

АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ РЕСПУБЛИКА

На правах рукописи

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ
ИК-ФОТОПРИЕМНИКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ $Cd_xHg_{1-x}Te$**

Специальность: 2203.01- Электроника

Отрасль науки: Физика

Соискатель: **Исмайлов Намик Джамиль оглы**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора наук

БАКУ – 2023

Диссертационная работа выполнена в лаборатории «Инфракрасная фотоэлектроника и плазменные явления» Института Физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики.

Официальные оппоненты:

Член-корреспондент Национальной Академии Наук Азербайджана (НАНА), доктор физ.-мат. наук, профессор
Октай Казым оглы Гасымов
Доктор физ.-мат. наук, доцент
Аяз Хидаят оглы Байрамов
Доктор физ.-мат. наук, профессор
Камал Аскер оглы Аскеров
Доктор физ.-мат. наук, профессор
Вагиф Али оглы Магеррамов

Диссертационный совет ED1.14 Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики, действующего на базе Института Физики Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики.

Председатель диссертационного совета:



Академик
Ариф Мамед оглы Гашимов

Ученый секретарь диссертационного совета:



Доктор физических наук, доцент
Рафига Забил кызы Мехтиева

Председатель научного семинара:



Действительный член НАНА, доктор физ.-мат. наук, профессор
Джавад Шахвалед оглы Абдинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и разработанность темы исследования:

Одним из перспективных направлений современной электроники является ИК-фотоэлектроника. Это связано с тем, что важная часть информации об окружающих объектах, находящаяся в невидимом человеческому глазу области 1-30 мкм спектра электромагнитного излучения обеспечивается ИК-фотоприемниками. Важность ИК-фотоприемников заключается также в том, что в некоторых диапазонах ИК-спектра, в частности 3-5 и 8-14 мкм, атмосфера имеет высокую прозрачность. Этим и объясняется широкое их применение практически во всех сферах человеческой деятельности: в промышленности, сельском хозяйстве, в военной технике, в науке, космосе, медицине, транспорте, биологии, геологии, астрономии, теплотехнике, энергетике и т.д.

Среди узкозонных полупроводниковых материалов, из которых изготавливаются наиболее фоточувствительные и быстродействующие ИК-фотоприемники передовое место, благодаря их фундаментальным физическим свойствам, занимают монокристаллы $Cd_xHg_{1-x}Te$. Значительный прогресс в улучшении параметров фоточувствительности ИК-фотоприемников на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ был связан с применением молекулярно-лучевой и парофазной технологии получения эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$. Основное развитие фотоприемников ИК-диапазона происходит в направлении создания большеформатных матричных фотоприемников фокальной плоскости (МФП) с числом элементов более 10^6 . В настоящее время научно-технические разработки ученых сконцентрированы над проблемами создания ИК-приемников нового поколения¹.

ИК-приемникам нового поколения предъявляются следующие требования:

1. Next decade in infrared detectors / A. Rogalski // Proc. SPIE 10433, ElectroOptical and Infrared Systems: Technology and Applications, -2017. 10433-p.104330L(1-25).

- высокая фоточувствительность,
- повышенные рабочие температуры 200-300К,
- большое число фотоэлементов и высокая разрешающая способность
- реализация многоспектральных устройств с внутренним управлением спектральной характеристикой
- высокое быстродействие
- снижение стоимости, объема и веса.

Хотя в этом направлении был достигнут определенный прогресс, разработка ИК-детекторов на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ «третьего поколения» является весьма сложной задачей. При разработке таких высокоэффективных фотоприемников возникает ряд проблем как фундаментального, так и конструктивно-технологического характера. Это связано, во-первых, с тем, что предъявляемые требования являются взаимно противоречивыми. Например, для увеличения фото чувствительности необходимо увеличивать время жизни носителей заряда, однако, это приводит к уменьшению быстродействия и разрешающей способности.

Во-вторых, предельные параметры фоточувствительности полупроводниковых фотоприемников в значительной степени определяются временем жизни неравновесных носителей заряда (НЗ), которая в свою очередь зависит от механизмов их рекомбинации как в объеме, так и на поверхности полупроводника. Без учета влияния поверхности, наибольшими параметрами фоточувствительности обладают структуры на основе слаболегированного p -типа $Cd_xHg_{1-x}Te$, в котором время жизни НЗ ограничивается фундаментальными механизмами излучательной и Оже-рекомбинации². Однако сложность практической реализации таких ФП заключается в трудности получения слаболегированного материала p -типа, по причине дефектности материала из-за слабой связи Hg-Te.

Вакансии ргуги, неизбежно возникающие в монокристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$ в процессе роста и технологических операциях создают

2.Рогальский, А. Инфракрасные детекторы: Пер.с англ./ под ред. А.В. Войцеховского//.-Новосибирск: Наука, 2003.-636 с.

мелкие и глубокие акцепторные центры в запрещенной зоне и существенно уменьшают время жизни и подвижность носителей заряда в объёме и на поверхности материала³. Поэтому хорошо контролируемое легирование р-типа является очень сложной задачей.

Для фоторезисторов и фотодиодов на основе узкозонных $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, толщина слоев которых обычно менее диффузионной длины неосновных НЗ, поверхностная рекомбинация порою становится доминирующим механизмом рекомбинации НЗ и является основным фактором, определяющим предельные параметры фоточувствительности. Поэтому для создания высокочувствительных $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ детекторов нового-3-го поколения крайне важно разработать надежную технологию их изготовления и пассивацию поверхности.

При сравнении предельных параметров фоточувствительности фотодиодов и фоторезисторов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ предпочтительными оказываются последние. В силу того, что фоторезисторы обладают внутренним усилением и менее критичны к дефектности материала, они имеют большую обнаружительную способность и вольтовую чувствительность как при низких, так и при высоких температурах вплоть до комнатных. Технология изготовления их значительно проще, чем фотодиодов. Однако основным недостатком фоторезисторов является очень низкое сопротивление и большая потребляемая мощность, что не позволяет использовать их в матричных фотоприемниках. Одноэлементные фоторезисторы все еще находят применение, например, в ИК-спектрометрах с Фурье-преобразованием. Помимо поверхностной рекомбинации, другим не менее важным фактором, препятствующим достижению более высокой вольтовой чувствительности фоторезисторов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, особенно для р-типа материала, является эффект вытягивания (экстракции) неосновных неравновесных носителей заряда из объема кристалла,

3 Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors / W. Lei, J. Antoszewski, L. Faraone // Appl. Phys. Rev., -2015.2(4),-p.041303 (1-34).

обусловленный биполярностью фотопроводимости. Этот эффект приводит к насыщению фототока при увеличении приложенного напряжения выше определенного его значения.

В настоящее время для изготовления МФП большого формата используются фотодиоды, имеющие высокий импеданс и очень низкую мощность рассеяния. Для увеличения формата матрицы и снижения стоимости таких МФП используются эпитаксиальные слои, выращенные методами МЛЭ и МОСГФЭ на подложках Si, GaAs, GaSb. Но качество кристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенных на альтернативных подложках хуже, чем выращенных на подложках CdZnTe из-за различия постоянной решетки. Различного рода дефекты кристаллической решетки являются серьезным препятствием для реализации высоких параметров чувствительности.

Современные ИК фотодиоды и фоторезисторы имеют существенный недостаток – низкую рабочую температуру, обычно температура жидкого азота из-за относительно большого темнового тока. Такая низкая рабочая температура серьезно ограничивает область их применения. В идеале ИК-детекторы должны работать при температурах, достигаемых с термоэлектрическими охладителями (например, 250 К) или при комнатной температуре. Хотя в этой области достигнут значительный прогресс, связанный с разработкой N^+ - p - P^+ (N^+ , P^+ -обозначены сравнительно широкозонные слои) гетероструктур фотодиодов и их модификаций, работающих в режиме экстракции ⁴, рабочая температура этих детекторов на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ все еще намного ниже 250 К. Проблема усугубляется тем, что при повышенных температурах сильно уменьшается амбиполярная диффузионная длина порой менее глубины поглощения, что приводит к падению квантовой эффективности и быстродействия.

В настоящее время можно считать, что параметры «классических» ИК фотоприемников достигли своего предела,

⁴ High-Operating Temperature HgCdTe: A Vision for the Near Future/ D. Lee,., M.Carmody, E. Piquette, [et.al] // Journal of Electronic Materials, -2016.45(9),-p. 4587–4595.

определяемого как свойствами самого материала, так и фундаментальными ограничениями.

Как следствие, в попытке заменить $Cd_xHg_{1-x}Te$ для преодоления указанных его недостатков появились конкурирующие ИК приемники на других материалах, включая сплавы солей свинца, $InSb$, ИК- приемники с квантовыми ямами, с квантовыми точками и приемники на сверхрешетках типа II. Хотя для разработки этих альтернативных технологий были приложены значительные усилия, на данном этапе они все еще не могут конкурировать с $Cd_xHg_{1-x}Te$ ИК приемниками для применений в высокочувствительных ИК системах.

Для преодоления предела чувствительности «классических» ИК приемников, ограниченного фундаментальными процессами, необходимо разработать новую концепцию детектирования и преобразования ИК-излучения, которая обеспечивала бы повышение и других параметров фоточувствительности. Кроме того, необходимо разработать технологию изготовления этих фотоприемников, которая устраняла бы влияние недостатков свойств $Cd_xHg_{1-x}Te$ на параметры их фоточувствительности и была бы достаточно простой и дешевой.

Поэтому проблема разработки такой конструкции фотоприемника на основе узкозонных монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$, технология изготовления которого была бы сравнительно проста и основывалась бы на хорошо отработанных процессах, и вместе с тем содержала бы принципиально новое техническое решение, удовлетворяющее требованиям, предъявляемым к ИК-приемникам нового поколения, является весьма актуальной.

Объект и предмет исследования:

Объектами исследования являлись фоторезисторы с однородным и градиентным распределением примеси, двухслойные p-n фоторезисторы, фоторезисторы с чередующимися p-n слоями и областями, металл-диэлектрик-полупроводник (МДП)-фоторезисторы, туннельные МДП-фотодиоды, фотодиоды на гомопереходах $n^+-n-p-p^+$, p^+-p-n типа с однородным и градиентным распределением примеси, созданных из

монокристаллических пластин $Cd_xHg_{1-x}Te$ разработанными технологическими методами. Выбор этого материала обусловлен тем, что он является базовым для фотонных ИК-фотоприемников, хорошо изучены его свойства и хорошо отработана технология изготовления высокочувствительных детекторов дальнего и ближнего ИК диапазона на их основе. В работе использованы монокристаллические пластин $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($0,19 \leq x \leq 0,5$), выращенные методом вертикально направленной кристаллизации с подпиткой из твердой фазы на предприятии ОАО "Чистые металлы" (г.Светловодск, Украина), которые поставлялись НИИ Фотозлектроники (г.Баку) до 1991 г.

Ионно-лучевое травление ионами Ag^+ проводилось на установке ионного травления "IM/Sid". Обработка в плазме аргона и воздуха проводилась на лабораторной установке, состоящей из вакуумной камеры с системой откачки, УВЧ-генератора с частотой 40,56 МГц, а также на установке Z-550. Отжиг образцов проводился в среде инертных газов, либо в воздушной среде. Основными методами исследования являлись: эффект Холла по методу Ван-дер-Пау; метод импульсного фотовозбуждения и СВЧ-метод измерения времени жизни носителей заряда, измерение ИК-спектров отражения и пропускания; измерение вольт-амперных, вольт-емкостных и спектральных характеристик фотодиодов и фоторезисторов в температурном интервале 77-300 К. Во всех случаях погрешность измерений была более чем на порядок меньше, чем наблюдаемые изменения экспериментальных данных.

Цель данной работы: всесторонним исследованием и установлением механизмов неравновесных процессов в объеме и в приповерхностных слоях, закономерностей модификации поверхностных параметров монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,19-0,5$) разработать физические основы новой концепции фотопреобразования и технологии создания высокоэффективных элементов ИК фотоприемников нового поколения на основе монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,19-0,5$) с граничной длиной волны фоточувствительности из области спектра 2,5-14 мкм, обладающими более чем на порядок высокими параметрами

фоточувствительности и быстродействия, повышенными разрешающей способностью и рабочими температурами, вплоть до 300 К, по сравнению с известными.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- исследование неравновесных процессов в объеме и в приповерхностных слоях узкозонных монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,19-0,5$) методом фотопроводимости, фотомагнитного эффекта, фотоэдс и C-V спектроскопии в различном диапазоне температур, спектра излучения и длительности импульсного излучения,

- изучение закономерностей модификации поверхностных параметров (плотность поверхностных состояний, положение уровня Ферми, поверхностный изгиб зон) в образцах $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,19-0,5$) при нанесении на поверхность непроводящих и полупрозрачных слоев металлов и диэлектриков, ионно-плазменной обработки низкоэнергетичными ионами и разработка способов управления этими параметрами, пригодных для целенаправленного изменения электрофизических и фотоэлектрических свойств этих образцов,

- разработка простых низкотемпературных методов получения высококачественных p-n переходов и легированных слоев в широком интервале легирования и исследование их параметров,

- проведение широкого ряда исследований по разработке физических основ, новых подходов и концепции фотопреобразования, конструктивных решений для создания высокоэффективных фоторезистивных и фотодиодных структур на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,19-0,5$), обладающими более чем на порядок высокими параметрами фоточувствительности и быстродействия, повышенными разрешающей способностью и рабочими температурами, вплоть до 300 К, по сравнению с известными и разработке новых технологических методов их изготовления,

- разработка теоретических моделей, необходимых для количественной оценки параметров фоточувствительности

предлагаемых новых типов фотоприемников на основе $Cd_xHg_{1-x}Te(x=0,19-0,5)$.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. О роли приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ) в фотопроводимости.

Существенный вклад в формирование фотопроводимости $Cd_xHg_{1-x}Te(x=0,2-0,3)$ в области фундаментального поглощения при относительно низких уровнях фотовозбуждения играет приповерхностная ОПЗ. Истощающий изгиб поверхностных зон на естественной свободной поверхности n - и p- $Cd_xHg_{1-x}Te$ приводит к локализации фотопроводимости в приповерхностной ОПЗ. Особенности поведения спектральных характеристик чувствительности определяются соотношениями между поверхностными и объемными значениями времени жизни и подвижности неравновесных носителей заряда [1,2,3].

