

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Теллурид кадмия – ртути и новое поколение приборов инфракрасной фотоэлектроники

В.П. Пономаренко

Описаны основные результаты и этапы создания в 1969–2002 гг. полупроводниковых твердых растворов теллуридов кадмия – ртути (монокристаллов и эпитаксиальных слоев), а также фотоприемников инфракрасного диапазона на их основе (фоторезисторов и фотодиодов, в том числе матричных).

PACS numbers: 01.65. + g, 07.57.Kp, 85.60.Gz

Содержание

1. Введение (649).
 2. Разработка монокристаллов и эпитаксиальных слоев. Первые поколения фотоприемников (650).
 3. Жидкофазная эпитаксия КРТ. Матричные фотодиоды (657).
 4. Гибридные линейчатые приемники. Приборы на основе МДП- и МТДП-структур (663).
 5. Заключение (664).
- Список литературы (664).

1. Введение

Анализ приоритетов, которые отдаются в фотоэлектронике тем или иным фоточувствительным материалам при создании приборов для регистрации инфракрасного излучения, показывает, что на протяжении двух последних десятилетий твердые растворы теллуридов кадмия – ртути $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) устойчиво занимают здесь лидирующее положение. Особенно это относится к тепловидению в спектральной области 8–14 мкм.

В развитии оптоэлектроники на основе приемников из КРТ можно выделить два основных периода:

1970–1990 гг. Постепенное развитие технологии материала и приемников (фоторезисторов и фотодиодов) привело к созданию семейства базовых унифицированных фотоприемных устройств с числом элементов 10, 20, 60, 120 и 180 (за рубежом их принято называть системой общих модулей). В этот же период Эллиоттом (С.Т. Elliott) был разработан приемник с внутренним накоплением сигнала (ВНС) в элементе (см. раздел 2).

В.П. Пономаренко. Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП "НПО "ОРИОН",
111123 Москва, шоссе Энтузиастов 46/2, Российская Федерация
Тел. (095) 176-22-11
Факс (095) 368-80-80
E-mail: root@orion.extech.msk.su

Статья поступила 4 декабря 2002 г.

На основе этих фотоприемников, начиная с 80-х годов, было создано и принято в эксплуатацию подавляющее большинство различной оптико-электронной аппаратуры для работы в "окне" прозрачности земной атмосферы 8–14 мкм. В условиях массового производства цена приемников снизилась более чем на порядок.

1990–2002 гг. На рубеже этого периода произошло заметное изменение приоритетов в области создания тепловизионной техники. В США, Англии, Франции, Германии были завершены поисковые работы по созданию принципиально нового типа фотоприемных устройств из КРТ для тепловизоров нового поколения. В их основу были положены многорядные фотоприемники (субматрицы) на основе фотодиодов формата $4 \times N$, $6 \times N$ и другие, интегрированные с охлаждаемой микроэлектроникой непосредственно в зоне расположения чувствительных элементов. Их применение в аппаратуре с оптико-механическим сканированием позволило не только увеличить число фоточувствительных элементов в 4–10 раз при сравнительно малогабаритной конструкции приемника, но и реализовать режим временной задержки и накопления (ВЗН), что привело к возрастанию обнаружительной способности прибора сразу в 1,5–2 раза. Одновременно было начато промышленное производство "смотрящих" матриц формата 128×128 , 256×256 , 384×288 и более для тепловизоров без механического сканирования изображения. Аналогичные фотоприемные устройства были разработаны и в России.

Сейчас такие "смотрящие" и ВЗН-матрицы из КРТ принято называть новым поколением приборов фотоэлектроники для тепловидения, теплопеленгации, лазерной локации и связи в ИК-области спектра.

В 2000 г. исполнилось 40 лет с начала первых исследований по КРТ в Советском Союзе и более 30 лет с начала работ по КРТ и приборам на его основе в НИИ прикладной физики (НИИПФ, г. Москва). В 1986 г. в сборнике *Физика соединений $A^{II}B^{VI}$* был опубликован обзор основных свойств теллуридов кадмия – ртути [1]. В печати были опубликованы работы члена-корреспондента РАН Л.Н. Курбатова по проблеме КРТ [2, 3]. В

2000 г. увидела свет монография профессора Н.С. Барышева, содержащая обширный обзор свойств и применений узкозонных полупроводников [4].

В настоящей статье более подробно описаны основные этапы работ по КРТ, проведенных в организациях оборонной промышленности, цветной металлургии и Российской академии наук.

2. Разработка монокристаллов и эпитаксиальных слоев. Первые поколения фотоприемников

Исследования узкозонных твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ были начаты в НИИПФ во второй половине 60-х годов. Из активно изучаемых тогда полупроводниковых соединений самыми "узкозонными" считались антимонид индия ($E_g \cong 0,23$ эВ, $T = 77$ К), селенид свинца ($E_g \cong 0,29$ эВ, $T = 300$ К) и арсенид индия ($E_g \cong 0,41$ эВ, $T = 77$ К). В этот период проводились интенсивные исследования соединений элементов III и V групп Периодической системы, к которым прежде всего относят работы А.Р. Регеля и Н.А. Горюновой (СССР), а также Г. Велькера (Н. Welker, Германия) по антимониду индия. В 1952 г. Велькер показал, что соединения $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ имеют исключительно интересные свойства, что все они являются полупроводниками и что они тесно связаны с полупроводниковыми элементами IV группы Периодической системы. Все они обладают фоточувствительностью при температуре жидкого азота в интервале длин волн 3–5 мкм. В последующие годы исследования соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ успешно развивались в Ленинградском физико-техническом институте, а также в других организациях.

В узкозонных полупроводниках из-за близости зон имеет место сильная непараболичность энергетического спектра носителей. В 1957 г. была развита теория Кейна [5], позволившая дать полуколичественное описание зонной структуры ряда полупроводников с использованием модели kp -возмущений и сформулировать закон дисперсии носителей заряда. Это позволило удовлетворительно объяснить целый ряд явлений переноса в антимониде индия и других соединениях $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ со сравнительно узкой запрещенной зоной.

В конце 50-х годов началось всестороннее изучение соединений $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$. Изучались твердые растворы $\text{CdS}-\text{CdSe}$, $\text{ZnTe}-\text{CdTe}$, $\text{HgS}-\text{HgSe}-\text{HgTe}$ и другие.

Наконец, в 1959 г. в Англии Лоусоном (W.D. Lawson, Royal Radar Establishment) [6], а в СССР в 1960 г. А.Д. Шнейдером [7] из Львовского педагогического института были опубликованы две первые работы, посвященные исследованию системы $\text{CdTe}-\text{HgTe}$. Хотя теллурид кадмия и теллурид ртути к этому времени уже были известны, причем HgTe считался полупроводником с очень узкой запрещенной зоной ($\sim 0,02$ эВ при $T = 4,2$ К), появление твердых растворов в этой системе не являлось очевидным. Из результатов названных работ следовало, что оба соединения обладают бесконечной растворимостью по отношению друг к другу и образуют непрерывный ряд твердых растворов с плавно меняющейся шириной запрещенной зоны. В обеих работах уже тогда была подчеркнута потенциальная перспективность применения CdHgTe для детектирования ИК-излучения в широких пределах. Действительно, меняя состав x твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в пределах 0,2–0,5, можно

было получить материал, пригодный для детектирования ИК-излучения во всех трех "окнах" прозрачности земной атмосферы — 1,5–2,5; 3–5 и 8–14 мкм. Сейчас даты опубликования этих работ принято считать "днями рождения" одного из самых важных полупроводниковых материалов, появление которого привело к подлинной революции в фото- и оптоэлектронике.

Исследования были активно продолжены в Англии, а особенно во Франции и США. Опыт войны во Вьетнаме убедил военно-политическое руководство этих стран в необходимости развития работ по тепловидению и, прежде всего, в так называемой "дальней" области ИК-спектра (8–14 мкм), где лежит максимум спектральной излучательной способности замаскированной техники, военных объектов, живой силы противника и других.

В конце 60-х годов за рубежом были получены слитки КРТ, пригодные для изготовления фотоприемников. К этому времени уже имелись сведения о создании многоэлементных фоторезисторов в США (фирма Honeywell) и Англии (фирма Mullard). Во Франции приоритет был отдан фотодиодам. Здесь к 1967 г. К. Верье (С. Verie) [8] были получены фотодиоды из КРТ с обнаружительной способностью $D_{\lambda\text{max}}^* = (1-5) \times 10^9$ см $\text{Гц}^{1/2}$ Вт^{-1} .

Пионерами в области работ по КРТ во Франции следует считать М. Родо (М. Raudot) из Национального центра научных исследований (CNRS) и его супругу, г-жу Г. Родо. Монография М. Родо была опубликована в 1965 г. в Париже, переведена и опубликована в СССР в 1971 г. [9]. Там были описаны отдельные свойства КРТ и содержались некоторые сведения, скорее предостережения, о сложности и деликатности процессов изготовления КРТ. Сюда же относились требования по низкому содержанию посторонних примесей в исходных Cd , Hg и Te .

Первая работа по технологии КРТ, активно поддерживаемая руководством института (Ю.Н. Соловьевым, Л.Н. Курбатовым), была начата в НИИ прикладной физики в январе 1969 г. (тема "Мода", научный руководитель Л.А. Бовина). Работа была поручена лаборатории Ф.Ф. Харахорина в отделе, которым на момент постановки темы руководил Е.В. Сусов. Через короткое время отдел возглавил профессор В.И. Стафеев, группа Л.А. Бовиной была преобразована в лабораторию, а разработка приемников из КРТ велась в группе Г.Э. Поповяна, где вскоре начались и работы по приемникам из выращенного там материала.

