описывающих интенсивность распределения освещенности вдоль линейки ПЗС в спектре длин волн, определенном шириной запрещенной зоны варизонного полупроводника в области слоя, на поверхности которого она зарегистрирована.

**В)** На основе эпитаксиальных  $p^+n$ - структур из InSb были разработаны и изготовлены фотодиоды, с толщиной  $p^+$  слоя 5-10 мкм и диаметром фоточувствительной площадки ~3мм. Конструкция этого фотодиода показана на рисунке 5. На первом этапе его изготовления на поверхности эпитаксиальной структуры с размерами 10 мм х 20 мм с применением с применением фотолитографии были созданы несколько заготовок фотодиодов. Для предотвращения закороток  $p$  и  $n$ -областей по поверхности на этой структуре химическим травлением была вытравлена “меза-структура” с соответствующей изолирующей канавкой и плазмохимическим паровым осаждением (CVD) тонкого слоя  $SiO_2$  произведена изоляция поверхности. После скрайбирования заготовки из материнской пластины на отдельные элементы эпитаксиальной пассивирующий слой каждого фотодиода защищался от воздействия окружающей среды механически устойчивым

негативным фоторезистивным материалом. Тыльная сторона фотодиода также была пассивирована  $\text{SiO}_2$ . Затем на эпитаксиальный слой p-InSb напылялась трехслойная металлизация Pt ( $7000\text{\AA}$ )/ Cr ( $3000\text{\AA}$ ) / Au ( $3000\text{\AA}$ ), а на подложку n-InSb был напылен двойной слой Cr ( $3000\text{\AA}$ )/Au ( $3000\text{\AA}$ ), служащий омическим контактом.

Г) Фотоприемник ИК излучения дальнего диапазона из InSb на основе эффекта фотопроводимости, обусловленной разогревом легких дырок излучением на эпитаксиальном p<sup>+</sup>-p барьере из InSb с квантовой эффективностью ~1%.

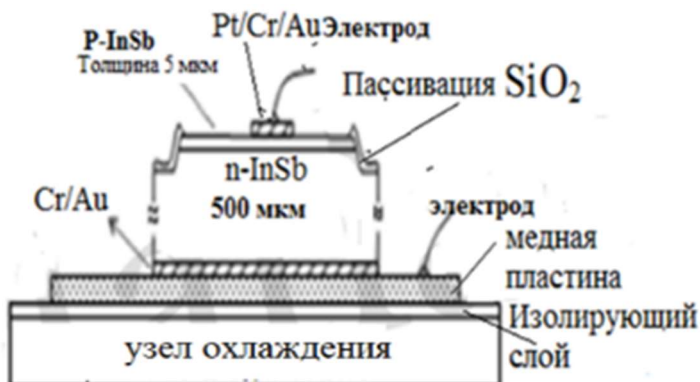


Рис.5. Конструкция фотодиода из InSb

Было показано, что из-за малой величины эффективной массы легких дырок в p-InSb в нем велика вероятность внутризонного поглощения, сопровождающегося процессом генерации горячих легких дырок. Это позволяет рассматривать эффект разогрева носителей заряда в качестве эффекта, альтернативного примесному фотоэффекту.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в процессе жидкофазной эпитаксии взаимная диффузия компонентов раствора-расплава  $(\text{Hg}_{1-z}\text{Cd}_z)_{1-y}\text{Te}_y$  и подложки  $\text{CdZnTe}$  приводит к формированию градиента состава и варизонной структуры ширины запрещенной зоны и квазиэлектрического поля по всей толщине эпитаксиальных слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращенных на поверхности и внутри приповерхностных канавок подложки. Профиль распределения состава по толщине определяется составом раствора-расплава  $\text{Hg-Cd-Te}$ , температурой и временем протекания эпитаксиального роста [49,66,69].
2. Выявлены особенности формирования микрорельефа и дефектообразования на поверхности эпитаксиальных слоев  $\text{InSb}$  и  $\text{HgCdTe}$ , выращенных методом ЖФЭ. Показано, что в таких структурах возможно формирование более 10 разных типов дефектов роста, обусловленных кинетикой кристаллизации из жидкого раствора, кристаллографическими особенностями подложек, условиями проведения эпитаксиального процесса, а также конструкциями устройств и оснасток, использующихся для проведения эпитаксии. Проведена подробная классификация этих дефектов, установлены и описаны механизмы их формирования [47,50,54,55].
3. Предложен механизм влияния анодного окисления поверхности эпитаксиального слоя  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с p- типом проводимости с последующим термическим отжигом в аргоне на электрофизические и фотоэлектрические свойства слоев, включающий следующие стадии: прохождение химической реакции между анодным окислом и компонентами эпитаксиального слоя  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , резкий рост накопления ртути в междоузлиях решетки приповерхностного слоя и ее диффузия в объем эпитаксиального слоя с заполнением вакансий ртути при последующем отжиге и изменением его типа проводимости в n-тип [30,32,34,36].