2. Туннельный МДП фотодиод Al-p- $Cd_xHg_{1-x}Te(x=0,28)$ с неравновесным истощением ОПЗ, обусловленным увеличением туннельной прозрачности диэлектрического зазора при приложении обратного напряжения и перераспределения его большей частью в ОПЗ, обладает высоким быстродействием и повышенной фоточувствительностью в коротковолновой области фоточувствительности [27].

3. Новый принцип построения охлаждаемого ИК –фоторезистора [26,28,29,30,33], принципиальное различие которого по сравнению с классическими, заключается в наличии в однородном поглощающем слое приповерхностной области p-n перехода, что коренным образом приводит к изменению неравновесных процессов в полупроводнике, а именно:

- электрическое поле ОПЗ эффективно разделяет неосновные и основные носители заряда и доминирующий механизм их рекомбинации определяется потенциальным барьером в ОПЗ

- при малых уровнях фоновой засветки время релаксации фотопроводимости может на несколько порядков превышать время жизни НЗ.

- толщина слоя полупроводника, по которому осуществляется фотопроводимость, может быть значительно меньше диффузионной длины носителей заряда, а это значительно увеличивает сопротивление ФП

- в результате сепарации основных и неосновных носителей заряда (НЗ), фотопроводимость становится монополярной и эффект вытягивания носителей заряда устраняется.

Перечисленные особенности и обуславливают высокие параметры фоточувствительности разработанных новых типов ФП.

Новый принцип может служить основой для конструирования новых типов малоразмерных фотоприемников и многоэлементных матриц на основе различных полупроводниковых структур с предельно высокими фотоэлектрическими параметрами и с новыми функциональными возможностями для практических применений в ИК технике.

4. Новая концепция улучшения фоточувствительности неохлаждаемых фоторезисторов на основе $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [41,43].

В образцах $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}(x=0,27-0,28)$ внутреннее электрическое поле, созданное градиентом концентрации акцепторной примеси в области поглощения в условиях, когда дрейфовая скорость достаточно больше, чем диффузионная, приводит к увеличению времени релаксации фотопроводимости τ_f более 10 раз. Увеличение времени жизни τ_f обусловлено пространственным разделением неравновесных носителей внутренним полем, устраняющим все виды рекомбинации и определяется высотой потенциального барьера, созданного градиентом концентрации примеси.

5. Высокотехнологичный дрейфовый фотодиод на основе $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}(x=0,27-0,29)$ с градиентом концентрации примесей в p и n областях [40,44], имеет значительно высокие значения R_0A , квантовой эффективности, быстродействия и повышенную рабочую температуру, чем фотодиоды с такими же толщинами гомогенных слоев. Матричные фотоприемники на основе таких фотодиодов могут обладать также более высокой разрешающей способностью, чем известные.

6. Простой низкотемпературный метод получения совершенных р- n переходов и примесных слоев в широком интервале легирования (10^{14} - 10^{19} см⁻³) [19,29,31,35,36,37,38, 42,43, 45,46].

При легировании монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0.2-0.3$)-акцепторными примесями Cu, Ag, Au в интервале температур 100-180° С, имеющими коэффициент диффузии значительно превышающий коэффициент диффузии вакансий ртути, происходит заполнение вакансий ртути этими примесями. При последующей обработке в плазме для конверсии типа проводимости при комнатной температуре, генерированные на поверхности большой концентрации атомы ртути мигрируют по междоузлиям и заполняют оставшиеся вакансии ртути, вытесняя атомы акцепторной примеси. Таким образом достигается практически полная аннигиляция вакансий ртути, что обеспечивает высокое качество р- n переходов и примесных слоев на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0.2-0.3$).

7. Разработана простая технология изготовления быстродействующих фотодиодов с большой площадью на $Cd_{0,28}Hg_{0,72}Te$ со структурой металл- n⁺-n-p-р⁺ переход с сопротивлением растекания $R_{ser}=1-2$ ом [45,46]. Технология основана на эффекте конверсии типа проводимости на поверхности р-типа образца плазменным воздействием при нанесении полупрозрачного слоя никеля магнетронным испарением. Использование полупрозрачного слоя никеля толщиной ~5 нм, нанесенного на поверхность n⁺-слоя, позволяет уменьшить последовательное сопротивление R_{ser} до 1-2 ом, а параметр τ_{RC} до 10^{-11} с, что соизмеримо со временем пролета электронов в обедненной области и на два порядка меньше, чем в известных фотодиодах.

Научная новизна исследования.

Научная новизна полученных результатов в диссертационной работе состоит в следующем:

1. Комплексным исследованием фотопроводимости, фотомагнитного эффекта и фотоэдс установлено, что наличие на поверхности однородных монокристаллических слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,2-0.3$) истощенного слоя приводит к локализации

фотопроводимости в приповерхностной ОПЗ в области фундаментального поглощения [1,2,3].

2. Обнаружено, что на границе раздела Al-Cd_xHg_{1-x}Te (x=0,2-0.3) формируется тонкий туннельно-прозрачный диэлектрический слой. Достаточно низкая плотность поверхностных состояний ($N_{ss} < 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$) позволяет создавать на их основе высокоэффективные туннельные МДП-фотодиоды, работающие в режиме неравновесного истощения, которые являются перспективными для создания матричных ИК-фотоприемников нового поколения [4,7,8,10,27].

3. Разработаны низкотемпературные технологические методы создания эффективных ИК-фотодиодов на основе Cd_xHg_{1-x}Te. Впервые, для изготовления качественных p-n переходов на область 3-5 и 8-12 мкм, использовано облучение поверхности p-Cd_xHg_{1-x}Te ионами индия энергией 5-6 кэВ из жидкометаллического источника ионов. Установлены механизмы формирования n-типа проводимости в зависимости от дозы, концентрации примесных носителей и состава x исходной подложки, а также от времени облучения [15,18,19,20,25,31,37,46]

4. Предложена конструкция и принцип работы нового типа охлаждаемого фоторезистора на основе Cd_xHg_{1-x}Te (0.24 ≤ x ≤ 0.29), характеризующегося высокими параметрами фоточувствительности, разрешающей способности и значительно меньшей потребляемой мощностью по сравнению с классическими фоторезисторами. Показана принципиальная возможность получения параметров фоточувствительности, значительно превышающих экспериментально достигнутые на сегодня [26,28,29,30,33].

5. Впервые в узкозонном полупроводнике, при наличии естественного фонового излучения с плотностью потока $10^{16}-10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, наблюдалось явление долговременной релаксации (ДР) фотопроводимости с τ до 70 мс. Наблюдаемая ДР фотопроводимости в созданных p⁺-p-p⁻ структурах Cd_xHg_{1-x}Te (0,24 ≤ x ≤ 0,29) обусловлена рекомбинационным барьером,

созданным градиентом концентрации примеси вдоль направления излучения [38,39].

6. На основе $\text{Cd}_{0,28}\text{Hg}_{0,72}\text{Te}$ созданы двухдиапазонные ИК-фотоприемники с управляемой напряжением смещения спектральной характеристикой fotocувствительности [12,22,23,32]. Принцип работы их основан на изменении соотношения между поверхностным и объемным компонентами фототока при изменении напряжения смещения. Показана возможность одновременной регистрации и управления спектральной чувствительностью на краю фундаментального поглощения и в коротковолновой области спектра.

7. Впервые на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($\lambda_r=6$ мкм) создан дрейфовый фотодиод с рекордно высокими значениями $R_0A=7 \cdot 10^8 \text{ Ом/см}^2$ [40,44]. По сравнению с фотодиодами с такой же толщиной гомогенных слоев, в дрейфовом фотодиоде, благодаря встроенному электрическому полю токи утечки уменьшаются на 3-4 порядка, увеличиваются быстродействие более 10 раз, рабочая температура до 200-300 К, повышается квантовая эффективность и разрешающая способность. Простота изготовления позволяет рассматривать его перспективным элементом матричных ИК-фотоприемников нового поколения.

8. Предложен новый принцип создания высокоэффективных неохлаждаемых ИК-фотоприемников на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($0.2 \leq x \leq 0.3$), заключающийся в создании в области поглощения электрического поля путем создания неоднородного по толщине слоя распределения примесей, которое подавляет Оже-рекомбинацию и тем самым увеличивает время жизни НЗ и fotocувствительность [38,39,40,41,43].

Научное значение диссертации заключается в том, что в ней решены крупные проблемы современной ИК-фотоэлектроники.

1. Разработана единая концепция создания высокоэффективных ИК-фотоприемников нового поколения на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, разработана дешёвая, но эффективная технология их изготовления, реализованы принципиально новые типы элементов ИК-фотоприемников на область чувствительности 3-5 и 8-12 мкм,

обладающие более высокими параметрами фоточувствительности, более высокой разрешающей способностью и быстродействием, повышенной рабочей температурой и значительно меньшей потребляемой мощностью, чем известные на сегодняшний день.

2. Научно обоснована и экспериментально подтверждена идея увеличения времени жизни неравновесных носителей за счет подавления Оже-, Шокли-Рида- и поверхностной рекомбинаций внутренним электрическим полем потенциальных барьеров, созданных в слое поглощения полупроводника. Указанный механизм на 2 порядка может увеличивать время жизни носителей заряда в $Cd_xHg_{1-x}Te(0,24 \leq x \leq 0,29)$ при комнатной температуре, по сравнению с однородными фоторезисторами, в которых преимущественный механизм рекомбинации- межзонная Оже – рекомбинация.

3. Показана, необходимость учёта влияния приповерхностной ОПЗ, рекомбинации в ней и поверхностной подвижности на спектральную зависимость фотопроводимости в области фундаментального поглощения $Cd_xHg_{1-x}Te(x=0.2-0.3)$.

Практическая ценность.

Созданные высокоэффективные быстродействующие фотодиоды и фоторезисторы на основе $Cd_xHg_{1-x}Te(0.2 \leq x \leq 0.3)$ могут существенно расширить номенклатурную линейку существующей элементной базы приборов ИК оптоэлектроники. Развитие целого ряда применений, таких как высокоскоростная связь в открытом атмосферном канале, спектроскопия и анализ газов, лазерная локация в безопасном для зрения человека диапазоне может быть возможным благодаря новым быстродействующим фотодиодам. Высокие параметры фоточувствительности, на 2-3 порядка превышающие экспериментально достигнутые в настоящее время, могут сделать его незаменимым в таких областях как космическая лазерная связь, орбитальные ИК-телескопы, ИК-спектроскопия высокого разрешения и т.д. Реализация нового принципа фотопреобразования фотосигнала может послужить толчком для прогресса в области создания ИК-детекторов.

Апробация работы

Результаты, полученные в ходе исследования, докладывались и обсуждались на республиканских и международных конференциях: Международных научно-технических конференциях по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва-2006, 2010,2012-с устным докладом, 2014, 2016, 2018), Российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники “Фотоника-2017” (Новосибирск, 2017), с личным докладом 17th International conference on ternary and multinary compounds (Баку, 2010), 19th International conference on ternary and multinary compounds (Vena, 2012), с личным докладом на Международной научной конференции, посвященной 100-летию академика Г.Б.Абдуллаева-«Modern trends in condensed matter physics, МТСМР – 2018» (Баку, 2018), с личным докладом на республиканской научно-технической конференции: “Radiotexnikanın müasir problemləri”(Bakı, 20-22 Okt., 2021).

Важные результаты были получены в ходе исследований в рамках проекта «Высокочувствительный ИК-фотоприемник на новом принципе фотопреобразования», поддержанного «Ельм фонду», № EIF-2012-2(6)-39/05/1-M-12, 04/2013-05/2014 г.

5 единолично полученных результатов работы, были приняты в отчет Азербайджанской Национальной Академии Наук как важные научные результаты Института Физики в 2014,2018,2019, 2020,2021 годах.

Организация, в которой выполнена работа: Институт Физики Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики. Исследования, включенные в настоящую работу, проводились автором в период 1997-2021 гг в Институте Физики Национальной Академии Наук Азербайджана. Проведение теоретического анализа, разработка теоретических моделей, выводы формул для инженерных расчетов, разработка новых технологических методов, включая метод фотолитографии, постановка эксперимента, анализ экспериментальных данных, написание статьи были проделаны автором лично, подготовка исследуемых образцов к измерениям и проведение измерений проводились при преимущественном участии автора.

По теме диссертации были опубликованы 46 работ, из них 15 статей в рецензируемых печатных изданиях [3,7,8,17, 20,21,23,26, 27,30,37,38,42,43,46], которые индексируются в базах данных Web of Science и Scopus, 7 работ без соавторов [12,23,26, 41,43, 44,45], 11 материалов местных и зарубежных конференций, получены 2 патента, один без соавторов, другой – с международной индексацией.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка цитированной литературы, содержит 306 страниц, включая 108 рисунка на 54 страницах и 3 таблицы. Список цитированной литературы содержит 190 наименований. Число знаков без пробелов, рисунков, таблиц и списка литературы по главам: I-60736, II-61637, III-62448, IV-49633, V-43312, V-16437, общее число-368146

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, ключевые положения, выносимые на защиту, научная новизна, научная и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе дан обзор литературы по электронным, электрофизическим, оптическим, физическим свойствам поверхности и объема $Cd_xHg_{1-x}Te$, технологии изготовления и параметрам фотоприемников на его основе.

В параграфе 1.1 дается характеристика фотонных ИК-детекторов, их классификация по механизмам фотопреобразования и основные параметры фоточувствительности- вольтовая или токовая чувствительность, удельная обнаружительная способность, спектральная характеристика фоточувствительности, частотный диапазон фоточувствительности, разрешающая способность, рабочая температура.