К началу работ по КРТ в НИИ прикладной физики о технологии и свойствах материала было известно довольно мало, не говоря уже о какой-либо целостной картине физических явлений в структурах и приборах на его основе. Не была точно установлена даже фазовая диаграмма состояний системы $\text{Cd}-\text{Hg}-\text{Te}$. Однако уже были известны некоторые "неприятные" особенности технологии выращивания КРТ:

— кадмий, ртуть и теллур имеют довольно высокие упругости пара над расплавом, что может вызывать значительные отклонения от стехиометрии; при расчете равновесия в системе твердое тело – жидкость – пар, позволяющего получить близкий к стехиометрическому составу материал, необходимо учитывать давление не только ртути, но и кадмия, что сделать крайне сложно;

— большое различие удельной плотности компонентов в системе $\text{Cd}-\text{Hg}-\text{Te}$ должно приводить к гравитационной сегрегации теллурида ртути относительно тел-

лурида кадмия и, следовательно, к высокой неоднородности слитка по составу.

Работа по теме "Мода" была начата с конструирования и изготовления оборудования для выращивания монокристаллов. За основу был принят метод Бриджмена, ранее успешно использовавшийся при изготовлении других полупроводников. При этом было ясно, что для получения сравнительно узкого диапазона составов $x = 0,18 - 0,21$, необходимого для приемников на область спектра 8–14 мкм, требуется иметь температуру в зоне расплава порядка 800 °С; температура "холодной" точки, определяющей равновесное давление паров ртути в системе, составляет примерно 600 °С (само давление при этой температуре более 12 атм). Отклонение режима роста в этих условиях всего на 1 °С приводило к колебаниям давления на 0,2 атм, что уже вызывало заметное изменение состава. Все эти режимы необходимо было реализовать в кварцевых ампулах в условиях высокой чистоты. Это делало процесс не только чрезвычайно тонким, но и в известной степени опасным из-за возможности взрыва ампул со ртутью. Такого оборудования в СССР не было, и первые ростовые установки были сконструированы и изготовлены в НИИ прикладной физики собственными силами (рис. 1).

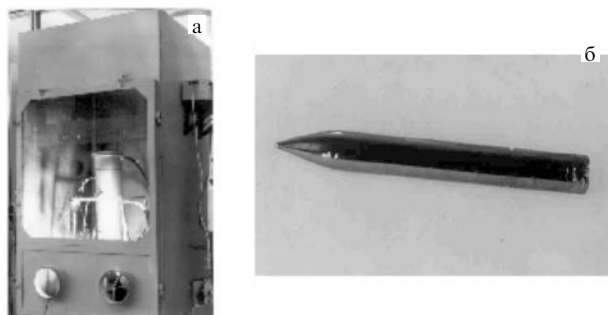


Рис. 1. (а) Установка для выращивания КРТ методом Бриджмена, изготовленная в НИИПФ в 1969 г. (б) Один из первых монокристаллических слитков КРТ, выращенных в НИИПФ в 1969 г. (Л.А. Бовина, В.П. Мещерякова, Т.П. Богданова, Л.В. Степанюк, Е.А. Сычевская, В.Ф. Соколов и др.).

Уже в конце 1969 г. были синтезированы первые слитки монокристаллического материала, из которых удавалось выделить небольшие пластинки нужного состава. Однако даже в пределах этих "кусочков" могли встречаться неоднородности, приводящие к колебаниям максимума фоточувствительности в интервале до нескольких микрон. Тем не менее первый шаг был сделан. Группой под руководством Г.Э. Поповяна были изготовлены первые одноэлементные фоторезисторы на длину волны 10,6 мкм с размером фоточувствительной площадки $1 \times 1 \text{ мм}^2$, с $D_{\lambda, \text{max}}^* = 10^8 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ (тема "Азот"). Технология их изготовления напоминала технологию, применявшуюся тогда при разработках приемников из антимонида индия с "высоким" контактом (рис. 2). Эти приборы сразу начали поставляться в различные организации и широко использовались в оптико-электронном приборостроении для регистрации излучения с длиной волны вблизи 10 мкм.

В СССР далеко не сразу была оценена перспективность работ по КРТ. В тепловидении и тепловизионной съемке работы по созданию различной оптико-электрон-

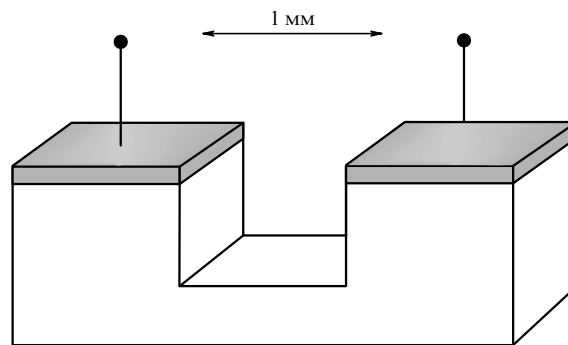


Рис. 2. Структура одноплощадочного фоторезистора из КРТ "Азот" с высоким контактом (НИИПФ, 1970 г.).

ной аппаратуры для ближней и средней ИК-областей спектра с использованием PbS, PbSe, InSb и других материалов. В спектральной области 8–14 мкм в основном главенствовали германий, легированный ртутью, и кремний, легированный бором, галлием, мышьяком. О фотоприемниках, пороговая чувствительность которых соответствует теоретическому пределу, говорят, что они работают в режиме ограничения флуктуациями числа фотонов фона (режим ОФ). При таком режиме, который в английской терминологии называют BLIP-режимом (Background Limited Infrared Photodetector), лишь случайный характер процессов испускания фотонов ограничивает ту минимальную мощность, которая может быть обнаружена данным приемником. Хотя приемники из Ge:Hg могут работать при температуре жидкого азота, имея при этом длинноволновую границу чувствительности $\sim 9,6 \text{ мкм}$, максимальная температура, при которой для них может быть реализован BLIP-режим, составляет 35 К. Для приемников из примесного кремния эта температура составляет 20–30 К. Поэтому фотоприемники на основе примесной фотопроводимости, с достаточно громоздкими и энергоемкими системами глубокого охлаждения могли размещаться только на тяжелых носителях в авиации и флоте. Кроме того, 60-е годы в СССР были периодом бурного развития СВЧ-техники и считалось, что большинство задач может быть решено методами радиолокации, а тепловидению отводилась вспомогательная роль.

Уже в конце 60-х годов в НИИ прикладной физики начал складываться творческий коллектив талантливых физиков и технологов, внесших неоценимый вклад в становление этого нового для физики полупроводников направления — узкозонных твердых растворов (Л.А. Бовина, Г.Э. Поповян, В.П. Мещерякова, Е.А. Сычевская, Т.П. Богданова, Л.В. Степанюк, В.Ф. Соколов, В.С. Макаревский, Е.С. Банин, В.Г. Григорьев, В.Е. Ложников, К.М. Куликов, Н.Х. Секамова и многие другие).

В 1970 г. в связи с работами по мощным газодинамическим CO₂-лазерам на твердом топливе остро встала проблема создания широкополосных фотоприемников на длину волны 10,6 мкм для оптической локации быстро движущихся объектов. Задача по их созданию была инициирована Московским КБ "Стрела" (академик Б.В. Бункин). При этом приемники должны были регистрировать мощность отраженного от цели лазерного излучения на уровне $10^{-18} - 10^{-19} \text{ Вт Гц}^{-1}$ на частотах 0,5–1,0 ГГц. Несколько позднее по инициативе НИИ

космического приборостроения была поставлена задача разработки приемников для лазерной передачи информации с дальних космических объектов в полосе частот до 600 МГц и примерно такими же требованиями по пороговой мощности.

Фоторезисторы из КРТ п-типа, разработка которых к тому времени уже велась в НИИ прикладной физики, для этих целей были непригодны. Их быстродействие в основном лимитируется наибольшим временем жизни фотовозбужденных неравновесных носителей заряда или временем жизни носителей в режиме вытягивания. Напротив, в фотодиодах с р-п-переходом критическими параметрами, определяющими быстродействие, в основном являются время диффузии или дрейфа τ_d фотоносителей от места их генерации до р-п-перехода, время пролета τ_t через слой объемного заряда и постоянная времени заряда емкости р-п-перехода τ_{RC} . Часть этих параметров можно регулировать технологическими процессами изготовления и геометрией фотодиодов. В узкозонных твердых растворах КРТ с малой диэлектрической проницаемостью $\epsilon \cong 12$ и высокой подвижностью электронов $\mu_n > 10^5 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ вполне можно было надеяться на получение приемников с быстродействием в сотни МГц и выше.

В течение 1972–1976 гг. в НИИ прикладной физики были поставлены первые научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию быстродействующих фотодиодов для приема излучения CO_2 -лазера (НИР "Днепр-1", "Днепр-2", "Днепр", "Спартак-1", "Семафор", ОКР "Дунай" — научный руководитель В.И. Стафеев). Работы начали быстро продвигаться. В исследования постепенно включались специалисты из различных научно-исследовательских организаций Советского Союза (Государственный институт редких металлов (ГИРЕДМЕТ) — Э.П. Бочкарев, А.В. Елютин, М.Г. Мильвидский, Е.А. Рашевская, О.В. Пелевин; Государственный институт прикладной оптики (ГИПО) — А.П. Черкасов, Н.С. Барышев, И.С. Аверьянов; Физико-технический институт (ФТИ) им. А.Ф. Иоффе — В.И. Иванов-Омский, В.К. Огородников, К.П. Смекалова; Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) — А.П. Шотов, Е.А. Калужная; Львовский государственный университет — В.Г. Савицкий, М.В. Пашковский; Институт полупроводников АН УССР (ИПАН) — Е.А. Сальков; Московский государственный университет (МГУ) им. М.В. Ломоносова — Н.Б. Брандт, Я.Г. Пономарев; Томский государственный университет — А.В. Войцеховский и многие другие).