4. Разработана методика количественной оценки влияния вариаций давления ртути в ампуле в процесса синтеза раствора-расплава с исходным составом  $(\text{Hg}_{1-z}\text{Cd}_z)_{1-y}\text{Te}_y$  и расчетной температурой ликвидус  $T_l$  на величины вариаций температуры ликвидус ( $\theta_l$  °C) синтезированного раствора и состава  $x$  эпитаксиальных слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , выращиваемых из него. На примере раствора с исходным составом  $(\text{Hg}_{0.946}\text{Cd}_{0.054})_{0.194}\text{Te}_{0.806}$  показано, что в процессе его синтеза  $\theta_l$  °C может варьировать в пределах  $\theta_l$  °C =  $T_l \pm 1.8$  °C, а  $x$  - в пределах  $x \pm 0.003$ . Получено новое эмпирическое выражение  $\theta_l$  °C =  $1144 - 845.4y + 672.6z$  для кривой ликвидуса Te-угла фазовой диаграммы системы Hg-Cd-Te [48,49,67].

5. На основе исследований диффузионного легирования HgCdTe различными примесями (Hg, In, Au, Pt, Cu) установлено, что двухканальный механизм диффузии ртути в HgCdTe, совмещающий вакансионный и межузельный механизмы диффузии, обеспечивает сохранение стехиометрии кристаллов и позволяет получать на их основе фотодиоды с граничной частотой амплитудно-частотной характеристики, величина которой ( $\sim 1$  ГГц) выше, чем у фотодиодов, полученных легированием примесей, диффундирующих только по одному из механизмов- межузельному (Au) или вакансионному (Pt, Cu, In) [8,11,18,23,25,27,29,56].

6. Коэффициент сегрегации  $K_s$  акцепторной легирующей примеси атомов кадмия в эпитаксиальных слоях p-InSb зависит от ее концентрации ( $C_L$ ) в растворе In-Sb. В области слабого легирования  $C_L < 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$   $K_s$  зависит от типа легирующей примеси (Te или Cd) подложки InSb. В области концентраций  $C_L \approx 1 \times 10^{17} - 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  эта величина имеет значение  $K_s \sim 0.30$ , а в области  $C_L \approx 5 \times 10^{18} - 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  - значение  $K_s \sim 0.25$  [9,37,68].

7. На основе анализа зависимости подвижности дырок от концентрации примеси Cd в эпитаксиальных слоях p-InSb установлено, что во всей области  $1 \times 10^{16} - 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  концентраций дырок в слоях действует смешанный механизм рассеяния дырок

на акустических фонах и на ионах примеси. Влияние рассеяния на ионах примеси возрастает только с ростом концентрации дырок выше  $2 \times 10^{19} \text{см}^{-3}$  [68].