В разделе 1.1.3 рассматривается общая теория различных типов фотонных фотоприемников, представленная в универсальной форме, удобной для анализа характеристик фотоприемников на основе различных материалов, рассматривается принцип работы этих приборов и выводятся формулы токовой R_i , вольтовой

чувствительности R_v и обнаружительной способности их D^* , в выражениях которых фигурируют параметры полупроводника. Показаны факторы, ограничивающие параметры фоточувствительности при низких и высоких температурах, в условиях ограничения фоновым излучением и термической генерацией носителей заряда для детекторов на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$.

Для фоторезисторов основное требование для высокой вольтовой чувствительности являются: высокая квантовая эффективность, большие времена жизни носителей заряда, наименьшие значения равновесных концентраций носителей заряда, минимальные размеры фоточувствительного объема и наибольшее рабочее напряжение. Рабочее напряжение ограничивается эффектом вытягивания (экстракцией) неосновных носителей, обусловленное биполярностью фотопроводимости.

В настоящее время фотодиоды на основе узкозонных материалов являются единственными фотоэлементами для изготовления гибридных большеформатных ИК-МФП приборов. Фоточувствительность и обнаружительная способность фотодиода определяется его дифференциальным сопротивлением при нулевом или обратных напряжениях. Фундаментальный механизмом токопереноса в фотодиодах с p-n переходом является диффузионный ток. Другими механизмами генерации тока в фотодиодах на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ являются: генерационно-рекомбинационный ток в обедненной области, межзонное туннелирование, туннелирование через ловушки в запрещенной зоне, омический ток утечки через область обеднения, токи поверхностной утечки.

В разделе 1.2.1 приведены полупроводниковые свойства $Cd_xHg_{1-x}Te$ и технология приборов на их основе. Такие преимущества физических свойства твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ как высокий коэффициент поглощения, высокая подвижность электронов, плавное изменение ширины запрещенной зоны с изменением состава x , без изменения при этом постоянной решетки, большие времена жизни носителей заряда, хорошо развитая технология гетероэпитаксиальных слоев и приборов на их основе

делают его не заменимым материалом для изготовления тепловизоров нового поколения .

Существенным недостатком этого материала является дефектность его из-за слабой связи Hg-Te. Вакансии ртути создают в запрещенной зоне центры рекомбинации, что приводит к уменьшению времени жизни и подвижности носителей заряда в $Cd_xHg_{1-x}Te$ ⁵. В разделах 1.2.3-1.2.5 приводятся теоретические и экспериментальные данные о поверхностных и объемных механизмах рекомбинации, присущих узкозонным составам $Cd_xHg_{1-x}Te$.

В разделе 1.3.1 описываются технология получения эпитаксиальных слоев и гетероструктур методами молекулярно-лучевой и парофазной эпитаксии на подложках CdTe и альтернативных подложках для изготовления р-п. Эти методы позволяют получать очень сложные структуры по профилю состава и концентрации примесей для ИК-фотоприемников нового поколения. Раздел 1.3.2 посвящен проблеме примесного легирования, особенно р-типа, что обусловлено высокой температурой активации примесей V группы (As, Sb).

В разделе 1.3.3 приведены архитектура и технология изготовления основных типов р-п переходов, применяемых в матричных ИК-фотоприемниках нового поколения. Среди них меза-фотодиоды имеют существенные преимущества перед планарными фотодиодами, так, например, они менее подвержены влиянию перекрестных помех, обусловленных оптическими и фотоэлектрическими взаимосвязями, которые приводят к ухудшению разрешающей способности и размытию ИК изображения.

В пункте 1.4.1 рассматриваются конструктивные особенности и принцип действия тепловизоров 1-го, 2-го и 3-го поколения. Фотоприемники нового, 3-го поколения – это так называемые «смотрящие» матричные фотоприемники с числом элементов более 10^6 . В качестве чувствительных элементов в них используются

⁵ Акцепторные состояния в гетероэпитаксиальных слоях CdHgTe, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией/ К.Д. Мынбаев А.В. Шияев , Н.Л. Баженов[и др.] //ФТП, -2015.49 (3)-с.379-384.

фотодиоды с р-п переходами, освещаемые со стороны подложки. Одна из неразрешенных проблем фотоприемников 3-го поколения-это разрешающая способность, которая зависит от размеров чувствительного элемента, зазоров между ними и перекрестных помех. В применяемых фотодиодах высокая чувствительность достигается увеличением времени жизни носителей заряда, но это приводит к увеличению диффузионной длины носителей заряда и фотоэлектрических помех в матричных фотоприемниках, в итоге к ухудшению разрешающей способности фотоприемника в целом. Для решения этой проблемы были предложены несколько подходов, такие, как использование микролинз⁶, решеток захвата, но пока они не эффективны из –за сложности изготовления и др.

Туннельные МДП-структуры (ТМДП), не требуют больших напряжений смещения и использования слаболегированного материала. ТМДП- фотодиоды по своим характеристикам близки к р-п фотодиодам, но значительно проще в изготовлении, более быстродействующие и обладают повышенной чувствительностью в КВ области спектра. Трудность изготовления заключается в получении качественной границы туннельно-прозрачного диэлектрика с полупроводником. Большая концентрация плотности поверхностных состояний связана с самим естественным окислом полупроводника.

Для достижения высоких параметров фоточувствительности фотоприемников на основе узкозонных полупроводников, требуется их охлаждение до температур от 77 до 200 К. Необходимость охлаждения значительно увеличивает массу, габариты и стоимость всей аппаратуры. Поэтому одной из актуальных задач является разработка слабоохлаждаемых и неохлаждаемых фотоприемников ИК-диапазона с высокими параметрами фоточувствительности. Основным фактором, ограничивающим параметры неохлаждаемых фотоприемников, является Оже-процесс термогенерации носителей заряда. Для

⁶ Li, Y. Crosstalk suppressing design of GaAs microlenses integrated on HgCdTe infrared focal plane array/ Y. Li, Z. Ye, C. Lin [et.al] // Opt. Quantum Electron., - 2013, 45, -p. 665-672 .

подавления Оже-процесса в слое поглощения были так же предложены такие концепции как неравновесный режим экстракции в фотодиодах⁷ и магнитоконцентрационный эффект. Неравновесные приборы создаются на основе узкозонного эпитаксильного слоя с низкой концентрацией ($N < 10^{14} \text{см}^{-3}$) примесных носителей заряда, расположенного между двумя более широкозонными слоями или между сильнолегированным слоями. Необходимыми условиями являются: низкая концентрация мелких примесных центров, до уровня которых может понизиться концентрация основных носителей и достаточно низкая концентрация глубоких центров, ограничивающих время жизни носителей заряда, что пока являются трудновыполнимыми. К тому же, большие токи смещения в этих структурах обуславливают высокий уровень шумов вплоть до 1 МГц, а сложность изготовления приводит к повышению стоимости прибора.

Одно из требований к ИК-приемникам «третьего поколения» - это возможность многоканального обнаружения. Они обладают улучшенными параметрами по распознаванию и идентификации цели. Основной недостаток «одновременных» двухцветных фотодиодов - большой размер фотодиодов из-за необходимости двух контактов к нему, что ограничивает плотность фотодиодов и, следовательно, размер формата матрицы и разрешающую способность. Рассмотренные двухцветные детекторы на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ кроме указанных недостатков имеют сложную архитектуру и технологию изготовления, что уменьшает их надежность и повышает их стоимость.

Во второй главе рассматриваются электронные процессы в приповерхностных слоях узкозонных монокристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с областями пространственного заряда. Состояние поверхности и приповерхностная ОПЗ играют определяющую роль в своеобразии протекания неравновесных процессов в фоточувствительных эпитаксиальных слоях и особенно в поверхностно-активных структурах. Это обусловлено следующим фактами: значительно

7. Non-equilibrium devices for infrared detection / T. Ashley, C.T.Elliot. // Electron. Lett.,-1985,85-p.451-452.

меньшей глубиной залегания приповерхностного р-п перехода по сравнению с классическими объемными р-п переходами и возможностью использования истощенных слоев в МДП, металл-полупроводник (МП) -структурах; существенным различием химических связей, природы электронных состояний, наличие приповерхностных переходных слоев с измененными (по сравнению с объемом) параметрами решетки. Последние два фактора приобретают особую значимость для узкозонных материалов $Cd_xHg_{1-x}Te$, значительно подверженных дефектообразованию из-за слабых химических связей Hg-Te. Вакансии металлов в кристаллической решетке, образующие в запрещенной зоне примесные уровни, может достигать концентрация 10^{17} см^{-3} . Вакансии ртути, создающие глубокие центры в запрещенной зоне уменьшают τ и являясь центрами рассеяния, приводят к понижению подвижности носителей заряда. В силу очень малой эффективной массы носителей заряда, это приводит к сильным пространственным флуктуациям разрешенных зон. Обеднение приповерхностной области атомами металла в результате технологических операций может усугублять этот фактор для поверхностного электростатического потенциала.

Поверхностно-управляемые фотоприемники, по сравнению с обычными, обладают повышенной фоточувствительностью, меньшим уровнем шумов и меньшей поверхностной рекомбинацией, влияющими на характеристики приборов. Для полупроводникового материала $Cd_xHg_{1-x}Te$, обладающего исключительно высокой активностью взаимодействия с внешней средой, изучение поверхностных свойств и границ раздела, решающую роль в которых играет нестабильность связи Hg-Te, имеет особо важное значение.

До начала настоящей работы, как в отечественной, так и в зарубежной литературе отсутствовали данные о систематических исследованиях и закономерностях электронных процессов в приповерхностных слоях узкозонных монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$. Фактор наличия приповерхностной ОПЗ, рекомбинация в ОПЗ,

гетерогенность объемных и поверхностных параметров не принимались во внимание.

Для изучения параметров поверхности монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$, необходимо прежде установить механизмы рекомбинации, происходящие в объеме полупроводника и прежде всего механизм Шокли –Рида-Холла. Поэтому этому вопросу было уделено первоочередное значение. Методами фотопроводимости и ФЭМ экспериментально проведены исследования температурной зависимости времени жизни НЗ в р и n типах образцов. На основе статистики Шокли-Рида-Холла предложен упрощенный метод определения параметров рекомбинационных центров (энергетический уровень, концентрацию, сечение захвата электронов и дырок) в р- и n-типах проводимости $Cd_xHg_{1-x}Te$ в отдельности. Экспериментально установлено, что для р- и n-типов проводимости $Cd_xHg_{1-x}Te$ рекомбинационные центры с $E_a=65-70$ мэВ -донорного типа с отношением сечений захвата $\gamma_n/\gamma_p=100$ и обусловлены двукратно ионизированными вакансиями слабосвязанной ртути. Значительным отличием сечений захвата электронов и дырок и объясняется наблюдаемая сверхлинейная люкс-амперная характеристика фоточувствительности и неравенство времени жизни электронов и дырок при низких ($T<120K$) температурах.

Состояние поверхности имеет решающее значение для достижения высоких параметров фоточувствительности как фоторезисторов так и фотодиодов, толщины которых для этой цели выбираются предельно тонкими~10-15 мкм. Поэтому проблема надежной поверхностной пассивации и минимизации скорости поверхностной рекомбинации имеет также архиважное значение.

Комплексным исследованием фотопроводимости, фотомагнитного эффекта и фото-эдс установлено, что наличие на поверхности истощенного слоя может приводить к локализации фотопроводимости в приповерхностной ОПЗ. Анализом экспериментально полученных данных на основе теории поверхности установлено, что эффективное поверхностное время жизни и эффективная скорость поверхностной рекомбинации S^*

сильно зависят от изгиба поверхностных зон ϕ_s^L , температуры и ширины запрещенной зоны E_g . Показано, что в области фундаментального поглощения спектральная зависимость фотопроводимости определяется вкладом фотопроводимости приповерхностной ОПЗ и изменением поверхностной подвижности носителей заряда относительно его объемного значения.

Для изучения влияния изгиба поверхностных зон был использован метод нанесения непроводящих или ультратонких слоев металлов с различными значениями работы выхода на поверхность p и n типа образцов. Этот метод можно рассматривать как аналог метода эффекта поля, в котором изгиб поверхностных зон изменяется потенциалом на полевом электроде МДП-структуры. Установлено, что сублимацией тонких непроводящих слоев металлов на поверхности $Cd_xHg_{1-x}Te$ удастся управлять спектральной характеристикой и величиной фоточувствительности фоторезисторов на их основе. Это обусловлено не только изменением поверхностных параметров, но и взаимодиффузией компонентов и изменением параметров в приконтактной области данного материала. Высокими диффундирующими свойствами обладают такие металлы как Cu, Ag и Au.

Обнаружено, что на границе раздела Al- $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($0,2 \leq x \leq 0,3$) формируется туннельно-тонкий диэлектрический слой с высокими изолирующими свойствами, выдерживающий напряженности поля более 10^6 В/см и низкой плотностью поверхностных состояний ($N_{ss} < 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$). Установлено, что алюминий как химически активный металл отнимает кислород из естественного окисла на поверхности $Cd_xHg_{1-x}Te$ с образованием более устойчивого Al_2O_3 . При этом естественный окисел, который является причиной большой плотности быстрых поверхностных состояний, вероятно исчезал. Это позволило определить величину скорости поверхностной рекомбинации, параметры поверхностных состояний и механизм прохождения носителей заряда в ОПЗ в структурах Al- $Cd_xHg_{1-x}Te$. На основе структур Al- $Cd_xHg_{1-x}Te$ созданы высокочувствительные МДП фоторезисторы, управляемые полевым электродом. Диэлектрический слой формировывался

вакуумно-термическим напылением на свежесотравленную поверхность образца слоя алюминия толщиной 20-30 нм с последующим анодным окислением его в лимонной кислоте при напряжении 8-10 В. В качестве полевого электрода были использованы прозрачные слои ИТО. Были исследованы спектральные и полевые зависимости фототока, а также кинетика фоторелаксации этих структур при $T=77$ К. Поверхностное время жизни τ_s и фоточувствительность при фиксированном напряжении смещения, особенно в коротковолновой области спектра, значительно увеличиваются при инверсных напряжениях на полевым электроде структуры. При обогащающих напряжениях на электроде, наоборот, фоточувствительность и τ_s уменьшались до нулевого значения. При нулевом напряжении смещения поверхность находится в обедненном состоянии как для р-типа так и для n-типа, что указывает на отсутствие фиксированного заряда в диэлектрике и то, что Уровень Ферми на поверхности контролируется зарядом на поверхностных состояниях (ПС). На частоте тестового сигнала $f=100$ кГц вольт-емкостная зависимость имеет высокочастотный характер, а плотность ПС в области середины запрещенной зоны $N_{ss} \approx 10^{11}$ см⁻². Исследование полевой зависимости и кинетики релаксации фототока позволяет получить информацию о скорости поверхностной рекомбинации S^* и рекомбинации в ОПЗ. В режиме короткого замыкания $R_H \ll R_\omega$, фототок нарастает с постоянной времени $\tau_2 = R_H \cdot C_\omega$ и достигнув определенного значения, спадает с постоянной времени τ_s , связанной с S^* выражением⁸:

$$\tau_s = L_e(-\phi_s^L) [(S_{pe} + S^*)(-\phi_s^L)^{1/2}]^{-1}, \quad (1)$$

здесь L_e –длина экранирования Дебая, S_{pe} –скорость эмиссии диэлектрического слоя, R_H –сопротивление нагрузки, R_ω , C_ω –сопротивление и емкость ОПЗ.

