

На правах рукописи

РГБ ОД

30 МАЙ 2000

Северцев Владимир Николаевич

**Пороговые фотоприемники на основе
гетерозитаксиальных структур CdHgTe**

Специальность

05.27.01 - Твердотельная электроника,
микроэлектроника и нанoeлектроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

**Санкт-Петербург
2000 г.**

Работа выполнена в ГУП "Альфа"

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор **Косоков О.В.**

доктор физико-математических наук,
профессор, лауреат Госпремии **Надеждинский А.И.**

доктор физико-математических наук **Яковлев Ю.П.**

Ведущая организация:

ФНПЦ НПО ГИПО, Казань

Защита состоится "19" июня 2000 года в ___ часов на заседании Диссертационного совета Д 063.38.25 при Санкт-Петербургском Государственном Техническом Университете по адресу: 195251 ул. Политехническая, д. 29.

Автореферат разослан "16" мая 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук, профессор

Б.Е. Саморуков

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Проблемы тепловидения привлекают все возрастающее внимание, разрабатываются и применяются различные оптико-электронные системы. Важнейшим элементом в этом быстроразвивающемся направлении ИК техники являются многоэлементные ИК приемники излучения из $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ (КРТ).

Диссертация посвящена физико-технологическим исследованиям и разработкам пороговых линейчатых и матричных фотоприемников (фоторезисторов и фотодиодов) из гетерозитаксиальных структур КРТ и фотоприемных устройств на их основе диапазона 8-14 мкм. Все разработки высокотехнологичны и завершены серийным выпуском.

Тепловизионная техника, основанная на применении фотоприемников ИК диапазонов длин волн 3-5 и 8-14 мкм, находит широкое применение в оборонных комплексах и народном хозяйстве.

Основное применение тепловизионной техники в настоящее время и в ближайшем будущем будет сосредоточено в военной области, обеспечивая ведение военных действий в ночных условиях. Это пассивные необнаруживаемые системы. В том числе: системы ночного видения для водителей танков и БТР, системы прицеливания и управления огнем танков, противоракетные и противотанковые системы обнаружения, наведения и прицеливания, системы для автоматического обнаружения, распознавания и уничтожения воздушных целей, авиационные и космические разведывательные системы, вертолетные и самолетные ИК станции переднего обзора, дающие изображение разведываемой местности по ее собственному тепловому излучению в реальном масштабе времени и т.п.

Использование тепловизионной техники диапазона 8-14 мкм в народном хозяйстве позволит решать ряд важнейших проблем:

- в медицине: ранняя диагностика рака и других заболеваний;
- в геологии: поиск с самолета или космического корабля нефтегазовых, рудных и нерудных месторождений, геотермальных вод;
- в городском хозяйстве: обнаружение скрытых утечек тепла, горячей и холодной воды в теплотрассах и водопроводной сети, обнаружение карстовых полостей в районах массовой застройки;

- в сельском хозяйстве: дистанционный (с самолета или спутника) контроль увлажнения и иссушения почв, состояния посевов с/х культур, выявление пораженных вредителями и болезнями посевов и др.);
- в лесном хозяйстве: выявление массового поражения леса вредителями, обнаружение очагов лесных пожаров при значительном задымлении;
- в экологии: тепловые загрязнения рек и водоемов, загрязнения воздушного бассейна выбросами электростанций и других промышленных предприятий, подземная миграция отравленных вод – отходов металлургической и химической промышленности);
- в контроле и диагностике чрезвычайных ситуаций: насыщенность снегов водой в период таяния (угроза наводнений), скрытое нарастание вулканической активности;
- в энергетике: дистанционный контроль предаварийных ситуаций крупных энергетических объектов;
- в транспорте: оперативный дистанционный контроль подвижного состава, контроль букс.

Только в геологии с помощью простейшего самолетного тепловизионного устройства "Вулкан" удалось получить большой объем информации о залежах полезных ископаемых. Полеты с этой аппаратурой над крупными городами позволили выявить аварийные участки теплотрасс и своевременно произвести их ремонт.

Широкое применение тепловизионной техники в военных и тем более в гражданских целях сдерживается высокой стоимостью ИК фотоприемников и сложностью их производства.

За рубежом и в нашей стране активно ведутся работы по созданию новых технологий получения фоточувствительных материалов и фотоприемников на их основе для удовлетворения потребности тепловизионной техники. Общее увеличение затрат на ИК фотоприемники в США возрастает с 1520 млн. долларов в 1991 году до 12320 млн. долларов в 2000 году, т.е., практически, на порядок.

Суть проблемы заключается в том, что развитие тепловизионной техники на диапазон длин волн 3-12 мкм и ее удешевление, в значительной степени, зависят от качества, стоимости и масштабов производства полупроводниковых многоэлементных ИК фотоприемников.

В ряде стран разработаны технологии изготовления высокоэффективных фотоприемников на основе КРТ как в виде единичных элементов, так и в виде многоэле-

ментных фотоприемников (линеек и матриц). В России промышленные ИК фотоприемники на диапазон длин волн 8-12 микронов выпускаются в виде линеек фотосопротивлений, изготавливаемых из объемного монокристалла, либо в виде одиночных фотодиодов. Матрицы ИК-фотодиодов изготавливаются на основе эпитаксиальных пленок КРТ, выращенных жидкофазной эпитаксией. Широкому производству и использованию ФП на основе таких материалов КРТ препятствует высокая цена материала, составляющая примерно 430 \$ за 1 г монокристалла КРТ или 80 \$ за 1 см² эпитаксиальной пленки КРТ, полученной методом МЛЭ.

В настоящее время основные усилия направлены на развитие систем тепловидения, использующих фотоприемники с многорядными линейками и матрицами фоточувствительных элементов в фокальной плоскости с высокой плотностью фоточувствительных площадок, соединенных с многофункциональными сверхбольшими интегральными схемами (СБИС-мультиплексорами) для обработки сигнала. В соответствии с этим направлением к технологии получения узкозонного материала КРТ для ИК фотоприемников предъявляются чрезвычайно жесткие требования - она должна обеспечивать приготовление пластин или слоев материала большой площади, с большой однородностью свойств и с невысокой стоимостью. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают эпитаксиальные методы выращивания слоев КРТ. Жидкофазовая эпитаксия КРТ стала возможной благодаря успехам в получении монокристаллов CdZnTe высокого структурного совершенства, согласованных по параметру решетки с выращиваемой пленкой КРТ. Методы молекулярно-лучевой и газофазовой эпитаксии позволяют выращивать гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) на подложках GaAs и Si с буферными слоями из CdTe и CdZnTe. Высокая цена подложек из CdZnTe (близка к цене объемных монокристаллов КРТ) не позволяет существенно снизить стоимость выращиваемых на них слоев КРТ. В настоящее время в РФ и за рубежом проводятся интенсивные работы по выращиванию эпитаксиальных пленок КРТ на недорогих подложках GaAs и Si, инородных по отношению к CdTe и CdZnTe. В зарубежной литературе сообщается об успехах в изготовлении многоэлементных ИК-матриц фотодиодов (размерностью 256x256 элементов), полученных из ГЭС КРТ на подложках из GaAs и Si. Применение относительно дешевых и доступных подложек из GaAs и Si позволит значительно снизить стоимость ГЭС КРТ и фотоприемников. Создание систем обработки сигналов ИК фоточувствительного элемента фотоприемника с помощью СБИС на единой подложке из Si приведет к значительному улучшению характеристик приборов, к созданию ФПУ и тепловизионной техники нового класса.