8. В эпитаксиальных слоях  $n\text{-Hg}_{0.71}\text{Cd}_{0.29}\text{Te}$  в температурных областях, как собственной (200-300К), так и примесной проводимости (80-200К) рекомбинация неравновесных носителей заряда происходит по механизму межзонной излучательной рекомбинации. При этом в области 80-200К время жизни носителей определяется одновременным действием двух механизмов - межзонной излучательной рекомбинации и рекомбинации Шокли-Рида-Холла через глубокий уровень акцепторного типа  $E_{\text{VT}} = 80$  мэВ. При температурах выше 300К доминирующим механизмом рекомбинации является межзонный ударный Оже-механизм с участием двух электронов и легкой дырки [69].

9. Разработаны и изготовлены новые кассеты различного типа для ЖФЭ слоев  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  и  $\text{InSb}$  в открытых и замкнутых системах роста, обеспечивающие условия для бездефектного роста эпитаксиальных слоев [2,4,39,40,45,49,67].

10. Разработаны физико-химические основы технологии выращивания эпитаксиальных  $p^+$ -р и  $n$ -р структур  $\text{InSb}$  в горизонтальной системе в протоке водорода с использованием графитового контейнера слайдерного типа, а также ЖФЭ  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  из растворов-расплавов,  $(\text{Cd}_z\text{Hg}_{1-z})_{1-y}\text{Te}_{1-y}$ , обогащенных  $\text{Te}$ , в замкнутой кварцевой ампуле с удалением раствора-расплава путем опрокидывания. Разработаны технологические маршруты изготовления фоточувствительных элементов, включающие химико-механическое и химическое полирование, финишное химическое травление поверхности пластин  $\text{InSb}$  и  $\text{CdZnTe}$ , а также методика роста эпитаксиальных  $p^+$ -р и  $n$ -р структур [22,23,30–36, 41,42,46,48,52,53,57,58,67]

11. Разработаны конструкции и методы изготовления фоточувствительных элементов различных вариантов

высокоэффективных приемников ИК излучения, перечисленных ниже:

- фотоприемника на основе эпитаксиальных варизонных структур CdZnTe-HgCdTe, выращенных в узких канавках приповерхностного слоя изолирующей подложки CdZnTe;

- трехцветного фотоприемника типа ПЗС с варизонными эпитаксиальными слоями HgCdTe, выращенными на ступенчатой подложке CdZnTe ;

- эпитаксиального фотодиода на основе  $p^+ - n$  – структуры из InSb с высокой обнаружительной способностью  $D^* = 5 \cdot 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$  ( $\lambda = 5.3 \text{ мкм}$ );

- модель фотоприемника инфракрасного излучения дальнего диапазона из InSb с квантовой эффективностью  $\sim 1\%$  и фоточувствительностью на уровне 0.16 А/Вт, действующего на основе эффекта фотопроводимости, обусловленной разогревом легких дырок излучением на эпитаксиальном InSb  $p^+ - p$  барьере [1,3,5,7,12,14,16,17,21,41,61,63,66].

### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Попов, Ю.Г. Преобразователь изображения с электронным коммутатором. Авторское свидетельство № 205955, СССР/ Эминов Ш.О., Красницкая С.Д. –1984.
2. Попов, Ю.Г. Устройство для жидкостной эпитаксии. Авторское свидетельство № 1082078, СССР/Эминов Ш.О., – 1983.
3. Попов, Ю.Г. ИК-фотодетектор матричного преобразователя изображения. Авторское свидетельство № 227804, СССР / Эминов Ш.О., Попова С.Д. –1985.
4. Эминов, Ш.О. Устройство для ЖФЭ //Авторское свид. № 1707090, СССР / Гусейнов Э.К., Гусейнов Д.И.[и др] – 1991.
5. Эминов, Ш.О. Квантовая эффективность надбарьерной фотоэмиссии дырок через  $p^+$ -контакт./ Ш.О. Эминов. //Деп. в ЦНИИ “Электроника”.Р-4307, “Сборник рефератов