Из этого выражения получено, что $S^*=100$ см/с. Это значение существенно меньше, чем для структур Al-Cd_xHg_{1-x}Te.

8. Особенности фотопроводимости Cd_xHg_{1-x}Te (x=0.2-0.3) с тонкопленочным алюминиевым покрытием. Э.Ю.Салаев, Э.К.Гусейнов, Н.Д.Исмаилов. ФТП, -1997.31,(6), -с.740-744.

Это объясняется тем, что в данной МДП-структуре периферийные области полевого электрода были пассивированы слоем из монооксида кремния SiO_2 .

На основе структур $\text{Al}-\text{Cd}_{0.28}\text{Hg}_{0.72}\text{Te}$ были изготовлены и исследованы туннельные МДП-фотодиоды, работающие в режиме неравновесного истощения. При некоторых обратных напряжениях (0,1-0,15 В) в структурах $\text{Al}-\text{p}-\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ туннельная прозрачность диэлектрического зазора увеличивается и наблюдается резкое увеличение фототока с переходом на ток насыщения, зависящим от уровня освещения, что обусловлено неравновесным истощением обедненного слоя. Такие быстродействующие и высокочувствительные в коротковолновой области туннельные МДП-фотодиоды по сравнению с p-n переходами можно рассматривать как перспективные для применений в МФП в качестве чувствительного элемента.

В третьей главе приводятся результаты исследования процессов низкотемпературной диффузии элементов 1 группы Au , Ag , Cu и модификации параметров $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($0,2 \leq x \leq 0,3$) методами ионно-плазменной обработки и имплантации ионами индия энергией 3-5 кэВ из жидкометаллического источника, а также изучены фотоэлектрические параметры фотодиодов, изготовленных этими методами. Исследование направлено на разработку простых и дешевых, но достаточно эффективных и хорошо контролируемых методов изготовления ИК-приемников

Поскольку одним из основных препятствий достижения высокой фоточувствительности фотоприемников на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ является высокая концентрация центров рекомбинации Шокли-Рида, понижающие время жизни и подвижность носителей заряда, то необходимо, чтобы применяемые технологические процессы сопровождалась бы уменьшением концентрации этих центров, а именно вакансий атомов ртути.

В настоящее время, в связи с необходимостью изготовления лавинных, неравновесных, P^+/N^+ фотодиодов на основе

гетероэпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, основной акцент при разработке акцепторного легирования был сделан на мышьяке, обладающего очень низким коэффициентом диффузии. Это позволяет получать резкие p^+-n переходы со стабильными параметрами при проведении различных термических процессов его изготовления. Однако, в связи с трудностями при активации As в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, связанными с высокой температурой отжига (400°C) и недостаточно низкие значения концентрации вакансий ртути, ограничивают его применение для дальнейшего повышения чувствительности ИК-фотоприемников. В связи с этим продолжают исследования, посвященные легированию этого материала другими акцепторными примесями.

Для этих целей, наиболее приемлемыми являются элементы 1-й группы -Ag, Au, Cu. При легировании материала $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в интервале температур $100-190^\circ\text{C}$, акцепторными примесями Cu, Ag, Au, которые имеют коэффициент диффузии, значительно превышающий коэффициент диффузии вакансий ртути, происходит заполнение вакансий ртути этими примесями.

Диффузия этих элементов в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($0,2 \leq x \leq 0,3$) происходит по междоузельному и диссоциативному механизмам. Миграция атомов элементов 1- группы в $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в основном определяется движением по междоузельному механизму, что и определяет высокий коэффициент диффузии этих примесей. Находясь в междоузлиях эти атомы проявляют донорные свойства. Занимая места в металлической подрешетке, они действуют как однократно ионизованные акцепторные примеси или связываясь с вакансиями, образуют малоподвижные акцепторные комплексы. С миграцией примесных атомов по вакансиям связана медленная компонента диффузии с значительно меньшими коэффициентами диффузии. Диффузионный профиль распределения примесей, содержащий две составляющие, хорошо описывается законом Фика с коэффициентами диффузии, отличающимися на 3-4 порядка. При этом концентрация акцепторов медленной компоненты более чем на порядок больше концентрации быстрой компоненты.

Это приводит к некоторому увеличению времени жизни и подвижности НЗ по сравнению с исходным материалом. Действительно, экспериментально снятая температурная зависимость τ , показывает, что τ слабо изменяется с увеличением температуры от 80 К до 200 К, что характерно для механизма Оже-рекомбинации и указывает на незначительную концентрацию центров Шокли-Рида-Холла. Полученные значения τ совпадают с теоретически расчетными по Оже-механизму.

Это подтверждается и более высокими значениями R_0A p^+n фотодиодов, полученных диффузией Cu, по сравнению со значениями p^+n фотодиодов, полученных диффузией As при более высоких температурах. Для технологии с мышьяком, диффузия которого проводится при $t \geq 400^\circ\text{C}$, обязательным процессом является отжиг в насыщенных парах ртути при $T=230-250^\circ\text{C}$. Несмотря на избыток ртути, в процессе отжига наряду с заполнением вакансий, происходит также их генерация и концентрация их при равновесных условиях увеличивается с увеличением температуры отжига. Процесс диффузии элементов Cu, Au, Ag происходит при более низких температурах ($130-150^\circ\text{C}$), при этом заполнение вакансий ртути атомами этих элементов происходит и в области $p-n$ –перехода, где их концентрация понижается и становится меньше, чем в исходной подложке n -типа. Наличие вакансий в исходных компенсированных n -типа образцах проявлялось на температурной зависимости τ . Отсюда можно прийти к заключению что, более высокие значения R_0A при низких температурах p^+n фотодиодов, полученных легированием элементов Cu, Au, Ag по сравнению с легированными мышьяком, обусловлено более меньшей концентрацией вакансий ртути, благодаря более низким температурам процесса диффузии.

Другим низкотемпературным процессом изготовления высококачественных фотоприемников на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ является ионно-плазменная обработка поверхности $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ низкэнергетичными ионами (НИО). Использование НИО

позволяет улучшить параметры уже существующих приборов благодаря таким преимуществам: а) снижение числа вносимых дефектов б) использование принципиально новых возможностей, которые несет с собой новый метод, в) значительная простота и дешевизна технологического процесса.

Поскольку конечная цель работы- увеличение характеристик чувствительности фотодиодов (ФД) и фоторезисторов (ФР), то для изучения свойств модифицированных НИО слоёв $Cd_xHg_{1-x}Te$ и выработки оптимальных условий ионно-плазменных воздействий были использованы фотоэлектрические характеристики ФД-ов и ФР-ов, модифицированных НИО. Методом фотопроводимости были изучены закономерности модификации поверхностных параметров (плотность поверхностных состояний, положение уровня Ферми, поверхностный изгиб зон, концентрация мелких и глубоких примесных центров и т.п.) в образцах $Cd_xHg_{1-x}Te$ при ионно-плазменной обработке низкоэнергетичными ионами энергиями 10-300 эВ и дозами 10^{12} - 10^{17} см⁻². Основные закономерности модификации приповерхностных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ при воздействии низкоэнергетичными ионами аргона полностью согласуются с литературными данными. Зависимости глубины области инверсии от параметров исходного материала (состав, концентрация вакансий или примесей) и параметров процесса в целом также соответствуют литературным данным, что существенно облегчает использование технологии. Все это открывает широкие возможности для использования метода НИО в производстве $Cd_xHg_{1-x}Te$ фотоприемников и значительно упростить технологические процессы, не требующих использования дорогостоящего оборудования.

Использование для изготовления фотодиодов на основе р- $Cd_xHg_{1-x}Te$ обработки поверхности ионами In^+ из «жидко металлического источника» с энергией ~5 кэВ позволяет значительно облегчить технологию получения качественных и термостабильных ИК-фотодиодов.

Таким же образом на основе $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0,28$) легированного медью методом конверсии типа проводимости поверхности воздействием плазмы, изготовлены высококачественные $n^+n\text{-}p\text{-}p^+$ -типа меза-фотодиоды $\varnothing 300$ μm . Использование низкотемпературных процессов ($t < 150^\circ\text{C}$) для изготовления фотодиодов обуславливает значительное снижение концентрации глубоких центров-вакансий ртути, что позволяет пренебречь влиянием генерационно-рекомбинационного механизма в ОПЗ на обратные токи. Низкая концентрация электронов в n -области ($N_d \sim 10^{14}$ cm^{-3}) обеспечивает низкие значения токов барьерной емкости p - n перехода.

Использование полупрозрачного слоя никеля толщиной 5 нм, нанесенного магнетронным методом на поверхность n^+ -слоя, позволяет уменьшить последовательное сопротивление R_{ser} до 1-2 ом, а время фотоответа до 10^{-11} с, что соизмеримо со временем пролета в обедненной области.

В параграфе 3.5 показана возможность реализации высокоэффективных дрейфовых фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($0,24 \leq x \leq 0,29$) с градиентом концентрации примесей в p - и n -слоях, характеризующиеся гораздо меньшими темновыми токами, большим быстродействием, повышенной квантовой эффективностью и рабочей температурой, чем резкие n^+p переходы с однородными квазинейтральными слоями⁹. Рассмотрим особенности этой структуры, содержащей дрейфовые поля в p - p^G и n^+n областях фотодиода.

Внутреннее поле в n^+n области, из-за большого градиента концентрации доноров, достигает $E=700\text{-}800$ см/с ($T=80$ К). Несмотря на сравнительно небольшую подвижность дырок ($400\text{-}700$ см²/В·с) в этой области, дрейфовая скорость их $v_{\text{др}}=(2\text{-}4) \cdot 10^6$ см/с значительно превосходит диффузионную, а время пролета носителей заряда через эту область $t_{\text{пр}} < 10^{-10}$ с. В p -области, хотя дрейфовое поле на два порядка меньше, тем не менее, из-за

9. Дрейфовый фотодиод на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Исмаилов, Н.Д. - Azərbaycan MEA Xəbərçəri Fizika-Texnika və Riyaziyyat elmləri Seriyası, - 2020, т.40(5)- с.87-92

высокой подвижности электронов, дрейфовая скорость их также на два порядка больше чем диффузионная (при $T=80$ K). Пространственно разделенные носители заряда не могут рекомбинировать, так, как для них имеется потенциальный барьер $\phi_b \geq E_g$. В рассматриваемом дрейфовом фотодиоде, в отличие от классических, квазинейтральных областей нет, носители заряда попадают непосредственно в контакты. Поэтому на границе обедненного слоя концентрацию неосновных носителей заряда можно приравнять к нулю, как в p-области, так и в n-области. Такое предположение было принято в качестве

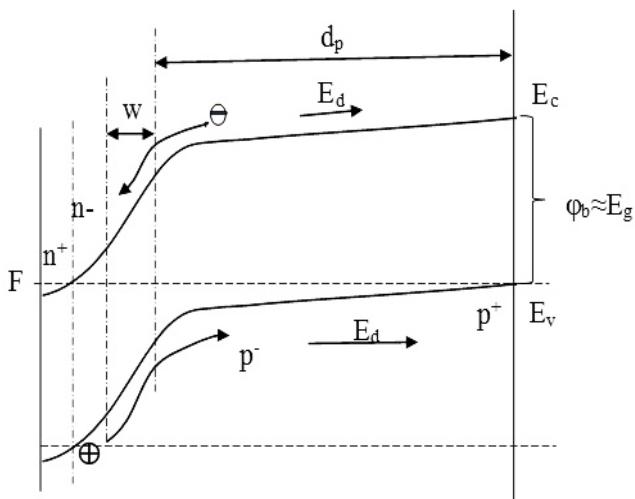


Рис.1 Энергетическая диаграмма дрейфового $n^+-n-p^G-p^+$ фотодиода на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,28$).

граничного условия при решении уравнения непрерывности в работе¹⁰, в которой теоретически рассмотрена работа дрейфового фотодиода с градиентом распределения примеси в тонкой базе.

10. Photoeffect in diffused p-n junctions with integral field gradients/ A.G Jordan., A.G. Milns// IRE Trans.on Electron Devices, ED-7,4, 1960, p.242-251.

Для случая экспоненциального распределения акцепторов в базе получено выражение для темнового тока, которое после упрощения принимает вид:

$$J_{\text{темн}} = - \frac{qn_i^2 S^*}{N_{\text{ас}}}, \quad (2)$$

здесь $N_{\text{ас}}$ -концентрация акцепторов на поверхности p^+ .