Исследования и разработка физико-технологических основ многоэлементных фотоприемников позволяют создать научно-производственную базу тепловизионной техники широкого народнохозяйственного и военного применения.

Цель работы

Целью работы являлось создание нового класса линейчатых и матричных пороговых фотоприемников на основе гетероэпитаксиальных структур GaAs - CdZnTe - Cd_xHg_{1-x}Te ($x=0,8-0,2$) - Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te - Cd_xHg_{1-x}Te ($x=0,2-0,4$) с высокой чувствительностью. По ходу выполнения работы приходилось решать широкий круг задач, связанных с технологией такого "капризного" полупроводникового материала как твердый раствор КРТ, криогенной техникой и обработкой сигнала многоэлементных (сначала в виде линсек, затем в виде матрицы) ФЧЭ из КРТ. Одной из главных задач был переход в производстве фотоприемников от объемных монокристаллов КРТ, при использовании которых приходится в 100 раз уменьшать толщину пластины при больших отходах дорогого материала, на совершенные и передовые гетероэпитаксиальные структуры КРТ, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии и обладающие рядом новых, характерных для ГЭС, свойств. Эта работа является развитием идей академика Ж.И. Алферова применительно к узкозонным полупроводниковым соединениям A^{II}B^{VI}. ГЭС КРТ, полученные методом МЛЭ, отличаются однородностью, большими размерами, приемлимыми электрофизическими и фотоэлектрическими характеристиками, относительно дешевой (~ 80 \$ за 1 см²), стабильностью параметров, зеркально гладкой поверхностью. Они существенно (в 4-5 раз) дешевле объемных монокристаллов КРТ и перспективны для формирования многоэлементных фотоприемников диапазона 8-14 мкм. Другая задача состояла в разрешении вопроса, связанного с конструкторской и технологической проработкой высокоэкономичных, с малыми теплопритоками, надежных фотоприемных модулей, являющихся одновременно частью газовой криогенной машины, а также весь комплекс проблем, связанных с организацией серийного производства высоконадежной конкурентоспособной и наукоемкой продукции (фотоприемников и ФПУ) как элементной базы тепловидения. Одной из задач работы являлось также решение проблем газофазного метода синтеза подложечных полупроводниковых материалов GaP и GaAs для эпитаксии, используемых также в микроэлектронике и микрофотозлектронике.

Защищаемые положения

На защиту выносятся микрофотозлектроника гетерозпитаксиальных структур на $Cd_xHg_{1-x}Te$, полученных МЛЭ:

1. Физико-технологические основы многоэлементных фотоприемников на основе сложных гетерозпитаксиальных структур $GaAs - CdZnTe - Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,8-0,2$) - $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te - Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,2-0,4$) и создание нового класса линейчатых и матричных пороговых фотоприемников с высокой чувствительностью:
 - выбор метода эпитаксии, обоснование преимуществ МЛЭ;
 - оптимизация свойств гетерозпитаксиальных структур большого диаметра (52 мм);
 - химико-технологические исследования получения подложечного материала из газовой фазы для гетерозпитаксиальных структур. Синтез особо чистых $GaAs$ и GaP за счет покрытия реактора и тиглей защитными слоями из нитрида бора и нитрида алюминия. Модель роста кристаллов $GaAs$ и GaP при их синтезе из газовой фазы за счет встраивания комплексов Ga_nP_n , состав и концентрация которых зависят от газовой фазы.
2. Методы повышения чувствительности фоторезисторов из КРТ:
 - уменьшение рекомбинации неравновесных носителей на контактах и увеличение, тем самым, эффективного времени жизни с помощью блокирующих контактов;
 - снижение влияния "пролета" носителей (sweep out) путем частичного затенения фоточувствительной площадки и увеличения расстояния между контактами без увеличения фотоактивной зоны фоторезистора из КРТ;
 - увеличение эффективного времени жизни неравновесных носителей и расширение спектральной области фотоответа фоторезистора из КРТ методом нанесения варизонных слоев с заданным градиентом состава на поверхность слоя КРТ постоянного состава и резкого уменьшения, тем самым, скорости поверхностной рекомбинации в гетерозпитаксиальной структуре $GaAs - CdZnTe - Cd_xHg_{1-x}Te - Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te - Cd_xHg_{1-x}Te$.
 - способ подавления низкочастотных составляющих шума фоторезистора с помощью теплового фильтра.

3. Методы стабилизации свойств и параметров фоторезистора:

- создание собственного анодного оксида, предотвращающего уход ртути с поверхности;
- получение на поверхности фоточувствительного элемента многослойных защитных и просветляющих покрытий;

4. Разработка и серийный выпуск высоконадежных многоэлементных фотоприемных устройств ГЭС КРТ, полученных МЛЭ, в том числе, для тепловидения, теплопеленгации, термографии и др. на область спектра 8-14 мкм:

- разработка гибридных ФПУ с многофункциональной малощумящей помехозащитной СБИС в холодной зоне вблизи ФЧЭ для обработки сигнала изображения;
- теплофизические и конструкторские разработки вакуумных охлаждаемых модулей, обладающих высокой надежностью и малыми теплопритоками при глубоком интегрировании с системами охлаждения.

Научная новизна

1. Впервые в отечественной ИК технике теоретически обоснованы, экспериментально подтверждены и освоены в серийном производстве многоэлементные фоторезисторы нового типа спектрального диапазона 8-14 мкм на основе сложных гетероэпитаксиальных структур КРТ, изготовленных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Впервые линейчатые и матричные фотоприемники созданы на основе структур большого диаметра (52 мм) GaAs - CdZnTe - $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,8 \rightarrow 0,2$) - $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ - $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x=0,2 \rightarrow 0,4$) с заданными значениями градиента состава dX/dx и градиента ширины запрещенной зоны dE_g/dx , низкой концентрацией носителей в рабочем ($x=0,2$) слое $n_{77} \leq 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, высокой подвижностью $\mu_{77} \geq 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и временем жизни неравновесных носителей $\tau_{77} \geq 10^{-6} \text{ с}$, оптимальными толщинами рабочего и варизонных слоев.

Впервые достигнуто:

- высокая вольтовая чувствительность, на порядок больше известного уровня, при обнаружительной способности, ограниченной фоном, за счет резкого снижения

скорости поверхностной рекомбинации неравновесных носителей под действием

встроенного поля $E = \frac{1}{e} \frac{dE_g}{dx}$ варизонных слоев;

- расширение области спектральной чувствительности в диапазоне 8-13 мкм за счет генерации носителей в варизонных слоях с большей шириной запрещенной зоны;

- минимизация рассеиваемой в фоточувствительных элементах мощности смещения (снижение на порядок), что особенно важно при использовании микрокриогенных систем для охлаждения фотоприемника.

2. Теоретически оптимизированы и реализованы в конструкциях и технологических процессах в серийном производстве фотоприемников из КРТ диапазона 8-14 мкм:

- эффект снижения скорости дрейфа носителей к контактам в электрическом поле смещения фоторезистора путем создания отражающих контактов с встроенным электрическим полем (n^+) и увеличения, тем самым, линейного участка зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения $S_v (V_{сш})$;

- эффект уменьшения влияния "пролета" носителей (swep out) в фоторезисторе путем затенения части фоточувствительной площадки при сохранении ее фотоактивной зоны. Показано, что эффект оптимален при увеличении расстояния между контактами не более чем на 5 диффузионных длин;

- эффект подавления низкочастотных составляющих шума фотоприемника путем использования теплового RC фильтра, где роль тепловой емкости выполняет масса охлаждаемого элемента, а тепловое сопротивление определяется цепью отвода тепла от фоточувствительного элемента к источнику холода. Предложен метод расчета теплового фильтра - упругого демпфера газовой криогенной машины;

- эффект стабилизирующего действия собственного анодного окисла фоторезистора из КРТ ($E_g = 0,1$ эВ), предотвращающего уход ртути из КРТ через поверхность и диффузии вакансий ртути внутрь фоторезистора.