- НИОКР, обзоров, переводов и депонированных рукописей”.– 1986 , №50. Сер.”РТ”.
6. Эминов, Ш.О., Попов, Ю.Г., Гусейнов, Э.К. Оптическое поглощение и фоточувствительность эпитаксиальных  $p^+$ -р слоев InSb // Тезисы докладов II научной конференции “Фотоэлектрические явления в полупроводниках”, Ашхабад, –1991, с.337-338.
  7. Эминов, Ш.О., Гусейнов, Э.К., Везиров, Х.Н. Надбарьерная фотоэмиссия дырок в  $p^+$ -р структурах из InSb // Тезисы докладов 5 -й Республиканской межвузовской научной конференции по физике, Баку, –1992,– с.67.
  8. Эминов, Ш.О., Гусейнов, Э.К., Раджабли А.А. Получение  $p$ -  $n$  переходов в HgCdTe методом ионного внедрения //Тезисы докладов Республиканской межвузовской научной конференции“Физика-93”, Баку , сентябрь, –1993, –с.127.
  9. Попов, Ю.Г., Эминов, Ш.О., Гусейнов, Э.К. Распределение кадмия в эпитаксиальных  $p^+$ -р структурах из антимонида индия / Ю.Г.Попов, Ш.О., Эминов, Э.К. Гусейнов //Неорганические Материалы (РАН), –1993, т.29, № 8 ,– с.1148-1149.
  10. Эминов, Ш.О., Гусейнов Э.К., Алиев А.А., Раджабли А.А. Особенности спектров фотоотклика эпитаксиальных слоев  $n$ - $Cd_xHg_{1-x}Te$ / Ш.О. Эминов, Э.К.Гусейнов, А.А. Алиев [и др] // Fizika, –1999, –№1, с.12-14.
  11. Эминов, Ш.О., Алиев, А.А., Раджабли, А.А. Amplitude-frequency characteristics of  $Cd_xHg_{1-x}Te$  ( $x =0.2$ ) photodiodes / Proceedings of the Second. Intl. Symposium on Mathematical & Computational applic.Баку,–1999, –р.85
  12. Эминов, Ш.О. Матричный твердотельный преобразователь изображения. Patent № 20000216, Azərbaycan Respublikası /Алиев А.А., Гусейнов Э.К., Мамедов А.К. [и др.].
  13. Эминов, Ш.О. Устройство для ЖФЭ роста и фотопроводимость варизонных эпитаксиальных слоев

- $Cd_xHg_{1-x}Te$  // Тезисы докладов IX Национальной Конференции по росту кристаллов, Москва, –16–20 октября, –2000, –с.243.
14. Aliyev, A.A, Multi-channel infrared imager /Aliyev A.A, Mamedov A.K., Nasibov I.A., Eminov Sh.O. [et al] // SPIE Proceedings, –2000, v.4340, –p.128-132.
  15. Эминов, Ш.О. Электрические свойства эпитаксиальных  $p^+$  -  $p$  структур на основе компенсированного  $p$ -InSb //12-й Межд. Симпозиум “Тонкие пленки в электронике” (ISTFE-12) Харьков,–23–27 апреля,–2001, –с.18-20.
  16. Эминов, Ш.О., Ибрагимов, Т.И. Цветной ИК-фотоприемник на основе  $Cd_xHg_{1-x}Te$ //Fizikanın aktual problemləri II Respublika elmi konfransı, Bakı, –2001, –с.30.
  17. Попов, Ю.Г., Эминов, Ш.О. Длина свободного пробега и квантовая эффективность внутренней фотоэмиссии дырок на  $p^+$  -  $p$  переходе из InSb// 14-й Международный Симпозиум “Тонкие пленки в электронике” (ISTFE-14) Харьков,– 22-27 апреля,–2002, –с.34-35.
  18. Эминов, Ш.О., Раджабли, А.А., Алиев, А.А. [и др.] Сравнительный анализ характеристик фотодиодов на основе  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , полученных диффузией различных элементов //III Межд. Конф. “Аморфные и микрокристаллические полупроводники”, Ст.- Петербург, – 2-4 июля, –2002,– с.19-20.
  19. Эминов, Ш.О., Гусейнов, Э.К., Раджабли, А.А. и др. Особенности роста ЖФЭ слоев из InSb // “Харьковская научная ассамблея“Высококачественные металлические и полупроводниковые материалы, ISPM-8”, Харьков, –22-27 апреля,–2002,– с.20-22.
  20. Эминов, Ш.О., Раджабли, А.А. Влияние термической обработки на характеристики фотодиодов изготовленных из сплава теллурид ртути- теллурид кадмия //3-я Международная конф.«Оборудование и технологии