Уже в начале 70-х годов были созданы первые одноэлементные и четырехэлементные отечественные фотодиоды из КРТ на основе материала, выращенного в НИИ прикладной физики. Возможности технологии позволяли тогда получать приемники с размерами стороны чувствительной площадки только 200–400 мкм (рис. 3). Для их исследования были разработаны специальные методики с использованием оптического гетеродинамирования в ИК-области спектра (К.М. Куликов, В.Е. Ложников). Этот метод, применяющийся для извлечения полезного сигнала и подавления помех в радарных системах, имел ряд преимуществ по сравнению с прямым фотоприемом: высокая чувствительность, хорошая частотная избирательность, сильно выраженная пространственная направленность, возможность измерения

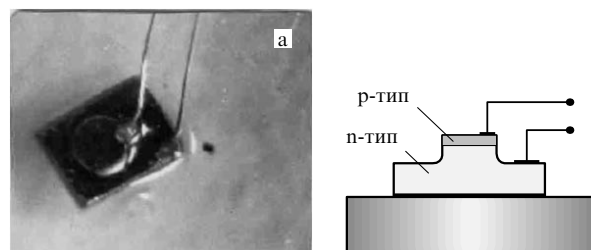


Рис. 3. Одноэлементный широкополосный фотодиод "Дунай" (НИИПФ, 1976 г.), размер фоточувствительного элемента $350 \times 350 \text{ мкм}$ (а) и мезаструктура одноэлементного фотодиода "Днепр-1" (НИИПФ, 1972 г.), размер фоточувствительного элемента $300 \times 300 \text{ мкм}$ (б).

скорости по доплеровскому сдвигу частот, что было крайне важно для заданной области применений таких приемников. Измеренный гетеродинный порог на полученных фотодиодах составил $6 \times 10^{-20} \text{ Вт Гц}^{-1}$ в полосе до 1 ГГц и $4 \times 10^{-20} \text{ Вт Гц}^{-1}$ в полосе до 600 МГц. Для этих исследований в Ленинградском политехническом институте был разработан уникальный электрооптический модулятор на горячих электронах с инерционностью порядка 10^{-10} с (Л.Е. Воробьев). Предел, определяемый квантовыми шумами "идеального" фотодиода для длины волны 10,6 мкм, примерно равен $2 \times 10^{-20} \text{ Вт Гц}^{-1}$. Таким образом, разработанные приемники фактически реализовывали режим регистрации единичных фотонов ИК-излучения.

Одновременно шла напряженная работа над материалом. Был проведен широкий комплекс исследований природы внутренних дефектов, гальваномагнитных и фотоэлектрических явлений, структурного совершенства, кинетики диффузии и других эффектов. Многие из результатов этих исследований носили пионерский характер. Например, зависимости коэффициентов диффузии атомов Hg, Cd и других элементов от температуры и характеристик кристаллов были получены впервые в мире [10–12]. Были разработаны основы методов получения р-п-переходов, среди которых наибольшее распространение получили два: метод изменения стехиометрии при диффузии атомов ртути и кадмия из паровой фазы и метод диффузии индия из раствора ртути и индия [13]. Было сконструировано оборудование и разработан метод выращивания эпитаксиальных слоев КРТ переменного состава путем испарения источника из HgTe с дальнейшим переносом паров на подложку из CdTe и взаимной диффузией этих соединений [14, 15]. Результаты этих работ, положивших начало исследованиям физико-химических свойств КРТ, в дальнейшем были использованы при разработке промышленной технологии монокристаллов КРТ в ГИРЕДМЕТе и на заводе чистых металлов (ЗЧМ, г. Светловодск, Украина).

Уже к 1970 г., в связи со стремительно нарастающим потоком работ по приемникам из КРТ, стало ясно, что усилий одного НИИ прикладной физики по выращиванию кристаллов и эпитаксиальных пленок материала явно недостаточно. Необходимо было разработать промышленную технологию и организовать серийный выпуск КРТ. Первая попытка поручить выращивание монокристаллов Усть-Каменогорскому полиметаллическому комбинату, предпринятая в 1970–1972 гг., закончилась неудачей. Там не имели опыта работы со сверхчи-

стыми, тем более ртутьсодержащими, материалами. В марте 1973 г., после совещания министров оборонной промышленности и цветной металлургии С.А. Зверева и П.Ф. Ломако, решение проблемы разработки серийной технологии и выпуск КРТ было поручено ГИРЕДМЕТу и ЗЧМ. Научное руководство этими работами было возложено на НИИ прикладной физики, где были поставлены темы "Памир" и "Нурек" (разработка технологии и организация выпуска опытных партий монокристаллов и эпитаксиальных слоев КРТ, научный руководитель В.И. Стафеев). За основу разработки серийно пригодной технологии были приняты результаты, полученные в НИИ прикладной физики, ГИПО, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Львовском государственном университете. С 1974 г. ГИРЕДМЕТом и НИИ прикладной физики началось внедрение технологии на ЗЧМ, которое, тем не менее, потребовало 5–7 лет, прежде чем завод смог выпускать достаточное количество материала, пригодного для разработки и изготовления фоторезисторов с числом элементов 10–130 (материал n-типа с концентрацией основных носителей заряда $n = (2-5) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$).

Технология получения КРТ носила сложный многоступенчатый характер и включала тонкую очистку исходных Cd, Hg и Te, синтез бинарных соединений HgTe и CdTe, получение поликристаллов CdHgTe с дальнейшей твердотельной рекристаллизацией слитков при температуре $750 \pm 1^\circ \text{C}$ для выращивания монокристаллов нужного состава. Кроме твердотельной рекристаллизации, было разработано еще два способа выращивания, давших положительный результат: метод направленной кристаллизации в зоне с температурным градиентом и модифицированный метод Бриджмена, при котором рост кристаллов осуществлялся при пониженных температурах из двухфазной смеси (расплав + твердая фаза) с непрерывной подпиткой расплава твердой фазой с повышенным содержанием теллурида кадмия. Синтез слитков, когда ампула в ростовой установке перемещается со скоростью 0,1–1 мм ч⁻¹, длится от нескольких недель до нескольких месяцев. Уникальное оборудование для выращивания КРТ было разработано конструкторами ГИРЕДМЕТА и изготовлено на опытном производстве. Обычно сразу после синтеза монокристаллы содержали большое количество структурных дефектов, связанных как с простыми вакансиями ртути с малой энергией ионизации, так и со сложными вакансиями, сопровождающимися смещением соседних атомов теллура. Это кардинально отличает КРТ от большинства полупроводников — здесь электрически активными являются не только примесные атомы, но и собственные точечные дефекты кристаллической решетки. Поэтому для получения низкой концентрации электронов в n-КРТ необходимо подвергать образцы материала длительному высокотемпературному отжигу в насыщенных парах ртути или ртути с кадмием при точном поддержании режимов в течение нескольких сотен часов. Все это делало материал чрезвычайно дорогим и заставляло искать альтернативные твердые растворы (например Pb–Sn–Te, Pb–Sn–Se и другие). Тем не менее уже к середине 80-х годов КРТ прочно утвердился в мире как основной материал ИК-фотоэлектроники, оставив позади по объему продаж все другие полупроводниковые фоточувствительные материалы. Большой вклад в освоение технологии КРТ на ЗЧМ внесли не только ГИРЕДМЕТ и НИИ прикладной

физики, но и самоотверженная работа коллектива завода (А.М. Тузовский, Ю.Н. Гаврилюк, В.К. Ергаков, К.Р. Курбанов, А.М. Раскевич). В итоге к середине 80-х годов задача промышленного выпуска объемных монокристаллов n-типа проводимости в СССР была успешно решена.

Несмотря на крупные успехи в разработке серийной технологии материала для фоторезисторов, проблема выпуска КРТ, пригодного для многоэлементных фотодиодов, по-прежнему стояла достаточно остро. В первые годы разработки считалось, что технология монокристаллов p-типа много проще, чем n-типа, используемых для фоторезисторов, так как в материале для фотодиодов концентрация носителей должна быть значительно выше ($10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Однако исследования показали, что технология фотодиодного материала на самом деле значительно сложнее, так как требования к структурному совершенству здесь намного выше. Физико-химические особенности системы Cd–Hg–Te, напротив, мало способствовали получению кристаллически совершенного материала, так как система склонна к концентрационному переохлаждению, а область гомогенности твердого раствора сильно смещена в область теллура, что приводило к появлению разного рода включений, малоугловых границ и других дефектов (рис. 4).

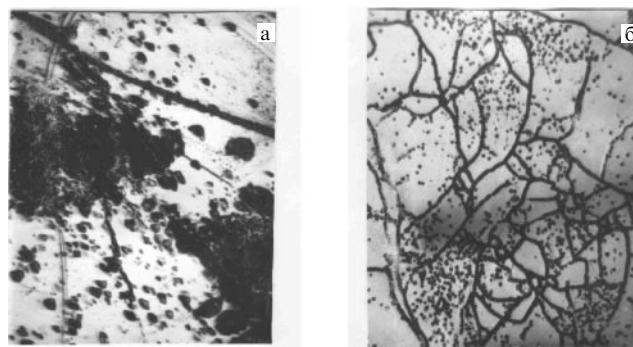


Рис. 4. Структурные несовершенства в КРТ: (а) включение второй фазы, обогащенной теллуrom, в КРТ p-типа проводимости; (б) малоугловые границы в образце КРТ p-типа проводимости.

Применяемый на ЗЧМ способ получения монокристаллов p-типа состоял из двух основных этапов: получение n-КРТ с концентрацией свободных электронов $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, что свидетельствовало о достаточно высоком структурном совершенстве, и последующий отжиг отобранных пластин при пониженном давлении паров ртути, при котором получается материал с концентрацией вакансий ртути $(0,8 - 1,0) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Это потребовало серьезных исследований природы несовершенства структуры, методик ее выявления. Тем не менее до конца проблема выращивания фотодиодного материала так и не была решена — материал не имел структурного совершенства, необходимого для создания многоэлементных фотодиодов. Наличие многочисленных дефектов структуры приводило к утечкам через p–n-переход и соответствующему снижению величины $R_0 A$ (R_0 — дифференциальное сопротивление, A — площадь фотодиода) или к полному шунтированию p–n-переходов.