3. Теоретически и экспериментально показано, что в эпитаксиальных слоях КРТ ($x = 0,2$), полученных методом МЛЭ на подложке из GaAs, доминирует ударная рекомбинация (Оже), что свидетельствует о высоком качестве этих слоев и перспективности их использования в фотоприемниках диапазона 8-14 мкм.

4. Предложена модель роста высококачественных кристаллов GaP и GaAs из газовой фазы с учетом встраивания комплексов Ga_mP_n , состав и концентрация которых зависят от газовой фазы.

5. Предложена принципиальная СБИС матричного фотоприемного устройства, выполняющая операции накопления заряда (усиления), вычитания фона и произвольного считывания (х-у адресация).

Практическая значимость

Практическая значимость работы определяется:

1. Широким спектром фактического использования ее результатов в военной технике и народном хозяйстве (танковые ночные визир-прицелы; инфракрасные ночные системы прицеливания и наведения противотанковых управляемых снарядов (ПТУРС); инфракрасные космические телескопы для зондирования Земли из космоса; самолетные инфракрасные тепловизионные разведовательные комплексы; тепловизоры кругового обзора; самолетная тепловизионная аппаратура геологической разведки полезных ископаемых и контроля экосистем и др.);

2. Созданием ряда базовых технологий изготовления и конструкций модулей фотоприемников на основе объемных монокристаллов и гетерозитаксиальных слоев КРТ для области спектра 8-14 мкм с различным числом элементов (10, 10×2, 16×2, 32×2, 64, 48×2, 128), а также фотодиодных матриц на базе ГЭС КРТ формата 128×128;

3. Внедрением полученных результатов в производство фотоприемников и ФПУ, тепловизоров на их основе и различных комплексов. Созданием заводской технологической линии серийного выпуска фотоприемников и фотоприемных устройств, обладающих высокими характеристиками и надежностью, обеспечивающих по ряду параметров приоритет отечественной техники над зарубежной. Достигнуто увеличение процента выхода годных ФЧЭ и снижение себестоимости ФП и ФПУ из материала КРТ.

Достоверность

Достоверность полученных физико-технологических результатов обусловлена их согласием с известными положениями фотоэлектроники. Методики и теоретические выкладки подтверждаются экспериментальными результатами и успешным использованием их в разработке приборов. Достоверность научных результатов и разработанных технологий находит подтверждение в повторяемости - при серийном производстве но-

вого класса ИК тепловизионных фотоприемников на основе гетерозпитаксиальных структур CdHgTe, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Апробация работы

Апробация работы проводилась длительное время путем внедрения ее результатов и дальнейшего авторского надзора в организованное на Государственном унитарном предприятии "Альфа" серийное производство фотоприемников и фотоприемных устройств на материале КРТ. Фотоприемники и фотоприемные устройства, созданные в процессе настоящей работы, вошли в состав тепловизионной техники, используемой в Вооруженных силах, в частности, в Главном ракетно-артиллерийском управлении (ГРАУ) и в Главном авто-бронетанковом управлении (ГАБТУ) МО РФ. Разработанные приемники поставляются в ряд организаций, в т.ч. ФНПЦ НПО ГИПО (г. Казань), ОАО Красногорский завод (г. Москва), ГУП КБ Приборостроения (г. Тула), ЦНИИ МАШ (г. Королев), Новосибирский приборостроительный завод. Фотоприемники и фотоприемные устройства, созданные по результатам настоящей работы опробованы и приняты в состав военной техники, экспортируемой государством за рубеж (системы "Агава-2", "Ноктюрн", "Метис", "МетисМ", "Корнет-Э" и др.).

Публикации

Материалы диссертации отражены в 61 работе, включая публикации в журналах, авторские свидетельства, научно-технические отчеты и труды конференций. Издана монография по фотоприемникам на КРТ.

Личный вклад автора в диссертацию

Все определяющие научные результаты, выбор решения, выводы, рекомендации, ноу-хау, внедрение результатов в производство и организация выпуска фотоприемников нового класса на ГЭС КРТ, полученных МЛЭ, принадлежат соискателю.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, приложения, списка авторских публикаций и библиографии.

Общее количество страниц в работе - 243, она содержит 87 рисунков. Основная часть работы имеет 201 страницу, 79 рисунков и 13 таблиц. В Приложении (14 стр.) приведены характеристики серийно выпускаемых фотоприемников, параметры тепловизионной аппаратуры с их использованием и акты внедрения. Авторские публикации насчитывают 61 работу (6 стр.), библиография - 315 работ (21 стр.).

Краткое содержание диссертации

Первая глава содержит обзор литературы по приемникам на КРТ. В обзоре дан системный анализ работ, связанных с развитием фотоприемников. Рассмотрена история развития ИК фотоприемников изображения, аналогов человеческого зрения в ИК диапазоне 8-14 мкм - от эвапоратора до матричных фотоприемников. Просматривается тенденция развития фотоприемников из $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ от одноплощадочных к линейчатым, матричным и системам обработки информации.

Подводя итог краткому обзору приемников ИК излучения, необходимо прежде всего подчеркнуть, что тройное соединение $CdHgTe$ является в настоящее время самым распространенным материалом ФЧЭ ИК приемников. Одноэлементные приемники из КРТ по быстродействию, чувствительности не имеют себе равных в спектральном диапазоне 3-20 мкм. Примесные фотоприемники (легированный Ge и Si) приближаются по чувствительности к ФП из КРТ, но требуют значительно большего охлаждения при работе в одном и том же спектральном диапазоне. В обзоре отмечено, что лучшие охлаждаемые смотрящие матрицы из КРТ имеют NETD 0,01 К [303], что превосходит чувствительность приемников любых других типов. Прогресс эпитаксиальных технологий ведет к дальнейшему улучшению параметров КРТ приемников ИК излучения и значительному их удешевлению.

Вторая глава посвящена гетероэпитаксиальным структурам на основе $CdHgTe$. Приводится анализ различных методов получения объемных монокристаллов OM и разных видов эпитаксий - жидкостной, газофазовой и молекулярно-лучевой (МЛЭ). Показаны преимущества МЛЭ КРТ и сформулированы требования к сложным ГЭС КРТ, разработанным в ходе совместной работы с ИФП СО РАН. В результате были разработаны сложные гетероэпитаксиальные структуры большого диаметра (52 мм) с фоточувствительным слоем $Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te$ на область спектра 8-14 мкм, обладающие высокими параметрами.

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии наиболее перспективен, и в настоящее время позволяет получать многослойные гетероэпитаксиальные структуры приборного качества. Результаты

измерения параметров образцов ГЭС КРТ, изготовленных методом МЛЭ, дают основания считать, что эти образцы не имеют аналогов за рубежом, их параметры достаточны для разработки и изготовления из них экспериментальных и опытных образцов ФП. По всем электрофизическим характеристикам образцы ГЭС КРТ, полученные МЛЭ не уступают образцам ОМ КРТ: $n_{77} = (2-6) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $p_{77} = (5-20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; $\tau_{77n} \approx (1-1,5) \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $\tau_{77p} \approx 20 \cdot 10^{-9} \text{ с}$; диаметры образцов - 52 мм и 76 мм; толщина рабочего слоя 5 - 7 мкм; подложка GaAs; отклонение состава $\Delta x = \pm 0,005$ молярных долей. Эти параметры были неоднократно подтверждены.