- термической обработки металлов и сплавов», Харьков,– 9-13 сентября,–2002, –с.34-36.
21. Эминов, Ш.О. Фотоприемники ИК-диапазона на основе узкозонных материалов CdHgTe и InSb для средств связи //YAP-in 10-illik yubileyinə həsr olunmuş “Rabitə və elmi-texniki tərəqqi” Konfransı, Bakı, –2002,–с.38–39.
  22. 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 электрон-ной микроскопии РЭМ-2003”, Москва,–2-4 июня,–2003, –с.110-111.
  23. Эминов, Ш.О., Раджабли, А.А, Ибрагимов, Т.И.[и др.] Влияние термообработки на свойства р-п переходов в CdHgTe /Труды 4-й Межд. Конф. “Оборудование и технологии термообработки металлов” ,Харьков, –2003, – с.17-19.
  24. Эминов, Ш.О. Совместное изучение ВАХ и продольной фотопроводимости в эпитаксиальных структурах из InSb / Ш.О., Эминов А.А. Раджабли, А.А. Дадашев // АМЕА Хəбərləri , Fizika və astronomiya –2003, т. XIII, №2, –с. 76-79.
  25. Эминов, Ш.О., Раджабли, А.А., Ибрагимов, Т.И. Воздействие импульсного гамма-излучения и импульсного нейтронного облучения на фотоэлектрические свойства ионно-имплантационных р-п переходов из HgCdTe // Сб.трудов Нац. Конф.“РСНЭ 2003”,Москва, 17-22 ноября,–2003, –с.23.
  26. Эминов, Ш.О., Раджабли А.А, Ибрагимов Т.И. [и др] Оптическое пропускание и фотопроводимость в эпитаксиальных слоях InSb // Тезисы докладов IV Межд. Конференции “Аморфные и микрокристаллические полупроводники”, Ст.-Петербург,–5–7 июля,–2004,– с.378-379.

27. 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,— 25-28 мая,—2004, —с.97.
28. Эминов, Ш.О. Оптическое пропускание и примесная фотопроводимость в InSb/ /“Fizkia-2005”Beynəlxalq Konfrans məqalələr toplusu, Bakı,— 7-9 iyun,—2005,—s. 667-670.
29. Эминов, Ш.О., Раджабли, А.А, Ибрагимов, Т.И. Влияние радиационного облучения на характеристики диффузионных и имплантационных фотодиодов из HgCdTe //“Fizkia-2005” Beynəlxalq Konfrans, məq. toplusu, Bakı,—7-9 iyun, —2005, —s.684-687.
30. Гусейнов, Э.К., Эминов, Ш.О., Раджабли, А.А. [и др.] Влияние отжига на свойства эпитаксиальных слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$  с анодным окислением // Тезисы докладов XIX Научно-технической конфер. по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва,—23- мая,—2006, —с. 49.
31. Эминов Ш.О. Особенности роста ЖФЭ слоев антимонида индия / Труды XII Национальной конференции по росту кристаллов НКРК-2006, Москва,— 23-27 октября, —2006, — с.298.
32. Huseynov, E. K. Thermal annealing impact on properties of  $Cd_xHg_{1-x}Te$  epitaxial layers with anodic oxidation / E.K. Huseynov, Sh.O. Eminov, A.A, Radjabli // SPIE, —2007 v. 6636 , —p 663616-1-663616-3.
33. Эминов, Ш.О.Воздействие ионизирующего излучения на электрические и фото-электрические свойства фотодиодов на основе  $Cd_xHg_{1-x}Te$  / Ш.О. Эминов, Э.К.Гусейнов Э.К., Раджабли А.А. [и др.] // Прикладная физика, —2007, №4, с.115-118.