Как видно из этого выражения темновой ток не зависит от приложенного смещения, от толщины активного слоя и времени жизни носителей заряда. Можно сказать, что в этом случае темновой ток насыщения – это поток неосновных носителей, генерированных в p^+ -области, который не зависит от приложенного напряжения, т.е. он почти равен току насыщения уже при $V=0$. Темп генерации этих носителей зависит не только от концентрации $N_{\text{ас}}$, но и от S^* . Теоретически расчетное значение темнового тока p^+ - n фотодиодов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x=0,28$ при $N_{\text{ас}}=10^{15} \text{ см}^{-3}$ составляет $5 \cdot 10^{-10} \text{ А/см}^2$ при $T=80 \text{ К}$. Для дрейфового фотодиода, при $S^*=100 \text{ см/с}$, $J_s=4 \cdot 10^{-16} \text{ А/см}^2$. В таком случае обнаружительная способность дрейфового фотодиода более чем на 3 порядка может быть больше теоретически предельных значений, рассчитанных для классических фотодиодов. Экспериментально полученные значения J_s были на порядок меньше, чем расчетные для p^+ - n фотодиодов, что объясняется не качественной пассивацией и слабым градиентом концентраций акцепторов.

Говоря о быстродействии, отметим, что оно определяется временем пролета неосновных носителей через ОПЗ, диффузионной скоростью в квазинейтральной области и параметром $R_d C_b$, где R_d и C_b , дифференциальное сопротивление и барьерная емкость p - n перехода. Время пролета через ОПЗ менее 10^{-11} с , поэтому его можно не учитывать. Время диффузионного переноса для классического диода $\sim d^2/D_n = d^2 \cdot \tau_n / L_n^2 = 10^{-9} \text{ с}$. В дрейфовых фотодиодах дрейфовое поле ускоряет носители заряда и время пролета: $t = d / \mu_n E = 10^{-3} / 4 \cdot 10^6 = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ с}$.

Если быстродействие фотодиода определяется параметром $R_d C_b$, то и в этом случае дрейфовые фотодиоды имеют

преимущества по сравнению с фотодиодами с резким p- n переходом. В дрейфовом фотодиоде, из-за плавного перехода, ширина ОПЗ в 4 -5 раз больше и S_6 имеет значительно меньшие значения, чем известные

Благодаря внутреннему полю повышается не только быстродействие, но и квантовая эффективность фотодиода. Внутреннее поле, ускоряя неосновные носители, уменьшает вероятность их рекомбинации как в объеме, так и на поверхности полупроводника. Это отражается в увеличении дрейфовой длины неосновных носителей и увеличении квантовой эффективности внутреннего фотоэффекта. При этом наблюдается увеличение фоточувствительности как в коротковолновой области, так и на длинноволновом краю поглощения.

Еще одно важное преимущество можно отметить- это меньшие значения латеральной компоненты фототока в периферийных областях. Латеральный фотосигнал в многоэлементных фотоприемниках обусловлен диффузией неосновных НЗ из соседних фотодиодов. Это приводит к появлению перекрестной помехи и уменьшению разрешающей способности матричного фотоприемника. В дрейфовых же фотодиодах, под действием внутреннего поля, движение носителей имеет направленный характер от p-области к n -области. Так как внутреннее поле направлено по нормали к поверхности, то нормальная составляющая скорости носителя заряда значительно превышает ее горизонтальную. Поэтому вероятность диффузии их в соседний фотодиод уменьшается из-за потенциального барьера. Это приводит к уменьшению перекрестных помех, а, следовательно, повышает разрешающую способность матричных ИК-детекторов. Следовательно, полученные $n^+ - n - p^G - p^+$ структуры весьма перспективны для изготовления высокоэффективных ИК-детекторов нового поколения.

Четвертая глава посвящена разработке охлаждаемых фоторезисторов с более высокими параметрами фоточувствительности, чем известные на сегодняшний день. Для этого предложен новый принцип построения фотопроводящего

детектора ИК-излучения, основанный на сепарации основных и неосновных фотогенерированных НЗ в ОПЗ р-п перехода (или р-п -переходов), созданного в поглощающей области полупроводника на небольшой глубине от поверхности, что позволяет значительно уменьшить влияние поверхностной рекомбинации и обуславливает увеличение фоточувствительности за счет увеличения времени жизни НЗ и приложенного напряжения смещения. Новый принцип экспериментально реализован в 4-х типах фоторезисторов на основе р- $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с инверсными слоями, полученными методом НИО. Самый простой—двухслойный, в котором фотопроводящим слоем служит тонкий приповерхностный слой п-типа, проводимость которого изменяется только за счет фотогенерированных электронов, в том числе диффузионно поставляемых из р-слоя полупроводника. Так, как объем р-слоя более чем 10 раз больше объема п – слоя, то и вольтовая чувствительность фоторезистора увеличивается во столько же раз. Еще большего увеличения (более 100 раз) чувствительности достигается во втором типе фоторезистора, где фотопроводящий слой выполнен в виде тонкой узкой полоски п-типа, созданной на поверхности объемного слоя р-типа (Рис.2).

В этом случае сопротивление фоторезистора увеличивается более 100 раз по сравнению с однородным фоторезистором. Соответственно уменьшаются токи смещения и выделяемая мощность. При низких уровнях фона в указанных фоторезисторах время жизни НЗ увеличивается пропорционально уменьшению уровня фона (Рис.3). В целом это приводит к значительному увеличению параметров фоточувствительности (в 10^2 - 10^3 раз) по сравнению с параметрами фоторезисторов с однородной концентрацией примесей. Важно отметить, что, из-за малого поперечного сечения проводящего слоя, большое сопротивление ($R > 5 \cdot 10^4$ Ом) и малая потребляемая

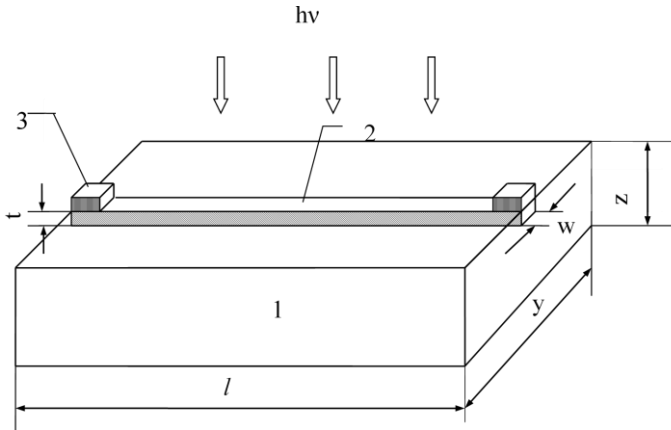


Рис.2 Геометрическая модель фотоприемника. 1-область р-типа проводимости, 2-слой n-типа проводимости, 3-омические контакты.

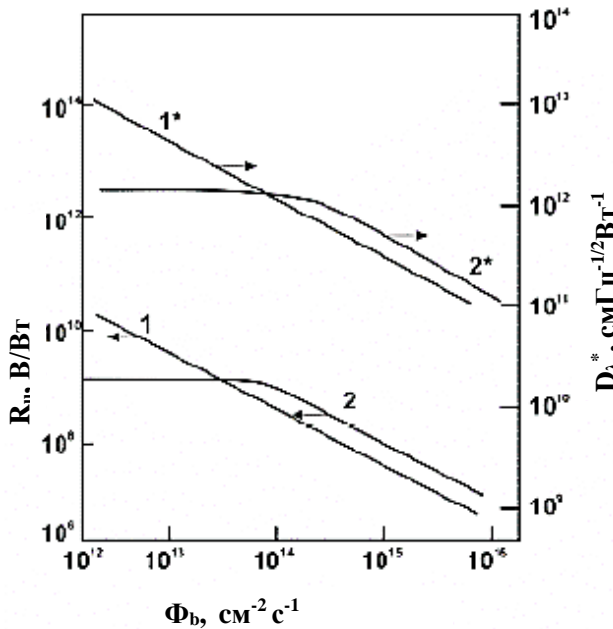


Рис.3 Зависимость расчетных значений R_u и D^*_λ от фонового излучения при 80 К для детекторов на основе $Cd_{0,28}Hg_{0,72}Te$ (кривые 1 и 1 *) и $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ (кривые 2 и 2 *).

мощность ($P < 10^{-6}$ Вт), позволяет использовать их в качестве элемента для МФП ИК- детекторов.

Указанные преимущества, а также существенно малые размеры сечения проводящего слоя, по сравнению не только с диффузионной длиной неосновных носителей, но и с длиной волны излучения, могут значительно расширить область применения рассмотренного фотоприемника. Для практической реализации предложенного ФП, разработана конструкция и технология изготовления предложенного ФП. Разработаны и изготовлены соответствующие фотошаблоны, отработаны технологические процессы нанесения диэлектрических и металлических покрытий на поверхность $Cd_xHg_{1-x}Te$ и их травление методом фотолитографии. Отработаны процессы получения инверсного слоя на р-типе $Cd_xHg_{1-x}Te$ новыми методами - обработки низкоэнергетичными ионами In^+ и плазменным травлением. 10-ти элементный блок фоточувствительных областей с размерами полосы n-типа $w=10$ мкм, $l=60$ мкм и $t=2$ мкм изготавливался в три этапа процесса фотолитографии. Фото-изображение одного из, таким образом полученного, десятиэлементного фоточувствительного блока показан на рис.4. Рассмотренные в главе фоторезисторы с локальными приповерхностными областями с инверсной проводимостью и фоторезистор с чередующимися р- и n- слоями, также демонстрируют увеличение параметров фоточувствительности за счет увеличения напряжения смещения, сопротивления и времени жизни НЗ при низких уровнях фона.

При исследовании фотопроводимости диффузионно легированных элементами 1-й группы слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($0.24 \leq x \leq 0.29$) был обнаружен один из наиболее интересных эффектов в полупроводниках, так называемая долговременная релаксация фотопроводимости (ДР), внешне проявляющаяся как аномально большие времена релаксации фотоотклика при включении или

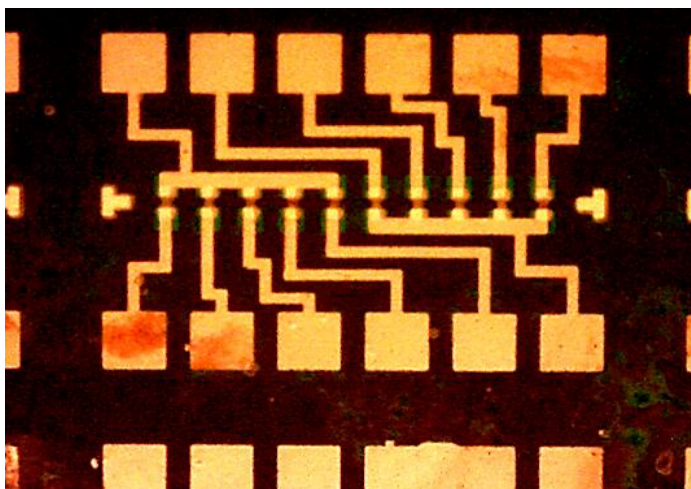


Рис.4 Фото-изображение 10- ти элементного блока фоторезисторов.

выключении света¹¹. ДР ранее не наблюдалась на узкозонных полупроводниках из-за большого уровня фоновой засветки. Нарис.5 показана характерная картина релаксации фототока при импульсном фотовозбуждении с длительностью импульса $t_{и}=1$ мс. Форма импульса фототока состоит из начального быстропротекающего участка с $\tau_f = 0.5-1.5$ мкс и последующего участка с $\tau_r \gg \tau_f$, причем, по мере нарастания или спада постоянная τ_r увеличивается и может достигать величины более 10 ms. При ограничении фоновой засветки, используя для этой цели охлаждаемые диафрагмы, величина сигнала и длительность τ_r увеличивались, а при дополнительной подсветке компонента фототока с τ_r постепенно исчезала по мере увеличения интенсивности подсветки. Наблюдаемые особенности

11. Recombination and long-term relaxation of photoconductivity in p⁺-p-p⁻ structures of Cd_xHg_{1-x}Te (0.24 ≤ x ≤ 0.29) / N.J. Ismayilov and A.A. Rajabli// Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur, -2018, 44,(8), -p. 1058–1061.

характерны явлениям ДР, в основе которых лежит пространственное разделение неравновесных носителей

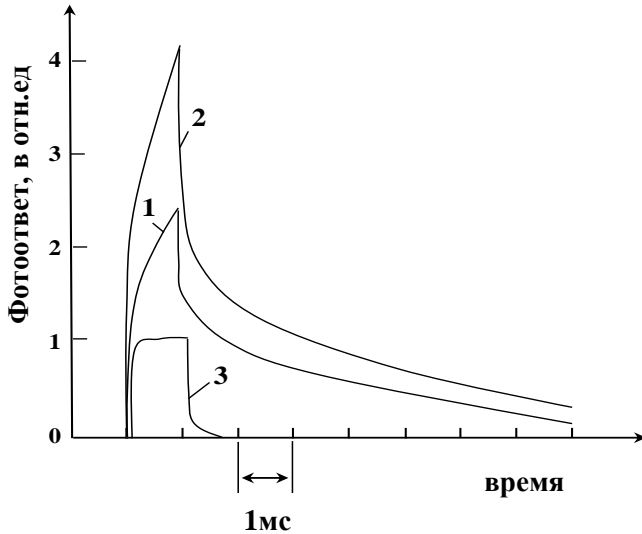


Рис.5.Кривые релаксации фотопроводимости p⁺-p-p⁻ структур Cd_{0.24}Hg_{0.76}Te.

электрическим полем неоднородностей концентрации примесей. Так как при этом рекомбинация сопряжена с необходимостью преодоления потенциального барьера ϕ_b , то время жизни неравновесных носителей, как приведено в¹¹, описывается формулой;

$$\tau_r = \tau_o \cdot \exp(\phi_r/kT), \quad (3)$$

здесь τ_o – время рекомбинации в отсутствии пространственного разделения носителей. Величину ϕ_r , связанную с градиентом концентрации примеси $N_a(x)$, можно определить по формуле $\phi_r = kT \cdot \ln(p^+/p^-)$. Градиент концентрации создает внутреннее электрическое поле $E(x) = -kT/q \cdot dN(x)/q \cdot N(x) \cdot dx$, которое по оценке составляет ~5-10 В/см. При этом дрейфовая скорость НЗ более, чем в 100 раз превышает диффузионную, поэтому неравновесные носители не успевают рекомбинировать. Внутреннее поле разделяя носители заряда подавляет все типы

рекомбинации-поверхностную, излучательную, Оже и Шокли-Рида. Следовательно, полученные $p^+p^Gp^-$ структуры весьма перспективны для изготовления высокочувствительных ИК-детекторов. Как было отмечено, при ограничении фоновой засветки, величина сигнала и длительность τ_r увеличиваются. В пределе при отсутствии фона $\Phi \rightarrow 0$, быстропротекающая компонента фотоотклика должна исчезнуть и релаксация должна происходить с постоянной $\tau \rightarrow \tau_r$. Понятно, что при этом фоточувствительность и обнаружительная способность пропорционально увеличатся и в соответствии с расчетом могут достигать значений $R_v=10^{10}$ В/Вт и $D_\lambda^* > 10^{14}$ смГц $^{-1/2}$ Вт $^{-1}$, но при этом быстродействие будет ограничено на уровне 10^{-3} с. Для сравнения приведем максимальные экспериментально достигнутые значения, ограниченные Оже рекомбинацией¹²: $R_v=10^6$ В/Вт и $D_\lambda^*=1 \cdot 10^{12}$ смГц $^{-1/2}$ Вт $^{-1}$. Эти значения почти равны теоретически предельным для однородного фоторезистора.