Подтверждена однородность, высокая тепловая прочность и стойкость к термударам ГЭС КРТ, полученных МЛЭ.

В конце главы приводятся результаты химико-технологических исследований по выращиванию газотранспортным методом совершенного GaP и GaAs подложечного материала для эпитаксии CdHgTe. Дается термодинамический анализ системы Ga-PCl₃-PH₃-H₂. Рассматривается кинетика газофазного синтеза и исследования глубоких примесей. Были получены совершенные монокристаллы с низким содержанием остаточных примесей, с управляемыми типом и концентрацией носителей и однородным распределением примеси.

Предложен способ синтеза особо чистых GaAs и GaP из газовой фазы в реакторах и тиглях с защитными слоями из нитрида бора и нитрида алюминия, позволяющий получать монокристаллы необходимого качества. Разработана модель роста кристаллов GaAs и GaP при их синтезе из газовой фазы за счет встраивания комплексов Ga_mP_n, состав и концентрация которых зависят от газовой фазы. Впервые определены предельные растворимости в GaP переходных металлов.

В третьей главе приводятся результаты работ по исследованию особенностей фоторезисторов на КРТ. Анализируется связь обнаружительной способности и вольтовой чувствительности с параметрами материала фоторезистора. Проведены исследования и физико-технологические разработки методов получения фоторезисторов с высокой чувствительностью. Среди них: использование запирающих контактов для увеличения времени жизни; частичное затенение чувствительной площадки и понижение влияния пролета носителей; повышение квантовой эффективности напылением антиотражающих покрытий и устранение влияния границы фоточувствительного слоя путем пассивации поверхности.

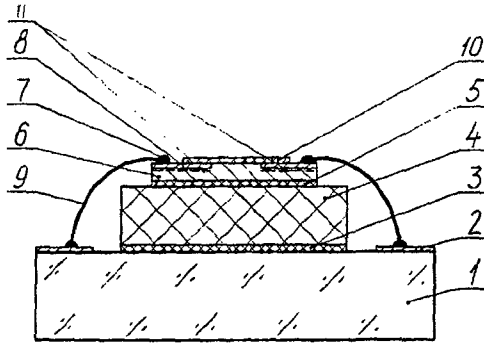


Рис. 1. Фоточувствительный элемент с запирающими контактами

1 - подложка контактного раскра, 2 - контактная дорожка раскра, 3, 5 - ивй, 4 - подложка ФЧЭ, 6 - фоточувствительный слой КРТ, 7 - p-n переход, 8 - контакт ФЧЭ, 9 - проводник Au, 10 - защитное просветляющее покрытие, 11 - подконтактный слой n^+ .

Особенностью конструкции рис. 1 является наличие в подконтактной области фиксированного заряда n^+ (показана пунктиром на рис. 1), полученного путем создания дефектов в подконтактной зоне травлением ионами аргона. Наличие электрического поля такого контакта затрудняет движение дырок к контактам и их рекомбинации на границе раздела металл-полупроводник. Величина этого поля

$$E_{n^+} \approx \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{Nd(x)} \cdot \frac{dN_d}{dx}$$

Область $n-n^+$ аппроксимируется, как резкий $p-n$ переход с постоянной концентрацией. Очевидно, что эффективность действия встроенного электрического поля пропорциональна величине поля, зависящего от n^+/n . Расчеты и эксперименты с блокирующими запирающими контактами показали, что при $n^+/n \approx 16$ достигается 4-5 кратное увеличение токовой чувствительности, что указывает на эффективность метода.

Достигнуто снижение скорости дрейфа носителей в электрическом поле смещения методом создания барьера n^+ (запирающие контакты) путем обработки подконтактных областей ионами аргона и увеличения, тем самым, эффективного времени жизни неравновесных носителей в фоторезисторе.

Получено уменьшение влияния "пролета" носителей путем частичного затенения фоточувствительной площадки и увеличения расстояния между контактами фоторезистора без увеличения фотоактивной зоны.

Удалось создать фоторезисторы из ОМ КРТ, имеющие параметры близкие к предельным (фоновое ограничение). В фоторезисторах, ограниченных фоном, изготовленных из высококачественных ОМ КРТ, при комнатных фонах (больших апертурах)

наблюдается при высоких смещениях насыщение вольтовой чувствительности и генерационно-рекомбинационных шумов. Такие фоторезисторы имеют большую однородность параметров.

Для увеличения вольтовой чувствительности путем снижения влияния "пролета" носителей в ряде случаев используется более сложная конструкция и технология изготовления ФЧЭ. В конструкции, представленной на рис. 2, "электрический" размер ФЧП (расстояние между контактами) L существенно больше, чем световой b .

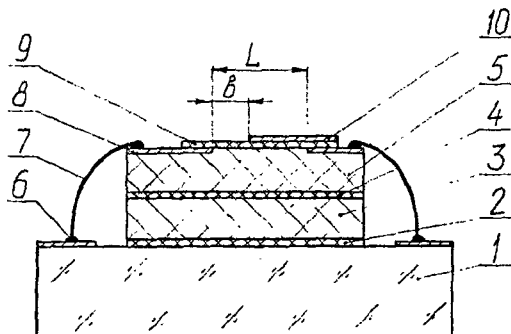


Рис. 2 Фоточувствительный элемент с частично эпитаксиальной площадкой
1-подложка контактного расара, 2-клей, 3-подложка фоточувствительного элемента, 4-клей, 5-фоточувствительный слой КРТ, 6-грибок, 7-проволочка Al, 8-контактная дорожка ФЧП, 9-защитное просветляющее покрытие, 10-шторка In

Улучшение обнаружительной способности имеет место когда $\tau_{эфф}$ растет быстрее увеличения расстояния между контактами

$$\tau_{эфф} = \tau_p \left[1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{L}{2L_p}\right)} \right],$$

где L_p - минимальная диффузионная длина, определяемая в КРТ n типа дырками.

Стабильность фоторезисторов из ОМ КРТ при длительном хранении (8-11 лет) обеспечивается:

- использованием монокристаллов КРТ, легированных индием;
- применением, в качестве стабилизирующего защитного покрытия, собственно анодного окисла;
- применением защитных и просветляющих покрытий фоточувствительного элемента.

Четвертая глава посвящена технологии формирования многоэлементных фоторезисторов на гетероэпитаксиальных слоях GaAs - CdZnTe - Cd_xHg_{1-x}Te (x=0,8→0,2) - Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te - Cd_xHg_{1-x}Te (x=0,2→0,4). Теоретически изучен фоторезистивный эффект в сложных гетероструктурах, в которых чувствительный слой Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te помещен между двумя варизонными слоями.

Преимущества использования гетероструктур КРТ с варизонными слоями состоят:

- в возможности увеличения вольтовой чувствительности в 2-3 раза за счет уменьшения толщины рабочего слоя КРТ постоянного состава до 4-5 мкм, и соответствующего увеличения темнового сопротивления R_T ;

- в увеличении напряжения смещения до насыщения вольтовой чувствительности без риска теплового пробоя, так как отсутствие клеевой прослойки и высокая теплопроводность подложки GaAs улучшают теплоотвод;

- снижении поверхностной рекомбинации за счет встроенного электрического поля варизонного слоя

$$E = 1/e * (dE_V/dX),$$

препятствующего диффузии неравновесных носителей к поверхности ФЧЭ.