Однако попытки изготовления многоэлементных фотодиодов, хотя и с крайне низким процентом выхода,

предпринимались постоянно. Так, в 1980 г. в НИИПФ были созданы первые 10-элементные фотодиоды с размером чувствительной площадки 300×300 мкм для задач лазерной локации на длине волны 10,6 мкм ("Ладога"). В рамках этой работы были созданы не только фотодиоды, имеющие вид 10-элементных мезаструктур (рис. 5), но и начаты первые разработки основ планарной технологии фотодиодов: n^+ – p -переходы создавались ионным легированием (ионы Ga, Al или In) или диффузией из слоя металла, предварительно нанесенного на поверхность образцов. Конфигурация фоточувствительного элемента и контактных областей создавалась методами фотолитографии (рис. 5, 6).

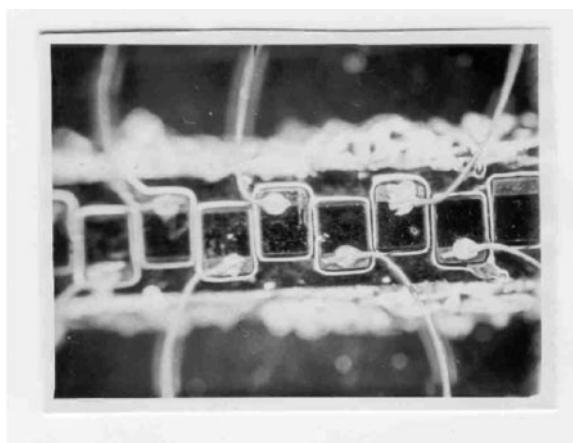


Рис. 5. Фрагмент 10-элементной фотодиодной мезаструктуры "Ладога" (НИИПФ, 1980 г.). Размер фоточувствительного элемента 300×300 мкм.

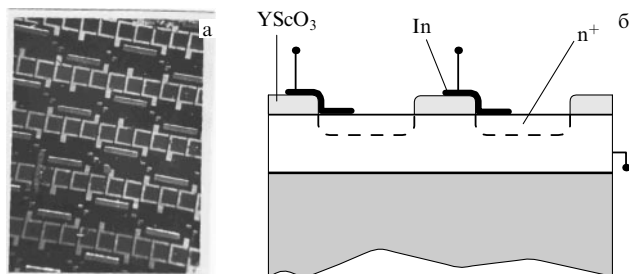


Рис. 6. (а) Фрагмент планарной 10-элементной фотодиодной структуры "Ладога" (НИИПФ, 1980 г.); (б) планарная структура фотодиода "Ладога".

Средние значения гетеродинного порога для этих фотодиодов составили $\sim 5,5 \times 10^{-19}$ Вт Гц⁻¹ на частоте модуляции 100 МГц.

Тогда же были впервые исследованы высокочастотные свойства многоэлементных фоторезисторов, в том числе на основе p -КРТ. В последних быстродействие обычно ограничено не объемным временем жизни неравновесных носителей заряда ($10^{-6} - 10^{-7}$ с), а временем их амбиполярного дрейфа к контактам $t_a = L/\mu_a U_{см}$ (L — расстояние между контактами, $U_{см}$ — напряжение смещения фоторезистора, $\mu_a = \mu_n \mu_p (n - p) / (n \mu_n + p \mu_p)^{-1}$ — амбиполярная подвижность неравновесных носителей). При длине фоторезистора из p -КРТ $L \cong 0,3$ мм, значениях $\mu_n \sim 10^5$ см² В⁻¹ с⁻¹, $\mu_p \sim 10^2$ см² В⁻¹ с⁻¹, $p \gg n$, $p \mu_p \gg n \mu_n$, величина t_a оказывается порядка 10^{-8} с.

Таким образом, применяя p -КРТ в качестве материала для изготовления фоторезисторов, удалось существенно повысить их быстродействие. В гетеродинном режиме был реализован порог $(0,8 - 1,9) \times 10^{-19}$ Вт Гц⁻¹ при частоте модуляции 60 МГц. Недавно было показано, что для фоторезисторов на основе КРТ n -типа проводимости с размерами фоточувствительной площадки 35×35 мкм и при спектральной плотности ЭДС шума предусилителя ≤ 1 нВ Гц^{-1/2} может быть достигнут гетеродинный порог $(4 - 6) \times 10^{-19}$ Вт Гц⁻¹ в полосе частот до 40 МГц [16].

В конце 70-х годов остро встала проблема стабильности параметров приборов из КРТ. Энергия связи атомов ртути в кристаллической решетке меньше, чем у кадмия и теллура. Поэтому даже не слишком длительный нагрев при температурах выше 80 °С может приводить к возрастанию концентрации вакансий ртути и деградации параметров фоторезисторов, изготовленных из материала n -типа ($n \cong 10^{14}$ см⁻³) [17]. Приборы, изготовленные из КРТ p -типа проводимости ($p \cong 10^{16}$ см⁻³), менее чувствительны к повышенным температурам. На первых порах изменение параметров приборов, в том числе и зарубежных, наблюдалось даже при комнатных температурах. Однако выяснилось, что последнее связано не со свойствами КРТ, а с ошибками в технологии сборки чувствительных элементов в корпус прибора. Действительно, чувствительный элемент расположен в наиболее холодной зоне и на него в первую очередь адсорбируются посторонние примеси, находящиеся в объеме корпуса. Исключив из конструкции приборов источники таких остаточных примесей (элементы на основе органических материалов, процессы пайки с использованием кислотных флюсов и т.п.), эту проблему удалось решить. Однако полностью проблема стабильности была разрешена только в первой половине 80-х годов после разработки технологии, обеспечивающей пассивацию и надежную защиту поверхности чувствительных элементов. Это стало возможным после действенных мер по самому технологическому переоснащению предприятия самым совершенным оборудованием, начатых еще в конце 70-х годов министром оборонной промышленности П.В. Финогеновым и директором института В.И. Креопаловым. Это позволило начать разработку современной планарной технологии малоразмерных многоэлементных фотоприемников.

На рисунке 7 приведена структура планарного фоторезистора с многослойным пассивирующим, антиотражающим и защитным покрытием (М.С. Никитин, Л.В. Киселева) [18]. Немного позже был разработан

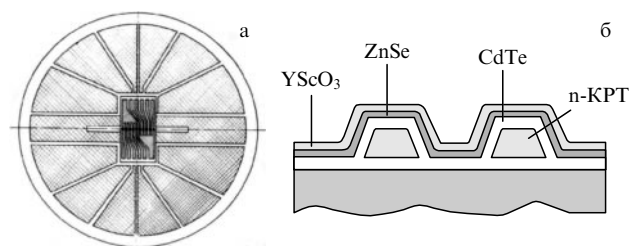


Рис. 7. Фоторезисторы из КРТ, изготовленные по планарной технологии: (а) 10-элементная линейка "Невесомость-10" (50×50 мкм) (НИИПФ, 1979 г.); (б) структура фоточувствительных элементов с трехслойным защитным покрытием.

метод электрохимической пассивации поверхности фоторезисторов собственными окислами КРТ [19], представляющими сложные кислородсодержащие соединения компонентов тройной системы TeO_2 , $(\text{Cd}, \text{Hg})\text{TeO}_3$, $(\text{Cd}, \text{Hg})\text{TeO}_5$ и другие материалы. Это обеспечивало малые скорости поверхностной рекомбинации, а дополнительная защита диэлектриками из ZnSe и YScO_3 — сохранение параметров приборных структур.

Как и материал в целом, приборные структуры на его основе оказались чрезвычайно интересными с физической точки зрения. Особенно это относится к структурам с p – n -переходами или барьерами другой природы в КРТ p -типа проводимости.

Так, в 1974 г. был впервые экспериментально обнаружен и исследован новый, необычный для термоэлектричества эффект инжекционного переноса тепла в диодах на основе эпитаксиальных слоев КРТ [20]. В прямосмещенном p – n -переходе инжектированные из контакта неосновные носители при достаточно больших длинах диффузионного смещения L (а в КРТ с высокой подвижностью и большим временем жизни электронов величина L_n достигает десятков микрон) не рекомбинируют в объеме, а уходят в противоположный контакт, поглощая энергию кристаллической решетки. Область p – n -перехода при этом охлаждается. Низкая теплопроводность КРТ ($\chi \sim 0,4 \text{ Вт см}^{-1} \text{ град}^{-1}$) препятствует обратному потоку тепла. Тем самым в КРТ благоприятным образом сочетаются параметры материала, необходимые для инжекционного охлаждения, при котором протекание прямого тока через p – n -переход может сопровождаться снижением температуры диода. Даже при $T = 77 \text{ К}$ экспериментально обнаруженный перепад температур составил 5 К. Для традиционного термоэлектричества на основе классического эффекта Пельтье это невозможно. Цикл исследований термоэлектрических явлений в диодах из узкозонного КРТ показал принципиальную возможность создания в будущем "самоохлаждающихся" матриц ИК-диапазона.