34. Эминов, Ш.О. Термоконверсия типа проводимости анодно-окисленных эпитаксиальных слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$ / Ш.О. Эминов, Э.К. Гусейнов [ и др] // АМЕА Хəбərləri, Fizika-və astronomiya seriyası, –2007, №5, –с.99-102.
35. Гусейнов, Э.К., Эминов, Ш.О., Раджабли, А. А. [ и др] Ибрагимов, Т.И. Особенности получения эпитаксиальных слоев  $HgCdTe$  методом жидкофазной эпитаксии. Тезисы докладов XX межд. Научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, – 27-30 мая, -2008, –с. 131-132.
36. Эминов, Ш.О. Влияние отжига на свойства эпитаксиальных слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$  с анодным окислением/ Ш.О. Эминов, А.А. Раджабли, Н.Д. Исмаилов. [ и др] // Прикладная физика, –2008, №4, – с.132-135.
37. Эминов, Ш.О. Электрические свойства эпитаксиальных слоев и р-п–переходов из  $InSb$ , выращенных методом ЖФЭ / Ш.О. Эминов, Э.К. Гусейнов, А.А. Раджабли [ и др] // Fizika, 2008, т. XIV, №3, с. 101-106.
38. Эминов, Ш.О. Химическое травление полярных плоскостей  $\{111\}InSb$  при подготовке к жидкостной эпитаксии/ Ш.О. Эминов // Fizika, –2009, т. XV, №2, –с. 96-100
39. Эминов, Ш.О. Устройство для жидкофазной эпитаксии / Э.К. Гусейнов, А.А. Раджабли [ и др] // Заявка на изобретение рег. № 20080107, Приоритет 2008, Баку, – 2008
40. Эминов, Ш.О. [ и др] Мамедова Э.А., Мухтарова Р.И., Ибрагимов Т.И. Кассета для жидкофазной эпитаксии в горизонтальном реакторе/ Ш.О. Эминов, Э.К. Гусейнов, А.А. Раджабли [ и др] // АМЕА Хəбərləri, Fizika-və astronomiya seriyası, –2009, №5, – с. 148-152.
41. Sareminia, Gh., Eminov, Sh.O., Hajian, M.G. [et al]. Characterization of photodiodes made from a p– type epitaxial layer grown on n- type  $InSb$  by LPE method // Proceedings of

- 16<sup>th</sup> Iranian Conference on Optics and Photonics, Yazd, Iran– 26-28 January– 2010.
42. Эминов, Ш.О. Влияние методики полирования подложек  $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$  на жидкофазную эпитаксию слоев  $\text{CdHgTe}$ / Ш.О. Эминов, А.А. Раджабли, Т.И. Ибрагимов // Неорганические материалы, –2010, т. 46, №7, – с.796-800.
  43. Эминов, Ш.О., Гусейнов, Э.К., Раджабли, А.А. [и др] Алиев А.А., Ибрагимов Т.И. Особенности роста ЖФЭ слоев  $\text{HgCdTe}$  // Тезисы докладов XXI Межд. Н-т конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, – 25-28 мая, –2010, –с.203.
  44. Гусейнов Э.К., Исмаилов Н.Д., Эминов Ш.О. [и др]. Двухдиапазонный фотоприемник на основе  $\text{HgCdTe}$  // Тезисы докладов XXI межд. Н-т конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, – 25-28 мая, –2010, –с.195-196.
  45. Эминов, Ш.О. Устройство для жидкофазной эпитаксии/ Ш.О. Эминов, А.А. Раджабли // Приборы и техника эксперимента, –2010, № 2, –с.153-155.
  46. Eminov, Sh.O The characteristic study of  $\text{InSb}$  epitaxial layers grown by LPE/ Sh.O Eminov, E.K Huseynov, A.A. Rajabli [et al.] // Azerbaijan Journal of Physics, –2010, № 2, –р.42-46
  47. Эминов, Ш.О., Зависимость состояния поверхности подложек  $\text{CdZnTe}$  от методики полирования/ Ш.О.Эминов, А.А. Раджабли, Т.И. Ибрагимов [ и др] // АМЕА Хəбərлəri, Fizika- və astronomiya, 2010, № 2, –с. 148-154.
  48. Huseynov, E.K., Eminov, Sh.O., Rajabli, A.A. [et al]. Growth features of  $\text{HgCdTe}$  LPE layers // The International Conference ICTM-17, Baku, –27-30 September, –2010.
  49. Huseynov, Emil. Evaluation of composition reproducibility of  $\text{HgCdTe}$  epitaxial layers grown in novel liquid phase epitaxy apparatus / Emil Huseynov , Shikhamir Eminov, Alovzat Rajabli [et al.]// Jap. J. of Applied Phys., –2011, v. 50, № 5, – p.05FB16-1 -05FB16-2.