Значение градиента варизонного слоя определяется из соотношения скорости диффузии носителей к поверхности фоторезистора и скорости дрейфа носителей в электрическом поле смещения

$$V_{диф} \ll V_{др}$$

$$V_{диф1} = D_p/\epsilon_1; V_{диф2} = D_p/\epsilon_2.$$

Здесь D_p - коэффициент диффузии дырок в варизонных нижнем и верхнем слоях, ϵ_1 , ϵ_2 - толщины варизонных слоев соответственно.

$$V_{др} = \frac{\mu_p}{e} \frac{dE_V}{dx}$$

Из первых трех формул следует

$$D_p/\epsilon_1 \ll \frac{\mu_p}{e} \frac{dE_V}{dx}$$

$$dE_V/dX \gg D_p e/\epsilon \mu_p.$$

При $D_F = 2 \text{ см}^2/\text{с}$; $v = 2 * 10^4 \text{ см}$; $\mu_p \cong 400 \text{ см}^2/\text{В} * \text{с}$ и $eD = \mu_p * kT = 32,5 \text{ мэВ/см}$, $dE_v/edX \gg 35 \text{ В/см}$, что легко достижимо в варизонных слоях. Следствием этого является практически полная реализация времени жизни неравновесных носителей в объеме полупроводников:

- наличие варизонного слоя соответствующего градиента состава в фоторезисторе исключает шунтирование рабочей области поверхностными слоями и устраняет вклад поверхностной рекомбинации в шумы вида $1/f$;

- варизонные слои фоторезистора приводят к расширению спектральной области фототовета и увеличению интегральной чувствительности фоторезистора.

Показано, что специально разработанные варизонные гетероэпитаксиальные структуры КРТ, полученные МЛЭ, позволили создать на их основе многоэлементные фоторезисторы и получить предельные ограниченные фоном параметры.

Теоретически исследованы спектральные характеристики фоторезистора из ГЭС КРТ с варизонными слоями в диффузионном приближении и определены условия расширения спектральной области фототовета и увеличения интегральной чувствительности фоторезистора за счет варизонных слоев.

Разработана технология и изготовлены линейчатые и билинейчатые фоторезисторные ФЧЭ на основе гетероэпитаксиальных структур КРТ с различной топологией фотоприемных элементов и размерностью 16×2 , 32×2 , 48×2 и 128×1 в конструктиве серийно выпускаемых ГУП "Альфа" фотоприемников и фотоприемных устройств "Невесомость-модуль", "Арча-О", "Струна" и др.

Испытания, проведенные в соответствии с методикой, принятой для серийных фотоприемников, показали полное соответствие параметрам, достигаемым на лучших фотоприемниках на объемном монокристаллическом КРТ. Испытания фотоприемного устройства "Арча-О" с фотоприемной линейкой на основе слоев ГЭС КРТ МЛЭ в составе макетного образца тепловизионного ночного визир-прицела серийного назначения показали полное соответствие техническим требованиям на данное изделие.

Использование гетероструктур, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией КРТ на подложках из GaAs, является основой для дальнейших практических разработок производства линейчатых, многолинейчатых фоторезисторов и фотодиодов для инфракрасных окон прозрачности атмосферы 3-5 и 8-14 мкм.

мени между опросами. Способность накопления приводит к чрезвычайно высокой вольт ваттной чувствительности в пределах относительно простой ячейки, достигающей 10^8 - 10^9 В/Вт при времени накопления 0,1-0,2 мс. Чем больше время накопления (для тепловизионного стандарта оно равно 40 мс), тем лучше основные характеристики МФП такие, как пороговая чувствительность, NETD. Высокая чувствительность на уровне ячейки позволяет использовать для считывания сигналов детектирования простые схемы мультиплексирования с относительно высоким уровнем шума, выполняемые по стандартной КМОП или ПЗС технологиям.

Для обработки сигналов от фотодиодной матрицы разработан охлаждаемый мультиплексор (сверхбольшая многофункциональная интегральная схема). Рассматривается ФПУ с матрицей 128×128 , предусматривающей предварительное усиление сигнала от фоточувствительных площадок, накопление, считывание с произвольной адресацией, вычитание фона и оцифровывание.

В матричных фотоприемных устройствах на КРТ хорошие результаты дает гибридная сборка-стыковка фоточувствительной матрицы фотодиодов с ячейками СБИС (мультиплексором) с помощью индиевых микростолбиков.

Принципиальная функциональная схема СБИС, отвечающая этим требованиям представлена на рис. 4. Схема состоит из следующих частей:

- Демультимплексор цифровой, переключающий по сигналу AD канал цифрового параллельного порта на счетчике регистр X или Y (DM 1:2-512.32)
- Счетчики-регистры X и Y с последовательным счетом по входам CX, EX и CY2, EY и C с параллельной нагрузкой 9-ти и 5-ти разрядного кода по сигналу L (CTX-32, CTY-512)
- Логическая схема последовательного соединения счетчиков X и Y по сигналу EX
- Дешифраторы X и Y (DC-32, DC-512)
- Матрица фоточувствительных ячеек (PDCM) 512x32
- Регистр ячеек сопряжения (RCPP)
- Мультиплексор аналоговый (M8:1)
- Усилитель выходной с двойной корректированной выборкой (A)
- Датчики температуры диодные (TS1 и TS2)

Схема формирует контрольные сигналы:

ВОИТ – сигнал частоты следования элементов изображения

PQU – сигнал строчной частоты

PQX – сигнал кадровой частоты

OUTA – выходной сигнал

OUTP – промежуточный выходной сигнал

OS1, OS2, OS3, OS4 выводы регулировки коэффициента усиления ($K = 8, 16, 32, 64$) замыканием с OUT A

RBS – вывод регулировки тока потребления усилителя и полосы пропускаемых частот подключением шунтирующего резистора.

Важная и быстро развивающаяся область ФПУ, связанная с передачей и обработкой информации, кратко рассмотрена в шестой главе. Прежде всего акцентируется внимание на особенностях фоторезисторов из КРТ - проблемы извлечения малого сигнала из низкоомного источника и создания малошумящего предусилителя. Рассматриваются вопросы, связанные с появлением приборных шумов и помех, устранение их экранированием электромагнитного поля, помех, вызываемых вибрациями приемника и предусилителя, нестабильностей источника питания. Рассмотрены особенности охлаждения фотоприемника и влиянием дроссельных и газовых микрокриогенных машин на шумы.

При обработке информации от низкоомных площадок ФЧЭ фоторезистора на КРТ необходим подбор малошумящих транзисторов с минимальной рассеиваемой мощностью.

Низкий уровень шума предусилителя $\sim (1-2) \cdot 10^{-9}$ В/Гц^{1/2} делает его чувствительным к внешним помехам. Снижение влияния внешних помех, а также помех по цепям питания, достигается использованием операционных усилителей и тщательным экранированием входных цепей.

Снижение вклада в шумы фоторезистора низкочастотных пульсаций температуры от электромагнитных полей и микрокриогенных машин, а также снижение влияния вибраций, создаваемых ГKM, достигается применением специального демпфера.

Седьмая глава содержит конструкционные и теплофизические разработки охлаждаемых вакуумных модулей фотоприемников. Одно из главных качеств разработанных и выпускаемых приборов - их высокая защищенность от механических перегрузок и вибраций, а также от воздействия климатических факторов: повышенной и пониженной температуры, термоциклов нагревания и охлаждения, высокой влажности и т.д., что обеспечено только путем создания базовой конструкции высокой надежности и глубокого интегрирования вакуумной конструкции и системы охлаждения.

В фотоприемниках, работающих короткое время (от 1 мкс до 8 ч), использована разомкнутая дроссельная система, где газ из миниатюрного газового баллона с давлением ~ 400 атм. дросселируется через джозу (отверстие) и охлаждается вследствие эффекта Джоуля-Томсона. Через несколько десятков секунд температура в районе джозы достигает 77 К; фотоприемник выходит на температурный режим через несколько секунд.