Наблюдаемое гигантское значение времени жизни НЗ (более 70 мс) при низких температурах и уровнях фона, позволяет создавать фотоприемники, параметры которых могут достигать значений $R_v=10^{10}$ В/Вт и $D_\lambda^* > 10^{14}$ смГц $^{-1/2}$ Вт $^{-1}$.

Для достижения высоких параметров фоточувствительности фотоприемников на основе узкозонных полупроводников, требуется их охлаждение до температур от 77 до 200 К. Необходимость охлаждения значительно увеличивает массу, габариты и стоимость всей аппаратуры. Поэтому одной из актуальных задач является разработка неохлаждаемых фотоприемников ИК-диапазона с высокими параметрами фоточувствительности.

Пятая глава посвящена разработке высокоэффективных неохлаждаемых детекторов ИК-излучения. Основным фактором, ограничивающим параметры неохлаждаемых фотоприемников, является Оже-процесс термогенерации носителей заряда. Для

12. Mercury Cadmium Telluride Photoconductive Long Wave Infrared Linear Array Detectors/ R. Singh, V. Mittal // Defence Science Journal. – 2003.53(31) – p.281-324

подавления Оже-процесса в слое поглощения были предложены несколько концепций, такие как неравновесный режим экстракции в фотодиодах и эксклюзии в фотопроводниках, магнетоконцентрационный эффект. Однако, большие токи смещения в этих структурах обуславливают высокий уровень шумов вплоть до 1 МГц.

Частично подавление Оже-процессов достигается в фоторезисторах из р-типа материала при оптимальных концентрациях N_a , при которых параметры фоточувствительности достигают максимума. В параграфе 5.1 представлены численные и экспериментальные результаты исследования параметров фоточувствительности неохлаждаемых фоторезисторов на основе $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, оптимизированных на область спектра 3-5 мкм. Проведены вычисления ширина запрещенной зоны, концентрации собственных носителей заряда, коэффициент поглощения, время жизни носителей заряда. На основе полученных р-типа образцов были изготовлены фоторезисторы с размерами чувствительной площадки 150×200 мкм² и толщиной $d=20$ мкм. Измеренные значения параметров фоточувствительности совпадают с расчетными значениями $R_v=10^3 \text{ В/Вт}$ и $D_\lambda^* = 3 \cdot 10^9 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$, что является наилучшим результатом для неохлаждаемых фоторезисторов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0,27$) на область 3-5 мкм.

В параграфе 5.2 представлены результаты разработки и исследования неохлаждаемого ФЭМ-детектора на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, которые могут работать при температурах близких к комнатным. ФЭМ-детекторы имеют некоторое преимущество по сравнению с фотопроводящими детекторами-это отсутствие внешнего напряжения смещения, что обуславливает низкий уровень шумов и отсутствие тепловой нагрузки на фотоприемник, а также высокое быстродействие. Приведены расчеты фотоэлектрических параметров для неохлаждаемого ФЭМ-детектора в зависимости от уровня акцепторного легирования. Показано, что оптимальное акцепторное легирование позволяет значительно повысить вольтговую

чувствительность и удельную обнаружительную способность фотодетектора. Приведены фотоэлектрические параметры изготовленного ФЭМ -приемника для средней ИК- области спектра (3-7 мкм) с максимум чувствительности 6,5 мкм.

В параграфе 5.3 представлен новый подход для улучшения фоточувствительности неохлаждаемых ИК-фоторезисторов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Представлена теоретическая модель и анализ экспериментальных данных фотопроводимости $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x=0,27-0,28$ при комнатной температуре ($T=300\text{ K}$)¹³.

Новый подход заключается в том, что путем создания градиента распределения акцепторов $N_a(x)$ по толщине слоя поглощения создается электрическое поле E . Пространственное разделение неравновесных носителей электрическим полем увеличивает время жизни неравновесных носителей, которое, как приведено в 5.2, описывается формулой (3).

При этом, необходимо, чтобы дрейфовая скорость неравновесных носителей была больше диффузионной. В этом случае разделяемые носители заряда не успевают рекомбинировать и для дальнейшей рекомбинации им надо преодолеть рекомбинационный барьер ϕ_r , высота которого должна быть больше 2 kT/q . Для выполнения поставленного требования, необходимо определить оптимальные параметры материала $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, обеспечивающие выполнение этого условия. Для этого, прежде надо отметить, что дрейфовая скорость $v_{dr}=\mu_E E$, а диффузионная скорости $v_{dif}=\sqrt{\phi_T \cdot \mu_D / \tau}$, здесь амбиполярная дрейфовая подвижность $\mu_E = \mu_n \cdot \mu_p \cdot (n_0 - p_0) / (n_0 \cdot \mu_n + p_0 \cdot \mu_p)$ и амбиполярная диффузионная подвижность $\mu_D = \mu_n \cdot \mu_p \cdot (n_0 + p_0) / (n_0 \cdot \mu_n + p_0 \cdot \mu_p)$, n_0, p_0 -равновесная концентрация электронов и дырок, μ_n, μ_p -подвижность электронов и дырок, соответственно. Далее надо принять во внимание, что с увеличением концентрации акцепторов по толщине образца изменяются такие параметры, как время жизни, диффузионная и

13. New approach to improve the sensitivity of uncooled PC $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x=0.27-0.28$) IR-detectors / N.J.Ismayilov, Infrared Physics and Technology, -2019.100, -p.11-14.

дрейфовая скорость, длина диффузии и дрейфа, удельное сопротивление и т.п.

При комнатных температурах для составов $x > 0.25$ доминируют фундаментальные механизмы Оже- и радиационной рекомбинации. Для сравнения экспериментальных значений τ с максимально теоретически возможными, учитывались только фундаментальные процессы, а механизмы поверхностной рекомбинации и Шокли-Рида не учитывались, так как они определяются технологическими факторами.

В принятой модели, для упрощения расчета дрейфовой скорости, принято экспоненциальное распределение примесей. В этом случае поле E не зависит от координаты x и величину E можно оценить по формуле $E = \varphi_r/d$, где d - толщина образца. На основе полученных расчетных значений τ , μ_E , μ_D , v_{dr} , v_{dif} и удельного сопротивления ρ построены кривые зависимости v_{dr} , v_{dif} , ρ от $Z = p_0/n_i$. Оказалось, что, в области $1 < Z < 1,5$ дрейфовая скорость меньше диффузионной, а при $Z > 1,5$ дрейфовая скорость быстро нарастает и уже в области с $Z > 2$ диффузией и рекомбинацией неравновесных носителей можно пренебречь. В этой области время жизни определяется рекомбинационным барьером φ_r и $\tau_r \sim \tau_0 (p^+/p^-)$, т.е. увеличивается пропорционально градиенту концентрации примесей.

Были построены экспериментальные температурные зависимости времени жизни неосновных носителей для двух образцов $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \approx 0.28$) с концентрациями дырок на передней поверхности $p_1^- = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $p_2^- = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а также теоретически рассчитанные для однородно-легированного полупроводника с такими же концентрациями примеси, с учетом Оже и излучательной рекомбинации.

Экспериментальные значения τ существенно превышали (более 10 раз) теоретически расчетные. Для первого образца с $p_0 = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ теоретическая зависимость определяется совместным воздействием процессов Оже-7 и радиационным механизмами рекомбинации. Для второго образца с $p_0 = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при $T > 250\text{K}$ концентрация собственных носителей превышает примесную,

поэтому при комнатной температуре доминирующим механизмами рекомбинации является Оже-А1 и радиационный для собственного материала. Увеличение времени жизни τ_r для экспериментальных образцов, обусловлено пространственным разделением неравновесных носителей внутренним полем, подавляющим Оже, излучательную и Шокли-Рида рекомбинации.

Для неохлаждаемых фоторезисторов из однородно легированного р-типа $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \approx 0.28$), вольтовая чувствительность R_λ , и обнаружительная способность D_λ^* , ограниченные Оже рекомбинацией достигают максимума около $Z = \gamma^{1/2} \approx 2$. При дальнейшем увеличении Z они падают в основном из-за быстрого уменьшения τ , в то время, как сопротивление детектора достигает максимума при $Z \approx 10$.

В отличие от однородного фоторезистора, в рассматриваемом фоторезисторе с градиентом концентрации примеси, в котором Z увеличивается от $Z = 1,5$ в p^- слое до $Z \geq 20$ в p^+ -слое, τ не уменьшается, а наоборот увеличивается. Кроме того среднее значение Z по толщине d более 4. Следовательно, для такого детектора можно ожидать существенное увеличение R_λ , D_λ^* и уменьшения потребляемой мощности.

Таким образом, в этом параграфе рассмотрен новый подход для улучшения фоточувствительности неохлаждаемых ИК-фоторезисторов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$.

В параграфе 5.4 рассмотрены неохлаждаемые дрейфовые фотодиоды.

В настоящее время для повышения рабочей температуры, вплоть до комнатных, большое внимание уделяется разработке неравновесных фотодиодов с однородными квазинейтральными областями. Интенсивная Оже-генерация НЗ при комнатных температурах приводит к повышению обратного тока на несколько порядков и увеличению уровня шумов по сравнению с охлаждаемыми фотодиодами. Ситуация усугубляется тем, что при повышенных температурах концентрация собственных носителей становится больше или соизмеримо с примесной. В

этих условиях амбиполярные подвижности и коэффициенты диффузии уменьшаются более чем на порядок. Уменьшаются соответственно дрейфовая скорость $v_{dr} = \mu_E E$ и диффузионная скорости $v_{dif} = \sqrt{\varphi_T \cdot \mu_D / \tau}$, а амбиполярная диффузионная длина L_a становится меньше толщины слоя поглощения, что приводит к нескольким негативным последствиям. Для ДВИК детекторов диффузионная длина становится даже меньше глубины поглощения излучения, что приводит к падению квантовой эффективности и сдвигу максимума фоточувствительности в КВ сторону. Это приводит, также к уменьшению быстродействия и разрешающей способности прибора.

Указанных недостатков лишен дрейфовый фотодиод, рассмотренный в параграфе 3.3., где также описана технология его изготовления. Следует отметить, что при диффузионном легировании в диффузионном профиле легирования присутствуют две компоненты-медленная и быстрая, отличающиеся более чем на два порядка значениями коэффициента диффузии. При этом растворимость медленной компоненты более чем на порядок больше растворимости быстрой компоненты, в результате формируется необходимая $p^+ - p^G - n^+$ структура, с уже встроенным внутренним полем, которое коренным образом изменяет закономерности неравновесных процессов в структуре. Как известно дрейфовые диоды характеризуются высоким быстродействием и малыми значениями обратных токов по сравнению с диодами с однородными квазинейтральными областями. Как было показано в параграфе 3.5 темновые токи $p^+ - p^G - n^-$ фотодиода определяются выражением:

$$J_{\text{темн}} = - \frac{qn_i^2 S_s}{N_s} \quad (3)$$

Для дрейфового фотодиода с $x=0,28$, при $S_s = 50$ см/с, теоретически расчетное значение темнового тока $J_s = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (25 \cdot 10^{30} \cdot 10^2 / 5 \cdot 10^{17}) = 8 \cdot 10^{-4}$ А/см², $R_0 A = 3 \cdot 10^3$ Ом/см². Для работы в режиме ограничения фоном требуется, чтобы $J_s < 3 \cdot 10^{-3}$ А/см².

Для сравнения приведем теоретически расчетное значение темнового тока идеального р⁺-п фотодиода на основе Cd_xHg_{1-x}Te с x=0,28 для Оже-механизма рекомбинации при N_a=1,6·10¹⁶ см⁻³: $I_s = q \frac{n_{p0}}{\tau_n} d_p = 1,6 \cdot 10^{-19} (1,5 \cdot 10^{15} / 4 \cdot 10^{-7}) \cdot 10^{-3} = 4 \text{ А/см}^2$ при T=300 К, а R_{0A}=6·10⁻³ Ом/см².

Очень важно отметить, что, полученное расчетное значение темнового тока J_s=8·10⁻⁴А/см² рассматриваемого дрейфового фотодиода, соответствует напряжениям смещения близких к 0, так, как активный слой уже находится в обедненном состоянии и рекомбинация носителей заряда в нем почти отсутствует. Поэтому шумы, обусловленные рекомбинацией и 1/f шумы, обусловленные большими токами, должны быть гораздо меньше, чем для неравновесных НОТ детекторов, работающих при больших токах смещения. Следовательно, обнаружительная способность неохлаждаемого дрейфового фотодиода более чем на порядок может быть больше теоретически предельных значений, рассчитанных для классических и неравновесных фотодиодов.

Экспериментально полученные значения темнового тока для р⁺-р^G-п⁺- структурного фотодиода на основе Cd_xHg_{1-x}Te (x=0,28) с N_d=10¹⁵ см⁻², Ø 0,9 мм составляло ~1мА, что соответствует J_s~6·10⁻² А/см² . Это на 2 порядка больше, чем расчетные значения, но меньше, чем для классического фотодиода. Такое несоответствие объясняется возможно на два порядка большими значениями скорости поверхностной рекомбинации, чем расчетные и меньшими значениями градиента концентрации акцепторов.