Исследования зонной структуры и закономерностей переноса носителей в новом полупроводниковом соединении были необходимы при разработках технологии и метрики материала и приборных структур на его основе. В НИИ прикладной физики уже в 1976 г. была организована группа под руководством В.П. Пономаренко по исследованию гальваномагнитных, фотоэлектрических и термоэлектрических явлений, которая также курировала вопросы взаимодействия с ГИРЕДМЕТОМ и ЗЧМ по внедрению технологии КРТ (Д.В. Соболев, Н.А. Аристова, Е.А. Захарова, Ю.Н. Савченко, В.Д. Вершинин). Исследования p -КРТ при гелиевых температурах в слабых и сильных магнитных полях позволили установить ряд необычных свойств узкозонных составов. В частности, было обнаружено наличие двух сортов носителей заряда противоположного знака в зоне проводимости при температурах 4,2–10 К [21, 22]. Для объяснения была выдвинута модель примесной акцепторной зоны, перекрывающейся при низких температурах с зоной проводимости. Она образуется акцепторными уровнями, отщепленными от валентной зоны и попавшими в непрерывный спектр состояний зоны проводимости p -КРТ. Из-за разной симметрии акцепторные термы не смешиваются с состояниями зоны проводимости и при некоторой концентрации ($N_a \cong 10^{17} \text{ см}^{-3}$) расщепляются в зону, по которой возможна проводи-

мость дырочного характера. Исследования при высоких гидростатических сжатиях и сверхнизких температурах, проведенные в МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством Н.Б. Брандта, позволили установить основные параметры этой зоны (плотность состояний, подвижность и концентрацию "примесных" дырок) [23]. Позднее те же особенности были обнаружены для гальваномагнитных и термоэлектрических явлений в эпитаксиальных слоях КРТ [24, 25]. Наконец в 1979 г. примесную зону в КРТ удалось наблюдать непосредственно при исследованиях поглощения и фотопроводимости в сверхдальней ИК-области спектра при энергиях фотонов $10 < \hbar\nu < 60 \text{ мэВ}$, проведенных Л.Д. Сагиновым методом фурье-спектроскопии высокого разрешения [26]. В итоге это позволило с единых позиций объяснить совокупность кинетических явлений в узкозонных, бесщелевых и полуметаллических составах твердого раствора КРТ.

История создания фоторезисторов и фотодиодов, на разработках которых сосредоточились усилия НИИ прикладной физики, в известной степени повторяла успехи и неудачи, сопровождавшие разработку исходного материала КРТ. Первые приемники с размерами сторон чувствительной площадки 100–300 мкм еще могли изготавливаться с применением методов механической или электроискровой резки или простейшей фотолитографии. Так были разработаны малоэлементные фоторезисторы "Крыло", "Секунда", "Весна", "Осень" (Е.В. Сусов), 10-элементный фоторезистор "Невесомость-10", 10-элементные быстродействующие фотодиоды "Ладога" (Л.А. Бовина, 1979–1980 гг.) и другие приборы. В 1980–1985 гг. была проведена разработка 50-элементных фоторезисторов "Агава-ФП" с размерами чувствительных элементов $50 \times 50 \text{ мкм}$ (Л.А. Бовина, главный конструктор аппаратуры на основе этого приемника — Н.Ф. Кошавцев). Разработанный в конце 70-х годов 200-элементный фоторезистор "Лавр" (Л.А. Бовина) с размерами чувствительного элемента $\sim 100 \text{ мкм}$ собиравался из отдельных блоков, подбор которых осуществлялся по принципу наибольшей однородности характеристик содержащихся в них элементов. Разработка планарной технологии малоразмерных приемников и групповых методов их изготовления, когда на одной пластине КРТ одновременно формируется множество "чипов" многоэлементных приборов, повлекли ужесточение требований к однородности параметров исходного материала. Начавшиеся во второй половине 80-х годов поставки высокооднородного КРТ p -типа проводимости со стороны ЗЧМ позволили провести разработку 64-элементных фоторезисторов "Невесомость-64" (С.А. Попов, О.В. Смолин, 1983–1987 гг.), 128-элементных фоторезисторов "Арча-Ф" (С.А. Попов, В.В. Королев, 1983–1991 гг.) и других приборов. Таким образом, к началу 90-х годов в СССР были успешно разработаны многоэлементные фоторезисторы для области спектра 8–14 мкм, аналогичные известной зарубежной системе общих модулей (Common Modules).

С 1982 г. начались исследования по созданию приемников с внутренним накоплением сигналов (ВНС) в элементе (типа SPRITE) [27]. В самом простом виде фоточувствительный элемент такого прибора представляет собой полосу КРТ ($700 \times 70 \times 10 \text{ мкм}$) с тремя омическими контактами, из которых два (токовые, на противоположных концах полосы) служат для подачи

электрического смещения (как в традиционных фоторезисторах), а третий (вблизи токового контакта) представляет собой зонд для считывания сигнала. При освещении области такой полоски световым пятном с размером, формируемым оптической системой (обычно 40–50 мкм), в ней образуется пакет электронно-дырочного газа, который под действием приложенного поля дрейфует вдоль полоски с амбиполярной скоростью (для КРТ она соответствует скорости малоподвижных дырок). Дойдя до противоположного контакта, этот пакет изменит сопротивление участка материала между зондом и контактом, что и воспринимается как фотосигнал. В тепловизоре с оптико-механической разверткой изображения нужно так подобрать скорость перемещения светового пятна вдоль полоски, чтобы она соответствовала скорости дрейфа пакета электронно-дырочного газа. Тогда при считывании вклад в фотосигнал будут давать электронно-дырочные пакеты, генерированные излучением вдоль всей длины полоски. В этом и состоит механизм "внутреннего" накопления фотосигналов, использованный Эллиотом в фотоприемнике SPRITE (Signal PRocessing In The Element). В таких фотоприемниках удастся получить значительный выигрыш в отношении сигнал/шум по сравнению с традиционными фоторезисторами. Недостатками являются значительные токи смещения, приводящие к большим тепловыделениям в чувствительных элементах, использование высокоскоростных сканеров, необходимость применения КРТ с временем жизни неравновесных носителей заряда более 2 мкс.

Первая работа по таким приборам (НИР "Интегратор") была поставлена по совместной инициативе НИИПФ и ЦКБ "Геофизика". К 1983 г. были изготовлены первые 8-элементные приемники (рис. 8) с обнаружительной способностью $(2-5) \times 10^{10} \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ (Л.А. Бовина). Сравнительно невысокие значения $D_{\lambda}^*_{\text{max}}$ объяснялись отсутствием материала КРТ с требуемым временем жизни ($> 2 \text{ мкс}$). Однако были исследованы основные факторы, влияющие на параметры приборов, позволившие сформулировать требования к материалу, конструкции, сканирующему устройству и т.п. Уже в 1985 г. были реализованы значения $D_{\lambda}^*_{\text{max}} = (1,5-2,5) \times$

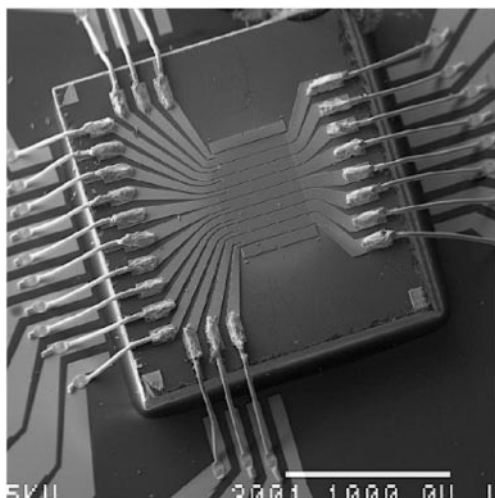


Рис. 8. Фотоприемник с внутренним накоплением сигнала в элементе (НИИПФ, 1985 г.).

$\times 10^{11} \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ (НИР "Сенеж", научный руководитель Г.Э. Поповян). Технология изготовления чувствительных элементов очень близка к применяемой для многоэлементных фоторезисторов, с той лишь разницей, что для создания малоразмерных считывающих контактов (порядка 12–14 мкм) вместо жидкостного травления была разработана технология "сухого" ионного травления в плазме аргона. К началу 90-х годов в НИИ прикладной физики было разработано несколько типов фотоприемников с внутренним интегрированием, поставившихся разработчикам тепловизионной аппаратуры.

Усовершенствование фоторезистивных технологий происходило и в дальнейшем. На рисунке 9 показана структура современного многоэлементного планарного фоторезистора с размерами чувствительных элементов $35 \times 35 \text{ мкм}$, разработанная в 90-х годах (Ю.С. Трошкин, Г.Э. Поповян и др.) [28]. Здесь, в отличие от традиционной технологии, когда присоединение тонкопроводящих токовых выводов к каждому элементу производится вручную с использованием микропайки, применена технология "со спуском" металлических дорожек по боковой поверхности на растр из искусственного сапфира. Проволочные выводы (диаметром 30–50 мкм) к металлическим дорожкам растра в этом случае могут присоединяться автоматизированными методами микросварки без опасений повредить чувствительный элемент.

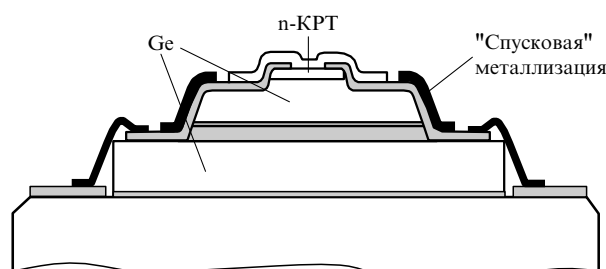


Рис. 9. Структура чувствительных элементов многоэлементного планарного фоторезистора, изготовленного по технологии "со спуском" (НИИПФ, 1999 г.).

Параметры многих многоэлементных фоторезисторов, разработанных к настоящему времени, уже достигли значений, близких к теоретическому пределу (табл. 1). Во многом это стало возможным благодаря серьезным успехам в полупроводниковом материаловедении, развитию теории физических явлений и технологии такого сложного соединения, как теллурид кадмия – ртути.