В тепловизионных приемниках, работающих длительное время, применена микрокриогенная газовая машина (ГКМ) - либо замкнутые дроссельные микрокриогенные системы. ГКМ, работающая по обратному термодинамическому циклу Стирлинга.

Разработаны принципы создания базовых конструкций глубокоохлаждаемых вакуумных модулей для тепловизионных ФП на КРТ, обеспечивающих серийный выпуск.

Обеспечено глубокое интегрирование фотоприемного модуля с микрокриогенными газовыми машинами и дроссельными системами охлаждения разомкнутого и замкнутого типа.

Достигнуто существенное снижение теплотристов за счет применения многослойной керамики, получаемой методом пленочной технологии.

Достигнута высокая надежность всех элементов вакуумной охлаждаемой конструкции модуля.

Заключение.

1. Анализ развития пороговых фотоприемников на КРТ диапазона 8-14 мкм для тепловидения показывает несколько основных тенденций. Главная тенденция заключается в формировании ряда унифицированных модулей фотоприемников для различных тепловизионных и инфракрасных систем преимущественно военного назначения.

Другой не менее важной тенденцией, является переход к ФЧЭ в виде многорядных линеек и матриц с повышением удельного веса системы обработки сигналов изображения непосредственно в холодной зоне фоточувствительного элемента с помощью многофункциональных СБИС-мультиплексоров. Решающее значение в создании подобных фотоприемников из КРТ приобретает технология получения гетерозпитаксиальных структур КРТ на инородных подложках методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Третья тенденция вызвана стремлением к снижению габаритов и веса фотоприемных устройств и обеспечению автономности работы тепловизионной аппаратуры пу-

тем гибридизации фотоприемника с наиболее экономичной микрокриогенной системой типа "Сплит-Стирлинг".

2. В диссертации исследованы и разработаны физико-технологические основы высоконадежных пороговых фотоприемников диапазона 8-14 мкм нового поколения на базе гетероэпитаксиальных структур КРТ, полученных методом МЛЭ. Исследованы и разработаны методы получения предельных значений обнаружительной способности (ограничение фоном), высокой, на порядок больше обычных значений, вольтовой чувствительности, широкой спектральной характеристики за счет применения сложных варизонных структур КРТ вида: GaAs - CdZnTe - Cd_xHg_{1-x}Te (x=0,8-0,2) - Cd_{0,2}Hg_{0,8}Te - Cd_xHg_{1-x}Te (x=0,2-0,4).

3. Впервые в нашей стране разработан и создан ряд унифицированных модулей фотоприемников на основе ГЭС КРТ, полученных методом МЛЭ, для различных тепловизионных систем.

4. Исследованы процессы синтеза из газовой фазы монокристаллов GaP и GaAs высокой чистоты и структурного совершенства для подложки. Изучена кинетика процесса газофазового синтеза, предложен механизм роста кристалла при синтезе из газовой фазы за счет бездиффузного встраивания в растущий кристалл комплексов вида Ga_nP_n.

5. Разработаны унифицированные серийно пригодные конструкции модулей фотоприемников высокой надежности для различных видов тепловизионной военной техники, в том числе гибридизированные с различными микрокриогенными системами. В целом диссертация является итогом многолетних исследований, разработок и освоения в серийном производстве нового класса пороговых охлаждаемых фотоприемников и фотоприемных устройств диапазона спектра 8-14 мкм на основе гетероэпитаксиальных структур КРТ, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, нашедших применение в различных тепловизионных системах военной техники и народного хозяйства.

В приложении содержится информация о серийно выпускаемых пороговых ФПУ на КРТ. Приводятся параметры ФПУ: линейчатых - 10×1, 16×2, 32×1, 64×1, 128×1; матричных - 32×32, 48×48, 128×128. Приводится также краткое описание тепловизионных приборов, в которых разработанные ФПУ нашли свое применение: визир-прицелы, тепловизоры, тепловизионная аппаратура для космической разведки и т.д. В конце приложения приведены акты внедрения и использования.

ФПУ "О" (Арча) (рис. 5)

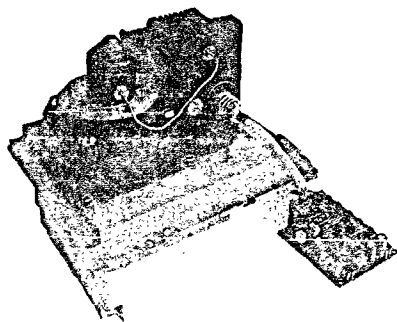


Рис. 5. ФПУ "О".

Состав

- Фотоприемник на основе КРТ (рис. 6)
- Предусилители
- Блоки питания
- Система охлаждения

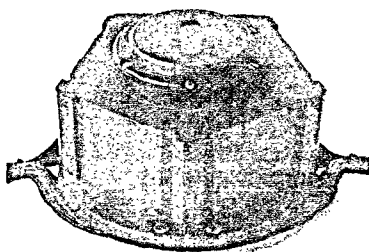


Рис. 6. ФП "О".

Область применения

Фотоприемное устройство предназначено для использования в системе управления, в т.ч. в ночное время, огнем для высокоэффективного наведения на цель и может быть установлено как на транспортном средстве, так и стационарно. Устройство можно эффективно использовать для формирования ИК изображения, проведения экологического контроля, температурного контроля на производстве и в медицинской диагностике.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Фотоприемник	
Количество элементов	128 (линейка)
Размер элемента, мкм	50x50
Зазор между элементами, мкм	50
Максимум спектральной чувствительности, мкм	12÷13
Поле зрения, °	минимум 45
Минимальная обнаружительная способность D^* (500К, 1200Гц, 1), см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	4x10 ¹⁰
Темновое сопротивление, Ом	20 ÷ 100
Средний ток смещения, мА	3
Входное окно	германий
Корпус	газонаполненный трехстенный блок с криогенным стеклянным сосудом Дьюара в защитном металлическом кожухе
Устройство охлаждения	
Тип	Сплит-Стирлинг
Рабочая температура ФЧЭ, К	77
Мощность охлаждающего устройства, Вт	2,0
Время, необходимое для охлаждения при температуре 25°С, мин	5
Потребляемая мощность, Вт	35 (стационарный режим), 100 (при выходе на режим)
Напряжение питания, В	27
Дозаправка МКС	не чаще 1 раза в год
Предусилитель	
Минимальная вольтовая чувствительность (500К, 1200Гц, 1), В/Вт	1,5·10 ⁷
Диапазон рабочих частот, Гц	4 ÷ 20000
Напряжение питания, В	-15, +15
Диапазон рабочих температур, °С	-50 ÷ +50

Типы выпускаемых пороговых фотоприемников на ГЭС КРТ диапазона

8-14 мкм

Наименование	Количество элементов
1. ФПУ "О" (Арча)	128
2. Фонетика-96	96 (48x2)
3. "Струна"	64 (32x2)
4. "Импульс" (ФПУ)	32 (16x2)
5. ФР-204М	32 (16x2)
6. АПРЛ-204	20 (10x2)
7. Невесомость 10М	10
8. Даль ИК-Э (МФПУ)	512x32
9. "Омега"	32 (16x2)