50. Эминов Ш.О., Раджабли А.А., Сеидли Г.С.[и др]. /Дефектообразование в эпитаксиальных слоях InSb /Fizikanın Müasir Problemləri IV Resp. Konfransı, –Bakı, 24-25 dekabr,–2010, с. 1- 4 .
51. Эминов, Ш.О., Сеидли, Г.С. Особенности роста эпитаксиальных слоев HgCdTe для ИК теплового контроля реакторов// The Conference Perspectives of peaceful use of nuclear energy, –Baku, –8-10 November, 2010, –с. 100- 101.
52. Sareminia, Gh. Characterisation of photodiodes, made from a p-type epitaxial layer grown on n-type <111> InSb by LPE method/ Gh.Sareminia, M. Hajian, H. Simchi , Eminov Sh.[ et al.] // Infrared Physics & Technology, –2010, v.53, № 5, – p.315-319.
53. Эминов, Ш.О. Жидкостное химическое травление плоскостей (111)In и (111)Sb подложек из InSb / Ш.О. Эминов, Х.Д. Джалилова [ и др.] //Неорган. Мат., –2011, том 47, № 4, –с. 394-398.
54. Eminov, Sh. O., Huseynov, E.K., Rajabli,A.A.[et al.] Defects in InSb and InSbBi layers grown by LPE //Proceedings of 5<sup>th</sup> International Workshop on Crystal Growth Technology, June 26- 30, –2011, Berlin, –p.53-54.
55. Eminov, Sh.O., Rajabli, A.A., Mamedova, E.A. Defect formation in InSb and InSbBi epilayers grown by LPE /Alternativ və bərra olunan enerji mənbələrindən istifadənin perspektivləri”Konfransı, 1-2 iyun , Bakı,–2011, – p. 54-55.
56. Эминов, Ш.О., Раджабли, А.А., Аббасов, И.И. Влияние радиационного излучения на АЧХ р-п переходов из HgCdTe / Alternativ və bərra olunan enerji mənbə-lərindən istifadənin perspektivləri”Konfransı,Bakı,– 1-2 iyun, 2011,c.82-83.
57. Sareminia, Gh. Cleaning method of InSb [111]B of n-InSb [111] A/B for the growth of epitaxial layers by liquid phase epitaxy / Gh Sareminia, F.Zahedi, Sh. Eminov [et al.]//Journal of Semiconductors,–2011,v.32, №5,–p. 056001-056001.