В Советском Союзе первые эпитаксиальные слои КРТ были получены Л.А. Бовиной в 1970–1973 гг. по методу изотермической эпитаксии [13]. В этом случае на подложках CdTe вырастал слой твердого раствора переменного по толщине состава — от чистого CdTe в глубине до сильно обогащенного HgTe слоя у поверхности. Был проведен обширный комплекс работ по исследованию распределения состава, концентрации и подвижности электронов и дырок, ширины запрещенной зоны и других параметров по глубине эпитаксиальных слоев толщиной 25–30 мкм [25, 29], позволивший найти оптимальные способы изготовления p–n-переходов в

Таблица 1. Параметры фоторезисторов из КРТ (НПО "Орион")

Диапазон спектра, мкм	Граничная длина волны, мкм	Число элементов	Размер элемента, мкм	Обнаружительная способность, см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹	Апертурный угол	Система охлаждения	Наличие предусилителей
8–14	11,5–12	1	100 × 100	$\geq 3 \times 10^{10}$	60°	*	+
8–14	11,5–12	2 × 12	50 × 50	$\geq 6 \times 10^{10}$	40°	*	
8–14	11,5–12	1 × 26	50 × 50	$\geq 7 \times 10^{10}$	26°	***	
8–14	11,5–12	2 × 26	50 × 50	$4,1 \times 10^{10}$	180°	**	
				$7,5 \times 10^{10}$	40°	**	
				$9,5 \times 10^{10}$	20° × 10°	*	
8–14	11,5–12	2 × 48	30 × 30	$\geq 4 \times 10^{10}$	24°	***	+
8–14	11,5–12	1 × 128	50 × 50	$\geq 3 \times 10^{10}$	60°	**	+
3–5	5–5,5	2 × 16	35 × 35	$\geq 3 \times 10^{10}$	90°	****	+
8–14 с внутренним интегрированием	11,5–12	4–8	64 × 500	$\geq 2,6 \times 10^{11}$	60°	**	+

Примечание: * — интегральный Стирлинг, ** — дифференциальный сплит-Стирлинг, *** — дроссельный микротеплообменник Джоуля–Томсона, **** — термоэлектрический охладитель. В конструкции дифференциального охладителя, работающего по циклу Стирлинга, теплообменник соединен с компрессором гибким металлическим трубопроводом высокого давления; в конструкции интегрального охладителя Стирлинга чувствительный элемент размещается непосредственно на охлаждаемом "пальце" компрессора.

фотодиодах на области спектра 3–5 и 8–14 мкм. Позднее в НПО "Орион" была разработана технология эпитаксиального выращивания в квазизамкнутом объеме, когда рост слоев происходит в атмосфере азота при избыточном давлении порядка 1 атм [30]. Все это позволило уже в начале 70-х годов разработать в НИИ

прикладной физики первые, в том числе высокочастотные, фотодиоды на основе эпитаксиальных структур КРТ. В изготовленных описанным методом эпитаксиальных слоях переменного состава фактически содержатся два потенциальных барьера — один вблизи поверхности, а другой, направленный навстречу, в области составов $x \cong 0,2$. Такая структура позволяет создавать двухцветные фотодиоды с управляемой электрическим смещением спектральной характеристикой (рис. 10) [15].

В работы по эпитаксии КРТ во второй половине 80-х годов включились и другие научно-исследовательские организации страны. В Нижегородском государственном университете начались исследования по технологии эпитаксии с использованием металлоорганических соединений кадмия, теллура и ртути (С.Н. Ершов) [31], а в НИИ физики полупроводников СО РАН получил развитие метод молекулярно-лучевой эпитаксии (В.Н. Овсяк, Ю.Г. Сидоров) [32].

3. Жидкофазная эпитаксия КРТ. Матричные фотодиоды

Ситуацию, которая сложилась в мировой опто- и фотоэлектронике к середине 80-х годов, можно охарактеризовать следующим образом:

— научно-технологические проблемы создания тепловизионной аппаратуры с использованием линейчатых фоторезистивных приемников с числом элементов 10–200 за рубежом были в основном решены. Их постепенное внедрение в реальные системы управления огнем, системы переднего обзора самолетов, танков и вертолетов позволило сформировать вполне разумные требования к унифицированным модульным системам, сделавшие рентабельным и экономически выгодным массовый выпуск приборов в США, Англии, Франции и других странах. Число тепловизионных приборов в США и европейских странах превысило 100 тыс единиц. Мини-

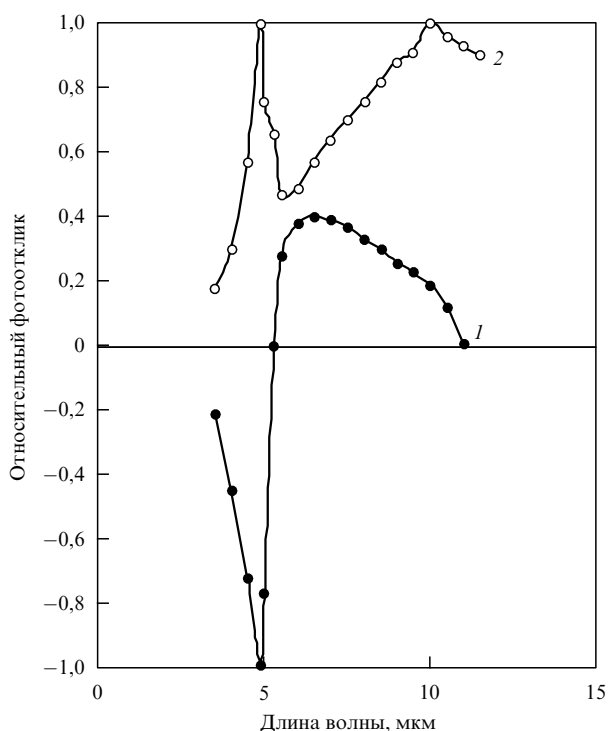


Рис. 10. Спектральные характеристики фоточувствительности фотодиода на основе варизонного эпитаксиального слоя р-КРТ, полученного методом изотермической эпитаксии: 1 — без смещения, 2 — со смещением. В фотодиоде имеются два потенциальных барьера: вблизи поверхности и в области составов $x \sim 0,2$.

стерство обороны США сообщило, что оно "сэкономило" порядка 900 млн долларов за счет приобретения у производителей 80 тыс стандартных приемников типа "Common Modules" вместо нестандартных приборов для различных видов вооружений. Были разработаны высококачественные микрокриогенные системы охлаждения с холодопроизводительностью 1–2 Вт. Качество разработанной оптики (телескопическая система, объектив сопряжения с приемником, сканирующая система) вполне позволяло реализовать основные тактико-технические требования, предъявляемые к аппаратуре с использованием серийно выпускаемых приемников с обнаружительной способностью $(2-5) \times 10^{10}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹;

— в СССР к этому периоду оказались востребованными для массового выпуска только фоторезистивные линейки с числом элементов 10–60, для которых была разработана сравнительно малогабаритная и надежная опико-электронная аппаратура, такая, как "Метис" и "Мулат" [33]. Опытно-промышленный выпуск подобных приемников был организован на Московском заводе "Сапфир", в НПО "Орион", а также на отделившемся в 1991 г. от НПО "Орион" опытном заводе "Альфа". Выпуск фотоприемников с числом элементов более 100 ослался незначительным.

Вместе с тем, требования по увеличению дальности видения, кардинальному уменьшению массогабаритных характеристик аппаратуры, отказу от механической развертки стимулировали в конце 70-х годов поиск новых типов фотоприемных устройств, к которым стали относить двумерные (матричные) структуры формата $N \times N$, $M \times N$, $2 \times 2N$ и другие. По сложности технологии такие приемники во много раз превосходили все созданные к началу этих разработок. Стало ясно, что необходим широкий комплекс новых материаловедческих и приборных исследований, направленных, прежде всего, на создание совершенных эпитаксиальных слоев большого размера; современной планарной технологии малоразмерных фотодиодов, аналогичной кремниевой, но учитывающей особенности КРТ; исследований поверхности и границы раздела КРТ–диэлектрик; создание глубокоохлаждаемой кремниевой микроэлектроники обработки сигналов непосредственно в фокальной плоскости приемника; методов объединения фотодиодных и кремниевых микросхем и многих других. Требовалось решить проблему метрологии приемников, содержащих десятки тысяч фоточувствительных элементов. Необходимо было провести исследования в области поверхностно-управляемых приборов, включая ПЗС и ПЗИ, транзисторов на основе КРТ, фотодиодов с барьером Шотки и других.

Первые работы по матрицам из КРТ были поручены НИИ прикладной физики в 1980 г. Однако перегруженный текущими опытно-конструкторскими разработками отдел В.И. Стафеева был не в состоянии серьезно развернуть эти работы. Попытки организовать изготовление кремниевой охлаждаемой микроэлектроники на предприятиях Министерства электронной промышленности окончились неудачей, не удалось согласовать даже техническое задание на разработку.

В 1983 г. направление по приборам из КРТ было реорганизовано. Во главе отдела был поставлен Е.В. Сусов, которому поручалось завершение многочисленных НИОКР по линейчатым фотоприемникам. Тогда же было образовано Научно-производственное

объединение "Орион", и назначенный генеральным директором И.В. Птицын предложил В.И. Стафееву продолжить работы по многоэлементным и матричным фотодиодам в НИИ электронной и ионной оптики (НИИЭИО) — институте, также вошедшем в состав объединения. Там вводился новый инженерно-лабораторный корпус, который И.В. Птицын хотел использовать под новую перспективную тематику. Перешедшие в НИИЭИО вместе с В.И. Стафеевым четырнадцать сотрудников (Л.А. Бовина, В.П. Пономаренко, М.В. Седнев, Т.Ф. Терехович и др.) составили первый коллектив разработчиков, начавший работы по новому направлению матричных фотоприемных устройств на основе КРТ. В 1985 г. генеральным директором НПО "Орион" стал В.Т. Хряпов, а отдел В.И. Стафеева был включен в состав нового отделения (начальник отделения В.Н. Северцев), где, кроме того, были организованы отделы полупроводникового материаловедения и кремниевой технологии. В 1986 г. руководителем отделения был назначен В.П. Пономаренко, возглавлявший его до 1988 г., когда он был назначен первым заместителем генерального директора по научной работе. За относительно короткий период были обустроены новые производственные площади, а матричное направление получило значительное количество самого современного технологического и исследовательского оборудования. После 1988 г. руководство отделением матричных фотоприемников из КРТ было поручено В.И. Стафееву, а создание кремниевых охлаждаемых мультиплексоров началось в отделении под руководством А.А. Тимофеева. В 1998 г. оба отделения были объединены в научно-технический центр микрофотоэлектроники под руководством Л.Д. Сагинова. Направлением фоторезисторов из КРТ с 1985 г. руководил С.А. Попов, а с 1996 г. его возглавил Ю.С. Трошкин.