Публикации

1. Брагин Н.В., Северцев В.Н., Фурманов Г.П. Оптоэлектронные приборы. - М., изд. МиСиС, 2000 г., 600 с.
2. Северцев В.Н. Фотоприемники и фотоприемные устройства диапазона 8-14 мкм на материале кадмий-ртуть-теллур. - М., МЭИ, 1999г., 96 с., тираж 900 экз.
3. Северцев В.Н., Сусов Е.В. Сверхчувствительный сенсор на гетерозпитаксиальных варизонных слоях CdHgTe. - "Письма ЖЭТФ", 2000 г.
4. Северцев В.Н., Сусов Е.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Чеканова Г.В. 128-элементный охлаждаемый фотоприемник на основе гетерозпитаксиальных структур CdHgTe. - Автометрия, 1998 г., №4, с. 21-26.
5. Сусов Е.В., Сидоров Ю.Г., Северцев В.Н., Комов А.А., Чеканова Г.В. и др. Многоэлементный охлаждаемый фоторезистор на основе гетерозпитаксиальных структур HgCdTe. - Новосибирск, изд. СО РАН, 1996 г., №4, с. 40-44.
6. Северцев В.Н. и др. Устройство для удаления ионов загрязнения с поверхности полупроводниковых структур. - Авт. свид. №1623498, опублик. 22.09.1990 г.
7. Дементьев Ю.С., Северцев В.Н. и др. Способ выделения однородных по составу частей в полупроводниковых кристаллах. - Авт. свид. №1641039, опублик. 08.12.1990 г.
8. Журавлев Б.Б., Северцев В.Н., Салдадзе Г.К. Электродиализатор. - Авт. свид. №1436309, опублик. 08.07.1988 г.
9. Корольков В.П., Северцев В.Н., Антипов А.В. Тезисы доклада на специальную тему на XII отраслевом научно-техническом совещании 13-15 мая 1987 г.
10. Корольков В.П., Северцев В.Н., Хоббихожин Ш.А. Способ изготовления изолирующей структуры. - Авт. свид. №1353181, опублик. 15.07.1987 г.
11. Журавлев Б.Б., Северцев В.Н., Салдадзе Г.К. Электродиализатор фильтр-прессного типа. - Авт. свид. №1378890, опублик. 08.11.1987 г.
12. Титов В.К., Беликов В.Н., Возьмилов П.Н., Северцев В.Н. Способ изготовления вакуумплотного электрического ввода. - Авт. свид. №1422888, опублик. 08.05.1988 г.
13. Хряпов В.Т., Кульчицкий Н.А., Изергин А.А., Северцев В.Н. Авт. свид. №243618, опублик. 01.10.1986 г.
14. Корольков В.П., Северцев В.Н. - Журнал отрасли, 1985г., сер. 8, вып. 1
15. Лобанов А.А., Северцев В.Н., Шумилин В.П., Червяков А.И. Отчет инв. №4232, М., МИЭГ, 1983 г., 25 с.

16. Лобанов А.А., Северцев В.Н., Шумилин В.П., Червяков А.И. Специальная тема. - Отчет инв. №4110, М., МИЭТ, 1983 г., 32 с. (Рукопись).

17. Барышев А.В., Иванов В.И., Казуров Б.И., Лукичев А.В., Северцев В.Н. Авт. свид. №194776, опубл. 02.11.1983 г.

18. Дементьев Ю.С., Северцев В.Н. и др. Устройство для жидкофазной эпитаксии полупроводниковых структур. - Авт. свид. №1637383, опубл. 22.11.1990 г.

19. Акчуриин Р.Х., Северцев В.Н., Уфимцев В.Б., Федоренко В.Н. Устройство для жидкостной эпитаксии полупроводниковых структур. - Авт. свид. №822588, опубл. 11.09.1980 г.

20. Королева Г.Н., Хохлов А.И., Северцев В.Н., Маркин К.Г., Перевитина Л.В., Федоренко В.Н. - Авт. свид. №160587 опубл. 08.06.1981 г.

21. Барил М.А., Барышев А.В., Егорова М.Ф., Северцев В.Н., Иванов В.И. Устройство для осаждения слоев из газовой фазы. - Авт. свид. №940347, опубл. 23.02.1982г.

22. Вигдорович В.Н., Северцев В.Н., Селин А.А., Фурманов Г.П., Чирков О.Е., Шутов С.Г. Устройство для определения коэффициентов взаимной диффузии компонентов в расплавах. - Авт. свид. №957065, опубл. 07.05.1982 г.

23. Соколов А.М., Дементьев Ю.С., Северцев В.Н., Марков В.Г., Коровин Н.С., Бельский А.А. Устройство для очистки и выращивания монокристаллов полупроводниковых соединений. - Авт. свид. №1385653, опубл. 01.12.1987 г.

24. Хряпов В.Т., Невский О.Б., Попов С.А., Костромин А.А., Трошкин Ю.С., Северцев В.Н., Киселева Л.В. Авт. свид. №285173, опубл. 01.12.1988 г.

25. Балашов В.Н., Васичев Б.Н., Дементьев Ю.С., Плясунов В.А., Северцев В.Н., Хряпов В.Т. Способ легирования полупроводниковых материалов. - Авт. свид. №1498303, опубл. 01.04.1989 г.

26. Демченко П.В., Окороков В.В., Швець С.А., Сазонов Ю.П., Северцев В.Н. Способ контроля толщины материала. - Авт. свид. №1619015, опубл. 08.09.1990 г.

27. Блецкан Н.И., Северцев В.Н. и др. Разработка монокристаллов фосфида галлия диаметром до 65 мм с разбросом по диаметру ± 2 мм. - Отчет № Ф 03486, М., НИИМВ, 1976г., 151 с.

28. Дементьев Ю.С., Северцев В.Н. и др. Разработка поликристаллического фосфида галлия с пониженным содержанием кислорода, углерода, кремния. - Отчет № Ф 05224, М., НИИМВ, 1977г., 101 с.

29. Амосов В.И., Северцев В.Н. и др. Разработка высокоомных монокристаллов фосфида галлия с удельным сопротивлением 10^{11} - 10^{14} Ом см. - Отчет № Ф 03764, М., НИИМВ, 1977г., 116 с.

30. Дементьев Ю.С., Окунев Ю.А., Северцев В.Н. - Отчет НИИМВ №3337, 1977г., 108 с.

31. Дементьев Ю.С., Северцев В.Н. и др. Разработка высокоомных монокристаллов фосфида галлия с повышенной однородностью для ИК оптоэлектронных приборов и мишеней видиконов. - Отчет № Ф 0189, М., НИИМВ, 1978 г., 102 с.

32. Дементьев Ю.С., Окунев Ю.А., Северцев В.Н. Растворимость и коэффициенты распределения переходных металлов в фосфиде галлия. - Известия АН СССР, серия "Неорганические материалы", 1979г., т.15, №1, с. 168-172.

33. Уфимцев В.Б., Шумилин В.Б., Червяков А.И., Северцев В.Н. Термодинамический анализ фазовых равновесий в системе Ga-P-Zn-Se. - Тезисы докладов конференции "Термодинамика и п/п материаловедение", М., МИЭТ, 1979 г.

34. Дементьев Ю.С., Федоров В.А., Окунев Ю.А., Котова Ю.А., Северцев В.Н. Анализ распределения температуры в монокристаллах фосфида галлия, выращенных из расплава. - "Электронная техника", сер. 6, "Материалы", 1979 г., вып. 6, с. 64-67.

35. Блецкан Н.И., Степченко В.Н., Дементьев Ю.С., Астафурова Н.И., Федоренко В.Н., Северцев В.Н., Невский А.Б., Яковлев А.Т., Шаталин С.М. Способ получения монокристаллов кремния. - Авт. свид. №738230, опубл. 07.02.1980 г.