58. Eminov, Sh.O., Mamedova, E.A. Growth and characterization of LPE grown InSb and InSbBi epitaxial layers /Труды Конференции стран СНГ по росту кристаллов, P30(A2).Секция А(2)Функциональные кристаллические материалы, Харьков, 1-5 октября, –2012, – с.128.
59. Ismayilov, N.J. High sensitive p-CdxHg1-xTe (x=0.23-0.3) based photoconductor with surface conversion layer / N.J. Ismayilov, E.K. Huseynov, A.A. Aliyev, Sh.O. Eminov //Azerb.Journal of Physics, – 2015, №3, –p.13-17.
60. Эминов, Ш.О. Оценка параметров разогретого фотоэффекта в эпитаксиальных P<sup>+</sup>-P структурах InSb/ Ш.О. Эминов, Т.Г. Гардашова., Э.А. Ибрагимова // АМЕА Хəбərləri, Fizika və astronomiya , –Bakı:–2015, № 2, –с. 19-27.
61. Эминов, Ш.О. Изучение примесной фотопроводимости в p-InSb с использованием эпитаксиальных p<sup>+</sup>-контактов / Ш.О. Эминов // Физика и техника полупроводников, –2016, т.50, №8, –с.1025-1029.
62. Исмаилов, Н.Д., Гасанов, И.С., Эминов, Ш.О. Высококчувствительные двухслойные фоторезисторы на основе HgCdTe с конвертированным приповерхностным слоем /Сб. докладов XXIV Международной конференц. по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 24-27 мая, Москва, –2016, с. 525-530.
63. Эминов, Ш.О. ИК-фотоприемник на основе HgCdTe с варизонными эпитаксиальными слоями, выращенными в приповерхностном слое CdZnTe подложки/ Ш.О Эминов, А.А. Алиев Т.И Ибрагимов [ и др.] // АМЕА Хəбərləri, Fizika və astronomiya , Bakı:– 2017, №2,–с. 56-73.
64. Эминов, Ш.О. Вольтамперные характеристики эпитаксиальных P<sup>+</sup>-P и P<sup>+</sup>-P -P<sup>+</sup> переходов на основе антимонида индия/ Ш.О. Эминов , Э.А. Ибрагимова , Т.И. Ибрагимов // АМЕА Хəбərləri, Fizika və astronomiya, Bakı:– 2018, cild XXXVII, №5, –с.120-124.



65. Эминов, Ш.О. Характеристики эпитаксиальных  $p^+$ -n структур InSb, выращенных методом ЖФЭ / Ш.О. Эминов, // Azerbaijan Journal of Physics, Fizika, –2018, №3, section: Az, –с. 107-109.
66. Эминов, Ш.О. Фотоприемники ИК-излучения на основе варизонных эпитаксиальных слоев HgCdTe / Ш.О. Эминов // Azerbaijan Journal of Physics, Fizika, –2018, №3, section: Az, –с. 23-25.
67. Eminov, Sh.O. Liquid phase epitaxy apparatus and features of HgCdTe layers / Sh.O. Eminov //Electrical & Electronic Technology Open Access Journal, – 2018, v. 2, №5, – pp. 322–325.
68. Гардашова, Т.Г. Коэффициент сегрегации кадмия и подвижность дырок в эпитаксиальных слоях p-InSb, выращенных методом ЖФЭ // Т.Г.Гардашова, Ш.О.Эминов, Э.А. Ибрагимова [и др.] АМЕА Хəбərləri // Fizika və astronomiya – 2019, №5, –с.98-104.
69. Эминов, Ш.О. Особенности фоточувствительности и рекомбинационных процессов в эпитаксиальных слоях  $Hg_{1-x}Cd_xTe$ , выращенных жидкофазной эпитаксией // Ш.О.Эминов, А.А.Алиев, А.А.Раджабли и др. /АМЕА Хəбərləri, Fizika və astronomiya – 2021, №2,–с.26-33.

Защита диссертации состоится 03 ноября 2021 года

в 14<sup>00</sup> на заседании Одноразового Диссертационного совета ВЕД 1.14 на основе Диссертационного совета ED 1.14 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующего на базе Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана

Адрес: г. Баку, AZ1143, пр. Г.Джавида, 131

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на официальном сайте Института Физики Национальной Академии Наук Азербайджана

Автореферат разослан по соответствующим адресам

“01 “ октября 2021 года



Подписано в печать: 29.09.2021

Формат бумаги: А5

Объём: 80720 знаков

Тираж: 70