В 1983 г. была закончена первая поисковая научно-исследовательская работа "ФОБ-1-2", где был проведен анализ и технико-экономические исследования возможности создания "смотрящих" матриц с числом элементов 16×16 и 64×64 и сформулированы основные требования к материалу, электронике и необходимому технологическому оборудованию. Как и за рубежом, на первом этапе (1983–1988 гг.) разработка началась сразу по двум направлениям — гибридные фотодиодные матрицы (ФДМ) с кремниевой микроэлектроникой считывания и предварительного усиления, расположенной непосредственно в зоне охлаждаемого узла чувствительных элементов, и монолитные матрицы на основе приборов с переносом заряда (ППЗ) — ПЗС (приборы с зарядовой связью) или ПЗИ (приборы с зарядовой инжекцией) из МДП-структур. Сообщения о разработке таких приборов в США были опубликованы уже в начале 80-х годов [34–36]. Для создания фотодиодных матриц был необходим высокосоввершенный материал р-типа проводимости. ППЗ могли разрабатываться на основе КРТ п-типа. Однако здесь для уменьшения темновых диффузионных токов, переполняющих накопительную МДП-ячейку, требовался п-КРТ с временем жизни 5–6 мкс. К началу этих работ не был разработан ни диодный, ни фоторезистивный материал с требуемыми свойствами. Свойства МДП-структур, являющихся элементами накопления сигнального заряда, практически полностью определяют параметры фотоприемников на основе ППЗ. Известные к тому времени способы изготовления МДП-структур из

КРТ не удовлетворяли основным требованиям, предъявляемым к качеству границы раздела диэлектрик–КРТ из-за значительной плотности фиксированного заряда $Q_{fc} > +10^{12} \text{ см}^{-2}$ и высокой плотности поверхностных состояний $N_{ss} > 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$. Кроме того, разработанные в тот период диэлектрические покрытия на основе собственных окислов КРТ, Al_2O_3 , SiO_2 , YScO_3 и им подобные, имели диэлектрическую проницаемость $\varepsilon \cong 8-20$, что при обычных толщинах пленки $d_f \sim 0,15-0,25 \text{ мкм}$ обеспечивало очень малую емкость накопительной ячейки $C_i \cong (1-2) \times 10^{-12} \text{ Ф}$ при требуемых для тепловизионных приемников размерах $50 \times 50 \text{ мкм}$. При высоких уровнях фоновой освещенности порядка $10^{17} \text{ фотон см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, характерных для тепловизионных применений, такие элементы накопления быстро переполняются темновыми носителями, генерируемыми фоном. Не менее значительными оказались ограничения, связанные с другой компонентой темновых токов — туннельными токами, возникающими вследствие сильного изгиба энергетических зон в приповерхностной области МДП-структур на основе узкозонного КРТ [37]. Тем не менее в 1988 г. были изготовлены и исследованы ПЗИ-матрицы на основе $\text{n-Cd}_{0,21}\text{Hg}_{0,79}\text{Te}$ с числом элементов 8×8 (рис. 11), где в качестве ячеек накопления использовались МДП-структуры на основе Al_2O_3 (темы "Байкал", "Сова"). Фотосигнал выделялся из неравновесных вольт-фарадных характеристик методом двойной коррелированной выборки (Н.Г. Мансветов). Были получены значения $D_{\lambda \text{ max}}^* \cong (3-5) \times 10^9 \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$. Перечисленные особенности ППЗ на основе КРТ требовали создания МДП-структур с использованием неизвестных в то время диэлектриков, имеющих диэлектрическую проницаемость $\varepsilon \cong 10^3-10^4$.

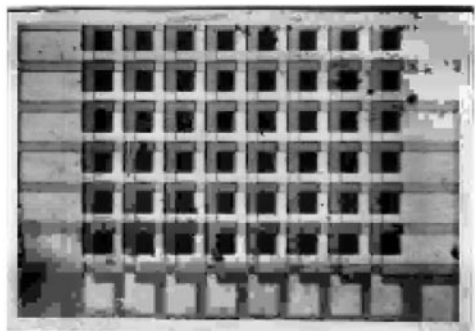


Рис. 11. Фрагмент ПЗИ-матрицы из $\text{n-Cd}_{0,21}\text{Hg}_{0,79}\text{Te}$ с числом элементов 8×8 (НИИПФ, 1988 г.).

В результате в конце 80-х годов основные усилия разработчиков матричных приемников сосредоточились на создании гибридных матриц, а работы по МДП-технологиям были направлены на создание полевых транзисторов из КРТ, высококачественных пассивирующих покрытий и диодов с туннельно-прозрачным диэлектрическим слоем (МТДП-фотодиоды).

Как и в годы первых разработок приборов из КРТ, одной из центральных была проблема материала. Хотя отработка технологии первых малоформатных фотодиодных матриц с числом элементов 32×32 велась на основе объемных монокристаллов р-типа, было очевидно, что наиболее перспективно создание матричных

приемников с использованием эпитаксиальных слоев. Имея сразу после выращивания толщину, оптимальную для поглощения излучения, они не требуют длительной и тонкой механической обработки. Кроме того, при механической обработке на поверхности КРТ р-типа может образовываться слой противоположного типа проводимости, шунтирующий р–п-переходы. Это явление, характерное для узкозонных твердых растворов КРТ, объясняется появлением "механононоров" [38] — электрически активных собственных дефектов кристаллической решетки, стимулированных механическими воздействиями.

В ГИРЕДМЕТе для выращивания эпитаксиальных слоев КРТ был выбран метод жидкофазной эпитаксии [39], который, как показала практика, в настоящее время является основным промышленным методом изготовления эпитаксиальных слоев в ведущих мировых фирмах, производящих многоэлементные и матричные фотодиоды. Основные преимущества этого метода: относительно низкая стоимость и высокая производительность оборудования, автоматическая доочистка поверхности на начальном этапе роста, дополнительная очистка от примесей в процессе роста и однородность состава по площади. Анализ фазовых равновесий в системе Cd-Hg-Te показал, что наиболее технологичен рост эпитаксиальных слоев из раствора — расплава на основе теллура. В этом случае существенно снижается температура эпитаксии и, соответственно, парциальное давление ртути при $T = 500-550^\circ\text{C}$ до 0,15 атм, в то время как при использовании ртути как растворителя давление ее пара даже при $T = 350-400^\circ\text{C}$ уже достигает 1 атм. После исследований различных вариантов был выбран вариант технологии выращивания слоев в замкнутом объеме с завершающим этапом удаления жидкой фазы с поверхности выращенного слоя методом центрифугирования ("декантация"). На рисунке 12 показано характерное распределение состава по толщине эпитаксиального слоя.

Важнейшей проблемой эпитаксии является правильный выбор подложки эпитаксиального слоя, так как ее свойства во многом определяют параметры и структурное совершенство выращенных слоев. В качестве подложек могут использоваться моноатомные полупровод-

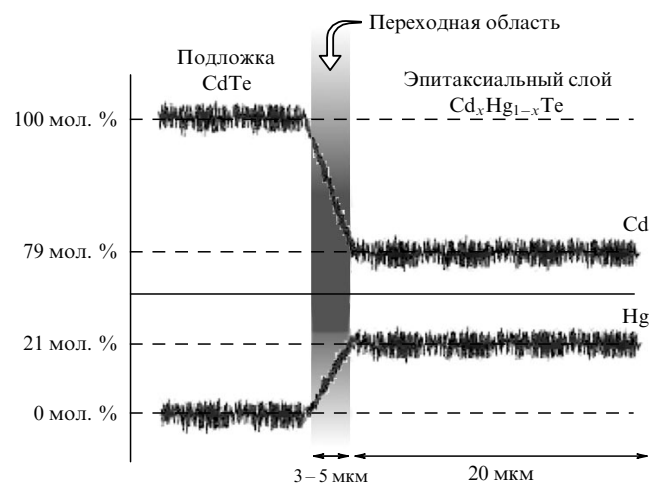


Рис. 12. Распределение состава по толщине эпитаксиального слоя.

ники (Si) или бинарные соединения (GaAs) и другие материалы, но здесь требуется присутствие "буферной" прослойки между подложкой и слоем для лучшего согласования параметров кристаллических решеток. Наилучшие результаты были получены при использовании в качестве подложки твердого раствора теллурида кадмия–цинка (КЦТ) $\text{Cd}_y\text{Zn}_{1-y}\text{Te}$ ($y = 0,02–0,05$). Технология его выращивания довольно сложна из-за низкой теплопроводности, высокой упругости паров компонентов, склонности к двойникованию и других факторов. Разработанный в ГИРЕДМЕТе (В.М. Лакеенков) метод выращивания монокристаллов CdZnTe основан на модернизированной технологии изготовления кристаллов КРТ методом вертикальной или горизонтальной кристаллизации расплава при температурах $1120–1130^\circ\text{C}$ с последующим охлаждением при скорости не более 10°C ч^{-1} . Эта технология обеспечила получение монокристаллических, прозрачных в ИК-области подложек с диаметром более 30 мм, плотностью дислокаций не выше $(5–8) \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ при отсутствии малоугловых границ и включений второй фазы [40]. Этими работами были заложены основы промышленного выпуска эпитаксиального материала для фотодиодов в России. В настоящее время выпуск эпитаксиальных слоев ведется в ГИРЕДМЕТе.