Рассмотрим теперь вопрос быстродействия дрейфового фотодиода и покажем в чем его преимущество перед классическим фотодиодом.

Для классических фотодиодов темновой ток $I_s = q \frac{n_{p0}}{\tau_n} d_p$ имеет наименьшее значение при p=(2-3)·n_i. При дальнейшем увеличении N_a, с целью уменьшения времени диффузионного переноса ($\tau_{dif} = d_n^2 / 2,4D_a$), длина диффузии уменьшается и при

$L_D \leq d_p$, $\tau_{dif} = \tau_n / 2$, а I_s увеличивается. То есть, при увеличении быстродействия уменьшается чувствительность.

Для дрейфовых фотодиодов ситуация складывается намного лучше. С увеличением концентрации N_{a0} , в соответствии с (3), уменьшается темновой ток и увеличивается амбиполярная подвижность. При этом максимальная величина концентрации N_{a0} должна обеспечивать условие $\phi_r = (kT/q) \ln(p^+/p) = (kT/q) \ln(N_{as}/N_{a0}) > 2 kT/q$, которое необходимо для превышения дрейфовой скорости над диффузионной. В этом случае дрейфовое время пролета электронов через активный слой $t = d_p \mu_n E = 10^3 / 4 \cdot 10^6 = 2,5 \cdot 10^{-10}$ с, (при $p = 3 \cdot n_i$, $E = 100$ В/см). Для сравнения приведем результаты работы¹⁴: для $x = 0.28$, $N_a = 5 \times 10^{16}$ см⁻³, $d_p = 3$ мкм, экспериментально измеренное значение $\tau \sim 1$ нс, а $\lambda_m = 3.3$ мкм. При такой толщине активного слоя, время фотосоответа дрейфового фотодиода было бы менее 10^{-11} с, т.е. на 2 порядка меньше.

Аналогичный результат получается для дрейфового фотодиода с $x = 0.17$ ($\lambda = 10,6$ мкм при $T = 300$ К). Для сравнения, сперва приведем экспериментальные данные для неравновесного НОТ детектора с $\lambda_c = 10,6$ мкм на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x = 0,17$) с $N_a = 6 \cdot 10^{16}$ см⁻³, с толщиной активного слоя 5 мкм, при $T = 212$ К¹⁵. При смещении 100 мВ максимальное $R_0A = 1,5 \cdot 10^3$ Ом/см², минимальное $J_s \sim 20$ А/см², а $\tau_d = 2$ нс.

Для дрейфового фотодиода при $T = 212$ К, выбираем $p = 3 \cdot n_i = 3 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $p^+ = 6 \cdot 10^{17}$ см⁻³. По формуле (3) вычисляем $J_s = 3 \cdot 10^{-3}$ А/см². Это на 4 порядка меньше, чем достигнуто для неравновесных фотодиодов. Отметим, что для обеспечения параметра $D\lambda^*$, ограниченного фоном, достаточно чтобы $J_s \approx 0,5$ А/см².

14.. Fast response HOT (111) HgCdTe MWIR detectors/ K. Grodecki, P. Martyniuk, M. Kopytko [et.al] // Metrol. Meas. Syst., - 2017.24,(3), - p. 509–514.

15. Dark current suppression in HOT LWIR HgCdTe heterostructures operating in non-equilibrium mode/ P.Martyniuk, W. Gawron, J.Pawluczyk [et.al]//J.Infrared Millim.Waves,-2015.34(4),-p.385-390.

Для толщины активного слоя с $d_p=10$ мкм, $v_{др}=\mu_n E=4,77 \cdot 10^5$ см/с, а $\tau_{др}=5$ нс, а с $d_p=5$ мкм, $v_{др}=9,5 \cdot 10^5$ см/с и $\tau_{др}=0,5$ нс.

Как видно и для ДВИК – детекторов ожидаемые расчетные результаты параметров fotocувствительности дрейфовых фотодиодов значительно лучше, чем для классических детекторов. Кроме того, для дрейфовых фотодиодов внутреннее поле приводит к значительному увеличению квантовой эффективности. Как было показано в предыдущем параграфе, если дрейфовая длина существенно больше диффузионной, то распределение неравновесных носителей определяется не длиной диффузии L_{an} , а характеристическими длинами l_1, l_2 . В рассматриваемых фотодиодах дрейфовая скорость и дрейфовая длина более, чем на порядок превышают диффузионные значения. Расчетная характеристическая длина $l_l=50$ мкм и больше, чем толщина активного слоя, чем и обеспечивается требуемый спектральный диапазон 8-11 мкм.

Необходимо отметить простоту технологии изготовления дрейфовых фотодиодов на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$. Для этого не требуются гетероструктуры, выращенные методами МЛЭ или ГФЭМ и высокотемпературные процессы диффузии, применение ионной имплантации и т.п.

В некоторых применениях оптоэлектроники для спектрального анализа принимаемого излучения возникает необходимость в фотоприемниках, в которых спектральную характеристику fotocувствительности можно менять путем приложения изменяемого внешнего напряжения.

В шестой главе изложено о разработке двухдиапазонных фотоприемников с управляемой напряжением смещения спектральной характеристикой фотоответа. На основе монокристаллов $p-Cd_{0,28}Hg_{0,72}Te$ с инверсным приповерхностным слоем, полученным ионным травлением, нами был разработан и изготовлен двухдиапазонный фотоприемник, спектральная характеристика чувствительности которого может управляться приложенным напряжением как в коротковолновой области, так

и в области длинноволновой границы. Особенности спектральной характеристики фототока объясняются изменением соотношения между барьерными и объемными компонентами фототока при изменении напряжения смещения. Показана возможность одновременной регистрации и управления спектральной характеристикой фоточувствительности этих фотоприемников на краю фундаментального поглощения и в коротковолновой области спектра.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе исследования температурной зависимости времени жизни носителей заряда (НЗ) в р и n типах образцах $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x=0.27-0.29$ и статистики Шокли-Рида-Холла предложен упрощенный метод определения параметров рекомбинационных центров (энергетический уровень, концентрацию, сечение захвата электронов и дырок) и установлено, что для р- и n-типов проводимости $Cd_xHg_{1-x}Te$ рекомбинационные центры с $E_a=65-70$ мэВ -донорного типа с отношением сечений захвата $\gamma_n/\gamma_p=100$ и обусловлены двукратно ионизированными вакансиями слабосвязанной ртути [5].
2. Комплексным исследованием фотопроводимости, фотомагнитного эффекта и фотоэдс установлено, что истощающий изгиб поверхностных зон на естественной свободной поверхности n и р- $Cd_xHg_{1-x}Te(0,2 < x < 0,3)$ приводит к локализации фотопроводимости в приповерхностной ОПЗ при поверхностном поглощении света. Особенности поведения спектральных характеристик чувствительности определяются не только соотношениями между поверхностными и объемными значениями времени жизни, но и между поверхностными и объемными значениями подвижности неравновесных носителей заряда, что

необходимо учитывать при определении скорости поверхностной рекомбинации [1,2,3].

3. Обнаружено, что в результате вакуумно-термического осаждения Al на поверхность $Cd_xHg_{1-x}Te$ с естественным окисным слоем, образуется переходный слой (в виде соединений Al_2O_3 и Al_2Te_3) с высокими диэлектрическими свойствами (напряженность пробоя электрического поля $E > 10^6$ В/см) и характеризуется сравнительно низкой концентрацией поверхностных состояний (в области середины запрещенной зоны $N_{ss} \approx 10^{11} \text{ см}^{-2}$) на границе раздела с $Cd_xHg_{1-x}Te$ [4,7].

Обнаруженное явление использовано для изготовления металл-диэлектрик-полупроводник (МДП)-фоторезистора на основе структуры $InSnO/Al_2O_3/Cd_xHg_{1-x}Te$ (на спектральный диапазон 8–12 мкм), фотоэлектрические свойства которого могут управляться напряжением, приложенным к затвору МДП. В апертурном угле $\theta = \pi$ для МДП- фоторезистора с граничными длинами $\lambda_r = 10,6$ мкм и $\lambda_t = 10,5$ мкм, при $T = 80$ К получены значения $D_\lambda^* = 8 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \text{W}^{-1}$ и $D_\lambda^* = 1 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \text{W}^{-1}$, соответственно [8].

На основе структур Al- $Cd_xHg_{1-x}Te$ (на диапазон 3-5 мкм) создан туннельный МДП –фотодиод, работающий в режиме неравновесного истощения. Такие его преимущества, как высокая чувствительность в коротковолновой области спектра, высокое быстродействие и простота изготовления по сравнению с фотодиодами с p-n переходом, делают его перспективным для применений в МФП в качестве чувствительного элемента [27].

4. В результате проведенных исследований разработаны физико-технологические основы низкотемпературных методов получения p-n, n^+n-p , p^+n и p^+p-p переходов на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ [19,29,31,35,36,37,38,42,43,45,46]. Проведение процессов диффузии акцепторными примесями Cu, Ag, Au при $t = 100-180$ °С физически обосновывается тем, что при этом обеспечивается отсутствие генерации вакансий ртути, а их

концентрация, наоборот, уменьшается при заполнении их примесями Cu, Ag, Au. Для конверсии типа проводимости используется обработка в плазме при комнатной температуре. Таким образом обеспечивается более высокое качество p- n переходов и примесных слоев на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$, чем известные, для изготовления которых проводятся процессы при $t > 250^{\circ}C$, что и обуславливает сравнительно высокую концентрацию вакансий ртути в них.

5. Впервые для изготовления качественных и термостабильных p-n переходов на область 3-5 и 8-12 мкм использовано облучение поверхности p- $Cd_xHg_{1-x}Te$ ионами индия энергией 5-6 кэВ из жидкометаллического источника ионов. Такая низкая энергия ионов позволяет избежать формирования радиационно-нарушенного слоя, формирующийся при энергиях ионов 30-300 кэВ, обычно используемых при ионной имплантации для изготовления фотодиодов на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ [20,25].
6. Разработан и изготовлен охлаждаемый ИК-фотоприемник на новом принципе фотопреобразования (ФП) на основе p- $Cd_xHg_{1-x}Te$ с рекордно высокими параметрами фоточувствительности [26,28,29,30]. При $T = 80$ К и низких уровнях теплового фона вольтовая фоточувствительность имела в 100 раз большие значения, чем известные ФП ИК-диапазона. Предложенный новый тип охлаждаемого фоторезистора характеризуется также высокой разрешающей способностью и значительно меньшей потребляемой мощностью по сравнению с классическими фоторезисторами, что позволяет интегрировать его в матричные фотоприемники. На конструкцию данного фотоприемника получен евразийский патент [33].
7. Впервые в узкозонных монокристаллах полупроводников, при наличии естественного фонового излучения с плотностью потока $10^{16}-10^{18}$ см⁻²с⁻¹, наблюдалось явление долговременной релаксации фотопроводимости с τ_r до 70 мс [38,39]. Наблюдаемая ДР фотопроводимости при $T=80$ К в слоях

$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($0,24 \leq x \leq 0,29$) толщиной 100-300 мкм, легированных медью, обусловлена рекомбинационным барьером, созданным градиентом концентрации примеси вдоль направления излучения. При очень низких уровнях фона такие образцы могут иметь вольтовую чувствительность 10^9 В/Вт.

8. Впервые на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0,28$) разработаны дрейфовые $n^+-n-p^G-p^+$ - фотодиоды, которые по сравнению с резкими n^+-p переходами с одинаковыми по толщине квазинейтральными n и p областями, обладают на порядок меньшими темновыми токами $I_s=2 \cdot 10^{-11}$ А/см² при $T=80$ К [40,44]. Внутренние поля в n^+-n и в p^G-p^+ областях, возникающие вследствие градиента концентрации примесей, разделяют носители заряда, предотвращая их рекомбинацию, вследствие чего в значительной степени снижаются обратные токи по сравнению с классическими фотодиодами. В дрейфовом фотодиоде, благодаря встроенному электрическому полю, так же увеличиваются быстродействие более 10 раз, рабочая температура до 200-300 К, повышается квантовая эффективность и разрешающая способность. Простота изготовления позволяет рассматривать его перспективным элементом матричных ИК-фотоприемников нового поколения.
9. Предложена новая концепция повышения фоточувствительности неохлаждаемых фоторезисторов на основе $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0,27-0,28$) [43]. В поперечных фоторезисторах на основе $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0,27-0,28$) внутреннее электрическое поле, созданное в области поглощения градиентным распределением концентрации акцепторной примеси по толщине, в условиях, когда дрейфовая скорость достаточно больше, чем диффузионная, приводит к увеличению времени релаксации фотопроводимости τ_r более 10 раз при комнатной температуре, что обусловлено пространственным разделением неравновесных носителей внутренним полем, подавляющим все виды рекомбинации.

Экспериментальные образцы, реализованные по этой концепции на область 3-5 мкм обладали в 6 раз большим сопротивлением и на порядок большим значение D_{λ}^* при $T=300$ К, чем фоторезисторы с однородной концентрацией примеси.

10. Разработана простая технология изготовления быстродействующих фотодиодов с большой площадью на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0.28$) [45,46]. Технология основана на формировании n^+ - n слоя на поверхности p -типа образца плазменным воздействием при нанесении полупрозрачного слоя никеля магнетронным испарением. Использование полупрозрачного слоя никеля толщиной ~ 5 нм, нанесенного на поверхность n^+ -слоя, позволяет уменьшить последовательное сопротивление R_{ser} до 1-2 ом, а параметр τ_{RC} до 10^{-11} с, что соизмеримо со временем пролета электронов в обедненной области. Это более чем в 100 раз меньше значений, достигнутых на фотодиодах на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$.
11. Созданы двухдиапазонные ($\lambda_{m1}=4.8$ мкм и $\lambda_{m2}=6$ мкм) ИК-фотоприемники с управляемым напряжением смещения спектральной характеристикой фоточувствительности на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ одного состава ($x=0,27$) [22,23,32]. По сравнению с известными, он имеет такие преимущества, как возможность одновременной регистрации излучения в обеих диапазонах и отсутствие перекрытия диапазонов фоточувствительности. Получен патент № İ2006 0105 [12].