36. Окунев Ю.А., Дементьев Ю.С., Блецкан Н.И., Северцев В.Н., Паршутин Д.А. Устройство для выращивания кристаллов по методу Чохральского. - Авт. свид. №768051, опубл. 06.06.1980 г.

37. Иванов Г.А., Северцев В.Н. Электрические свойства GaP:Mn. - "Электронная техника", сер. 6, "Материалы", 1982 г., вып. 3, с. 36-37.

38. Косушкин В.Г., Северцев В.Н., Потепалов В.П., Лебедев В.В. Определение скорости роста кристаллов фосфида галлия в условиях метода "синтез-растворение-диффузия". - "Электронная техника", сер. 6, "Материалы", 1982 г., вып. 4, с. 33-34.

39. Блецкан Н.И., Дьяков Ю.Н., Иванов И.А., Ильин В.Ю., Папков В.С., Прилипко В.И., Северцев В.Н. Способ выращивания монокристаллов гадолиний галлиевого граната. - Авт. свид. №970901, опубл. 01.07.1982 г.

40. Березин Ю.М., Горюнов Е.Н., Заборня А.В., Иванов В.И., Коробов И.В., Морозов А.Е., Мухин Б.С., Северцев В.Н. Цифровой измеритель температуры. - Авт. свид. №1044146, опубл. 23.05.1983 г.

41. Лобанов А.А., Северцев В.Н. Газофазный синтез фосфида галлия. - Известия ВУЗов сер. "Химия и химическая технология", 1983 г., т. 26, вып. 8, с. 899-902.
42. Лобанов А.А., Северцев В.Н. Программирование условий роста монокристаллов фосфида галлия, легированных. - "Электронная техника", сер. 6, "Материалы", 1983 г., вып. 5, с. 65-66.
43. Воробьев В.Л., Макаров В.В., Невский О.Б., Северцев В.Н. Способ получения эпитаксиальных структур на основе фосфида галлия. - Авт. свид. №1075763, опубл. 22.10.1983 г.
44. Каминский В.В., Демсгтьев Ю.С., Северцев В.Н., Томсон А.С. и др. Разработка и исследование методов синтеза арсенида и фосфида галлия из газовой фазы. - Отчет инв. №982/сп., НПО "Орион", 1984 г., 174 с.
45. Ровенский Л.З., Рогачев Б.В., Ермашов С.К., Дмитриев Е.В., Северцев В.Н. Тепловой расходомер. - Авт. свид. №1108331, опубл. 15.04.1984 г.
46. Блецкан Н.И., Бузылин А.Н., Дементьев Ю.С., Степченков В.Н., Северцев В.Н., Широков Ю.В. Способ получения монокристаллов кремния ориентации (III). - Авт. свид. №1125999, опубл. 23.07.1984 г.
47. Акчурун Р.Х., Зиновьев В.Г., Уфимцев В.Б., Северцев В.Н., Широков Ю.В. Устройство для жидкостной эпитаксии. - Авт. свид. №1165097, опубл. 01.03.1985 г.
48. Лобанов А.А., Северцев В.Н., Шумилов В.П. Термодинамический анализ системы Ga-PCl₃-PH₃-H₂. - "Электронная техника", сер. 6, "Материалы", 1987 г., вып. 2, с. 74-76.
49. Соколов А.М., Дементьев Ю.С., Северцев В.Н., Коровин Н.С., Марков В.Г. Тигель для вытягивания кристаллов антимонида индия. - Авт. свид. №1407120, опубликовано 01.03.1988 г.
50. Соколов А.М., Дементьев Ю.С., Северцев В.Н., Коровин Н.С., Марков В.Г., Ежов В.П. Способ получения кристаллов антимонида индия. - Авт. свид. №1412380, опубл. 22.03.1988 г.
51. Дементьев Ю.С., Северцев В.Н. и др. Способ получения монокристаллов антимонида индия n-типа проводимости. - Авт. свид. №1587960, опубл. 22.04.1989 г.
52. Северцев В.Н., Марченков С.В., Соколов А.М., Стабян И.П., Хайрулин Р.З., Демидов Ю.М. Пассивация поверхности полупроводниковых приборов на основе A^{III}B^V (на примере антимонида индия) и возможные математические методы анализа параметров. - НТЦ "Информтехника", обзор № 5206, 1991 г., 76 с.

53. Холоднов В.А., Северцев В.Н., Другова А.А. Аномально высокая собственная фотопроводимость полупроводников при примесной и межзонной рекомбинации неравновесных носителей в условиях слабого оптического излучения. - 3-я Всерос. конф. "Полупроводники-97", Москва, 1997 г., сборник тезисов, с. 224.

54. Северцев В.Н., Сусов Е.В., Северцев А.В., Володин Е.Б. Исследования и разработка экспериментального образца матричного фотоприемного устройства для электроно-оптической системы дистанционного зондирования Земли в диапазоне спектра 8-14 мкм. - ГУП "Альфа", научно-тех. отчет №1-ОКБ-98, 1998 г., 37 с.

55. Северцев В.Н., Сусов Е.В., Долганин Ю.Н., Володин Е.Б. Отработка принципов создания экспериментального образца фоточувствительного элемента и сверхбольшой интегральной схемы матричного ФПУ. - ГУП "Альфа", научно-тех. отчет №1-ОКБ-99, 1999 г., 105 с.

56. Северцев В.Н., Сусов Е.В., Чеканова Г.В., Комов А.А., Дьяконов Л.И., Северцев А.В. Разработка базовой технологии изготовления линейчатых и квазиматричных фоточувствительных элементов на базе монокристаллов и эпитаксиальных слоев КРТ, полученных методами жидкофазовой эпитаксии и молекулярно-лучевой эпитаксии для тепловизионных систем. - ГУП "Альфа", научно-тех. отчет №3-ОКБ-99, 1999 г., 91 с.

57. Северцев В.Н., Сусов Е.В., Белозеров А.Ф., Филиппов В.Л. Аппаратура тепловизионного контроля, в том числе с самолета, газо- и нефтепроводов и состояния экосистем в зоне разработки месторождений. - 4-ый Международный семинар "Российские технологии для индустрии" "Физические, Химические и Биологические сенсоры", сборник тезисов, 2000 г.

58. Северцев В.Н., Сусов Е.В., Афанасов Ю.А., Пронин Ю.С. Исследование природных ресурсов с помощью самолетной оптико-электронной аппаратуры диапазона 8-14 мкм. - 4-ый Международный семинар "Российские технологии для индустрии" "Физические, Химические и Биологические сенсоры", сборник тезисов, 2000 г.

59. Северцев В.Н., Сусов Е.В. Фотоприемник спектрального диапазона 8-14 мкм для аэрогеологической разведки. - 4-ый Международный семинар "Российские технологии для индустрии" "Физические, Химические и Биологические сенсоры", сборник тезисов, 2000 г.

60. Северцев В.Н., Сусов Е.В., Афанасов Ю.А., Пронин Ю.С. Использование сенсоров для аэрокосмических съемок в ИК диапазоне 3-14 мкм и решения задач в области геологии и экологии. - 4-ый Международный семинар "Российские технологии

для индустрии" "Физические, Химические и Биологические сенсоры", сборник тезисов, 2000 г.

61. Артамонов В.В., Северцев В.Н., Сусов Е.В, Чеканова Г.В. Фотоприемное устройство из материала кадмий-ртуть-теллур с газовой криогенной машиной для медицинских тепловизоров диапазона 8-14 мкм. - 4-ый Международный семинар "Российские технологии для индустрии" "Физические, Химические и Биологические сенсоры", сборник тезисов, 2000 г.