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Guseinov, E.K., Ismailov N.D. Influence of surface mobility of charge carriers on $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x = 0.2-0.3$) photoconductivity// - Ankara: Turkish J. of Physics, -1994.18, -p.1-6.

2. Guseinov, E.K., Ismailov N.D. Photoconductivity of $Cd_xHg_{1-x}Te$ under surface doping by non-conducting metal layers // - Ankara: Turkish J.of Phys., -1994. 18,-p. 669-675.
3. Гусейнов, Э.К., Исмаилов Н.Д. Влиянии приповерхностной области пространственного заряда на фотопроводимость $Cd_xHg_{1-x}Te$ // -Сан.-Пет.:ФТП, -1995.29,-с.1790-1795.
4. Hüseyinov E.K., Ismayilov N.J. The influence of Al films on the properties of real $CdHgTe$ surface// - Ankara: Turkish.J. of Physics, -1996. 20,- p.517-523.
5. Hüseyinov E.K., Ismayilov N.J. Recombination center parameters in n-and p- $Cd_xHg_{1-x}Te$ // - Ankara: Turkish.J.of Physics, -1997.21 - p.1031-1036.
6. Исмаилов. Н.Д. Фотоэлектрические свойства структур $In_2O_3-Cd_xHg_{1-x}Te(0.2 \leq x \leq 0.3)$ / Н.Д.Исмаилов, И.С.Гасанов, Х. Джалилова [и др.]//AJP Fizika, section:az, – Bakı:-1997. 3, (5),- с.14-16 .
- 7.Салаев, Э.Ю. Особенности фотопроводимости $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0.2-0.3$) с тонкопленочным алюминиевым покрытием/ Э.Ю. Салаев, Э.К.Гусейнов, Н.Д. Исмаилов [идр.]// ФТП,-Сан.-Пет.: -1997.31, (6), -с.740-744.
- 8.Ismayilov, N.J. IR detector based on ITO -anode oxide - $Cd_xHg_{1-x}Te$ / N.J. Ismayilov, E.Huseynov, S.R.Samedov [et.al] //J. of Infr., Millimeter, and Terahertz Waves, -2002, 23(9),- p.1337-1345.
- 9.Исмаилов, Н.Д. Влияние облучения ионами Ag^+ на фотопроводимость $Cd_xHg_{1-x}Te$ при комнатной температуре/ Н.Д Исмаилов, А.А.Алиев, И.С.Гасанов [идр.]// Az.МЕА-nın Xəbərләri.Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya,- Bakı:- 2003. 2.- с.29.
- 10.Исмаилов, Н.Д. Влияние металла и степени компенсации примеси на свойства контактов металл- $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($0.45 \leq x \leq 0.5$)/ Н.Д.Исмаилов, А.А.Алиев, Э.К.Гусейнов [идр.]// Az.МЕА-nın Xəbərләri. Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya,- Bakı:-2003.30(5),-с.115-119.
- 11.Алиев, А.А. Влияние глубоких центров на C-V характеристики структур металл- $Cd_xHg_{1-x}Te$ / А.А.Алиев, Н.Д.

- Исмайллов, Ш.М.Кулиев [идр.]//AzMEА-nınХəbərləri. Fizika - riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya,- Bakı: -2004. 34(2),-с.84-86.
- 12.N.C. Ismayilov. Fotoqəuledici. Dövlət reestri № İ2006 0105, 05.10. 2006.
 - 13.Исмайллов, Н.Д. Особенности фотопроводимости р-Cd_xHg_{1-x}Т, облученного низкоэнергетичными ионами аргона/ Н.Д.Исмайллов, Ш.М. Кулиев, Ф.Х.Гусейнов [и др.] // Az.MEA-nın Хəbərləri.Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya, - Bakı:- 2006. 32 (5),-с.114-115.
 14. Huseynov, E.K. Thermal annealing impact on the properties of Cd_xHg_{1-x}Te epitaxial layers- with anodic oxidation/ E.K.Huseynov, Sh.O.Eminov, N.J.Ismayilov [et.al]// Proc.of SPIE,19th Int. Conf. on Photoelectronics and Night Vision Devices. May. 2006, Moscow, Russia, 6636.
 15. Исмайллов, Н.Д. Фоточувствительность Cd_xHg_{1-x}Te (0,2≤x≤0.3) с периодически чередующимися р-п слоями/ Н.Д. Исмайллов, Э.К. Гусейнов, И.С. Гасанов [и др.] // Az.MEA-nın Хəbərləri.Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya,-Bakı -2007.33(2),-с.90-92.
 - 16.Aliyev, A.A.Uncooled PEM detector of the CO₂ –laser radiation /A.A.Aliyev,T.I.Ibragimov, N.J. Ismayilov [et.al] // Proc.of SPIE,19th Int. Conf. on Photoelectronics and Night Vision Devices. May. 2006. Moscow, Russia, 6636.
 17. А. А. Алиев, Неохлождаемый ФЭМ –детектор на основе Cd_xHg_{1-x}Te для приема СО₂ –лазерного излучени/ А. А. Алиев, Т. И. Ибрагимов, Н. Д. Исмайллов [и др.]// Прикладная Физика,-Москва:-2007. (2),- с.106-109.
 18. Эминов, Ш.О. Термоконверсия типа проводимости анодно-окисленных эпитакси-альных слоев CdHgTe/ Ш.О.Эминов, Н.Д.Исмайллов, Раджабли А.А[и др.]// AzMEА-nın Хəbərləri Fizika-Riyaziyyat və texnika elmləri seriyası,-Bakı:-2007.33(5),- с.99-102.
 19. Исмайллов, Н.Д. Фотодиоды на основе Cd_xHg_{1-x}Te, легированные золотом с подлегированием вакансиями ртути/

- Н.Д. Исмаилов, Э . К. Гусейнов, А.А. Раджабли [и др.] // Az.MEA- nın Xəbərləri Fizika-Riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, -Bakı:-2007.33(5),-с.36-38.
20. Исмаилов, Н.Д. Р-п переходы на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$, полученные облучением низкоэнергетичными ионами индия и аргона/ Н.Д. Исмаилов, Э . К. Гусейнов, И . С, Гасанов[и др.]// Прикладная Физика, -Сан.-Пет.: -2008, (1),-с.74-76.
Гусейнов, Э.К. Влияние отжига на свойства эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ с анодным окислением/ Э.К. Гусейнов, Ш.О.Эминов, А.А. Раджабли, Исмаилов, Н.Д, [и др.]// Прикладная Физика, -Сан.-Пет.: -2008.(4),-с.132-76.
22. Исмаилов, Н.Д. Управление спектральной характеристикой фоточувствительности $Cd_xHg_{1-x}Te$ с инверсионным приповерхностным слоем/ Н.Д. Исмаилов, Э.К.Гусейнов, Ш.М.Кулиев [и др.]// AzMEА-nın Xəbərləri.Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya,-Bakı:- 2009.35(5), -с.74-77.
23. Исмаилов, Н.Д. Фотоприемник с управляемой напряжением спектральной характеристикой фоточувствительности на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ //Сан.-Пет.: ФТП,-2009. 43 (3)- с. 396-399.
24. Алиев, А.А. Метод измерения энергии и мощности коротких импульсов монохроматического излучения/ А.А.Алиев, Н.Д. Исмаилов, Ш.М.Кулиев[и др.]// AzMEА-nın Xəbərləri. Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya, -Bakı: 2010.36(5),-с.83-86.
25. Исмаилов, Н.Д. Р-п переходы на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$, полученные облучением ионами индия с энергией 5 кэВ/ Н.Д. Исмаилов, Э.К.Гусейнов, И.С.Гасанов, [и др.] // AzMEА-nın Xəbərləri. Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya, -Bakı:-2011.37(5)-с.67-70.
26. Ismayilov, N.J. Performance improving of small dimension IR detectors// -Сан.-Пет.: Technical Physics Letters – 2011. 3(10), -р.458-430.
27. Huseynov, E., Ismayilov, N. Peculiarities of Current–Voltage Characteristics of Al–p- $Cd_xHg_{1-x}Te$ Tunnel Metal–Insulator–

- Semiconductor Structure// Japanese Journal of Applied Physics,-
2011.50(5S2)-p.05FH02(1-3).
28. Huseynov, E., Ismayilov, N. High sensitive infrared photoresistor of the new generation // - Bakı: AJP Fizika. section: en, -2011, 28, (1), - p.75-77.
 29. Исмаилов, Н.Д. Малоразмерный ИК-фотоприемник со сверхвысокими параметрами фоточувствительности / Н.Д. Исмаилов, Гусейнов Э.К // Труды XXII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, -Москва-24-26 Мая, -2012, -с.119-121.
 30. Ismayilov, N. Super high sensitive low –dimensional IR-detector/ N. Ismayilov, E.Huseynov// Fisica Status Solidi,- 2013. C10(7-8), - p.1156-1159.
 31. Исмаилов, Н.Д. Высокочувствительные неохлаждаемые фотоприемники на основе $Au: Cd_x Hg_{1-x} Te$ на область $3-5 \mu m$ / Н.Д. Исмаилов,., Э.Гусейнов, Ш.Кулиев [и др.] // AJP Fizika, section: az. -Bakı: -2013, 19, (2), - p.119-121
 32. Исмаилов, Н.Д. Фотоприемник на основе $Cd_x Hg_{1-x} Te$ с управляемой спектральной характеристикой чувствительности/ Н.Д.Исмаилов, А.А.Алиев, Э.К.Гусейнов //Proc.of SPIE, 23 Int. Conf. on Photoelectronics and Night Vision Devices, -Moscow: 2014,-с. 387-389.
 33. Исмаилов, Н.Д. Фотоприемник/ Н.Д.Исмаилов, Э.К.Гусейнов. Евразийский патент на изобретение № İ2014 0071, 04.11. 2014.
 34. Ismayilov, N., Huseynov E. High sensitive p- $Cd_x Hg_{1-x} Te$ ($x=0.23-0.3$) based photoconductor with surface conversion layer, // -Bakı: AJP Fizika, section: En, - 2015.21(3), - p. 13-16.
 35. Исмаилов, Н.Д. Высокочувствительные фоторезисторы на основе p- $Cd_x Hg_{1-x} Te$ ($x=0.23-0.3$) с конвертированным приповерхностным слоем/ Н.Д.Исмаилов, И.Г. Гасанов, Ш.О. Эминов [и др.]// - Proc.of SPIE, 23 Int. Conf. on Photoelectronics and Night Vision Devices, -Moscow: -2016, -с.525-531.
 36. Исмаилов, Н.Д., Талипов, Н.Х. ИК-фотоприемники на основе p- $Cd_x Hg_{1-x} Te$ с улучшенными параметрами

- фоточувствительности// Российская конференция по актуальным проблемам фотоэлектоники. Фотоника,- Новосибирск: 11-15 сентября, -2017,-с.127.
37. Ismayilov, N.J. Talipov, N.Kh., Voitsekhovskii A.V. High-sensitive two-layer photoresistors based on $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ with a converted near surface layer// -Novosibirsk: Russian Physics Journal,- 2018,60 (12), -p.2186 - 2192.
 38. Ismayilov, N.J., Rajabli A.A. Recombination and long-term relaxation of photoconductivity in $p^+p^-p^-$ structures of $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($0.24 \leq x \leq 0.29$) and // -Kharkov: Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur, -2018, 44,(8), -p. 1058–1061
 39. Исмаилов, Н.Д. Долговременная релаксация фотопроводимости и процессы рекомбинации в $p^+p^-p^-$ структурах $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($0.24 \leq x \leq 0.29$) // -Bakı: AzMEА-nın Xəbərleri. Fizika-Texnika və Riyaziyyat elmləri Seriyası, -2018, 38(5),- с.81-87.
 40. Исмаилов, Н.Д., Раджабли, А.А. Высокоэффективные дрейфовые фотодиоды на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($0.24 \leq x \leq 0.29$)/ Н.Д. Исмаилов, // XXV Международная научно-техническая конференция и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Труды конференции. В 2-х томах.-Москва:-2018.- с.123-125.
 41. Исмаилов, Н.Д. О подавлении Оже-рекомбинации в неохлаждаемых фотоприемниках на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, -Bakı: AJP Fizika, Section:az,-2018.24(3),-с.48-49.
 42. Исмаилов, Н.Д. Фоторезисторы на основе $p\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с локальными приповерхностными n^+ -областями / Н.Д.Исмаилов, Р.И.Мухтарова, А.А Раджабли [и др] // AJP Fizika, section: Az,-Bakı: -2018.24(3),-с.46-47//
 43. Ismayilov, N.J. New approach to improve the sensitivity of uncooled PC $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x=0.27\text{--}0.28$) IR-detectors / Infrared Physics and Technology,-2019.100, -p.11–14.
 44. Исмаилов, Н.Д. Дрейфовый фотодиод на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // -Bakı: AzMEА Xəbərleri. Fizika-Riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, -2020,40 (5)- с.87-92.

45. Исмаилов, Н.Д. Быстродействующие ИК-фотодиоды на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ / Н.Д. Исмаилов// Respublika elmi-texniki konfransi: "Radiotexnikanın müasir problemləri", -Bakı:- 20-26 Oktyabr.2021.
46. Ismayilov, N.J., Rajabli A.A. Large area $Cd_xHg_{1-x}Te$ photodiode with picosecond response time τ_{RC} // -Kharkov: Low Temperature Physics/Fizika Nizkikh Temperatur,- 2022,48(2),- p. 181–184.



Защита диссертации состоится « 24 » января 2024 года

в 9³⁰ на заседании диссертационного совета ED 1.14 ,
действующего на базе Института Физики Министерства науки
и образования Азербайджанской Республики.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
Физики Министерства Науки и Образования Азербайджанской
Республики.

Электронная версия диссертации и автореферата размещена на
официальном сайте Института Физики Министерства науки и
образования Азербайджанской Республики.

Автореферат разослан по соответствующим адресам

« 23 » Декабря 2023 года

SURƏTİ

Подписано в печать: __. __. 2023

Формат бумаги: А5

Объём: 77506

Тираж: 70