Физико-технологические основы двумерных (матричных) фотоприемников на основе многоэлементных фотодиодов из КРТ были заложены в НИИ прикладной физики в ходе выполнения научно-исследовательских работ "ФОВ-1-2", "Четкость-МФП", "Сова", "Байкал", "Рубеж" (1983–1989 гг.). Необходимо было решить три основные проблемы: разработать технологию высококачественных многоэлементных и малоразмерных ($35–50 \text{ мкм}$) фотодиодов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0,2–0,3$), разработать низкошумящую кремниевую микроэлектронику считывания фотосигналов в "холодной" зоне ($T = 77 \text{ K}$) и, наконец, создать технологию объединения фотодиодных и кремниевых матриц в единую гибридную микросборку. Переход к малоразмерным фотодиодам был необходим для обеспечения высокой разрешающей способности тепловизионной аппаратуры. Близкое расположение чувствительных элементов в матрице требовало решения проблемы минимизации паразитных связей (электрических, оптических, фотоэлектрических) между ними. В ИК-диапазоне высок уровень фоновой освещенности и мал температурный контраст наблюдаемых объектов, поэтому взаимосвязь могла привести к размытию и искажению тепловизионного изображения.

В качестве основного метода получения p–n-переходов для фотодиодов из КРТ был разработан метод имплантации ионов V^+ с энергией $\sim 100 \text{ кэВ}$. При этом был установлен ряд физических особенностей, сопровождающих процесс взаимодействия потока ионов с поверхностью КРТ. Было установлено, что возникновение инверсных слоев n-типа в приповерхностной области p-КРТ обусловлено в основном радиационными дефектами, аналогичными "механононам", которые возникают после механических воздействий на поверхность КРТ [38, 41].

В технологии многоэлементных планарных фотодиодов ключевую роль играют диэлектрические покрытия. При пассивации и защите поверхности они обеспечивают необходимую долговременную стабильность параметров. Разработанные для фоторезисторов на основе

p-КРТ методы пассивации оказались непригодными для фотодиодов. Например, при пассивации собственными окислами высокая плотность положительного фиксированного заряда ($\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$) на границе раздела окисел – КРТ уже при концентрации дырок в подложке $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ приводила к сильному обогащению приповерхностной области электронами и значительной взаимосвязи между элементами. Было разработано несколько методов пассивации, в том числе с использованием Al_2O_3 , SiO_2 и плазменного фторирования. Пассивация кислородсодержащими диэлектриками при их магнетронном напылении требовала очень точного поддержания парциального давления кислорода в процессе нанесения пленок, так как было установлено, что плотность положительного фиксированного заряда на границе раздела в основном связана с вакансиями кислорода в выращенном диэлектрике. Более воспроизводимые результаты получались при использовании в качестве диэлектрического слоя CdTe , наносимого методом вакуумного напыления (М.В. Седнев), либо методом "горячей стенки" (Л.А. Бовина, С.В. Головин) [42].

Разработка охлаждаемых до азотных температур мультимплексоров из Si была начата в НИИ прикладной физики с середины 80-х годов. В основу была положена схема МОП-транзисторных ключей, которая благодаря более высокой по сравнению с ПЗС-регистрами накопительной емкости предпочтительна для тепловизионных приемников, работающих при значительных фоновых нагрузках. Были разработаны кремниевые интегральные схемы считывания на основе n-МОП-технологии с поликремниевыми затворами транзисторов и подзатворным диэлектриком из SiO_2 , малым разбросом параметров и малыми токами утечек транзисторных ключей (А.А. Тимофеев, Е.А. Климанов, В.М. Акимов) [43, 44]. При считывании фотосигналов использована схема прямой инжекции фототока I_ϕ (рис. 13), включающая емкость накопления C_n , входной транзистор VT7, емкость хранения заряда C_x и ключи VT8, VT5, VT3 и VT4, служащие для задания времени накопления и предварительной зарядки C_n и C_x ; U_{cm} — напряжение смещения. Выход каждого канала соединен с шиной считывания через истоковый повторитель на транзисторе VT2 через ключ VT1. Эти МОП-транзисторные ключи объединены в двухкоординатную матрицу по шинам стоков и затворов. Кроме того, интегральная микросхема содержит сдвиговые регистры, секции накопления и блоки управления, формирующие последова-

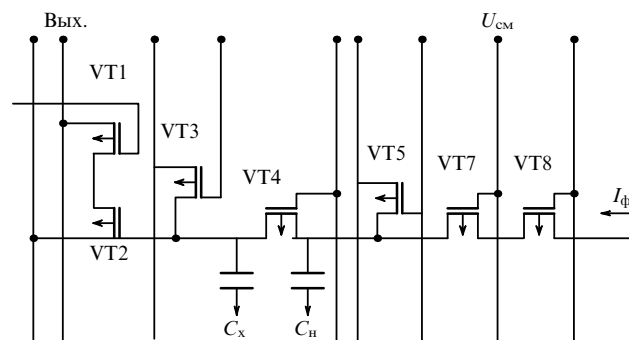


Рис. 13. Схема прямой инжекции фототока при считывании фотосигналов в матричных фотоприемниках из КРТ.

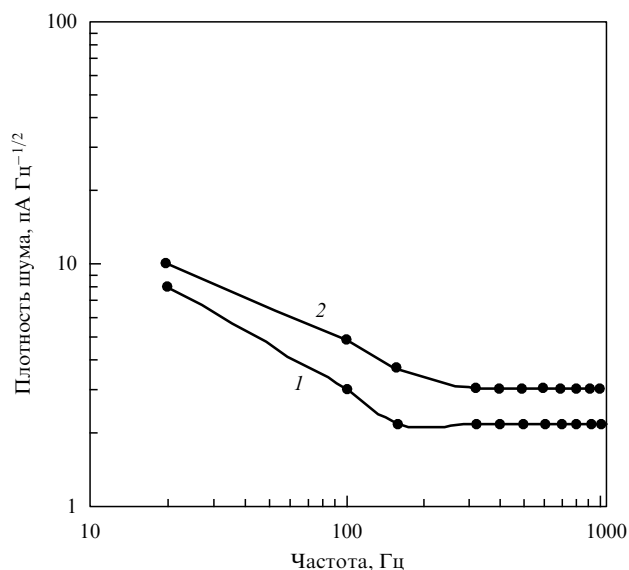


Рис. 14. Спектры шума матричного фотодиода из КРТ без мультиплексора (кривая 1) и с мультиплексором (кривая 2)

тельность импульсов, подаваемых на шины затворов матрицы ключей. МОП-ключи имеют токи утечки в закрытом состоянии менее 10^{-10} А и времена переключения менее 10^{-9} с. При объединении с фотодиодами из КРТ разработанные мультиплексоры существенно не меняют ни токовой чувствительности, ни шумовых характеристик фотодиодов (рис. 14).

Одной из наиболее сложных и "тонких" операций при изготовлении гибридных матричных фотоприемников является операция объединения матрицы фоточувствительных элементов с матрицей транзисторных ключей считывания фотосигналов. При этом должно быть обеспечено надежное соединение десятков и сотен тысяч микроконтактов между фотодиодами из КРТ и входными устройствами Si-микросхем. Анализ возможных технологий, проведенный в 1983–1986 гг., показал, что наиболее перспективны две из них — технология объединения через столбчатые металлические микроконтакты, выращенные на поверхности КРТ-фотодиодов и Si-микросхем (рис. 15а), и технология объединения с использованием "вертикальных" р–п-переходов в КРТ (рис. 15б), предложенная фирмой Mullard [45].

В первом случае необходимо было разработать способы выращивания таких микроконтактов на КРТ и Si и методы их стыковки, во втором требовалась технология глубинного травления малоразмерных сквозных каналов в КРТ и разработка способов создания р–п-переходов вблизи боковых стенок каналов. Разработка этих процессов привела к положительному результату в 1988 г.: сначала была отработана технология электрохимического выращивания индиевых контактов из солевых растворов (М.А. Баталина), позднее — технология вакуумного нанесения индия и формирования контактов методами фотолитографии, а в 1989 г. были разработаны методы высокочастотного глубокого травления КРТ в ртутной плазме (А.В. Фролов). В последнем случае р–п-переходы создавались нанесением тонких слоев КРТ п-типа методом "горячей стенки" (Л.А. Бовина, С.В. Головин). Технология объединения на основе "вертикальных" р–п-переходов

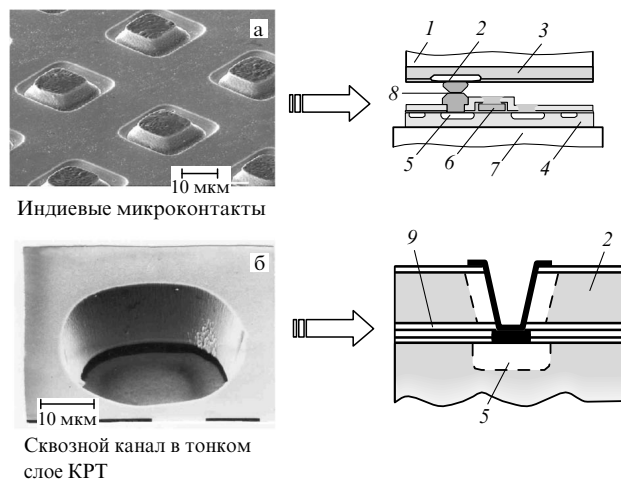


Рис. 15. Различная архитектура гибридных матричных приемников на основе фотодиодов из КРТ: (а) на основе столбчатых индиевых микроконтактов; (б) с использованием "вертикальных" р–п-переходов; 1 — подложка эпитаксиального слоя; 2 — p^+ -область фотодиода; 3 — эпитаксиальный слой; 4 — кремний; 5 — исток входного транзистора; 6 — затвор входного транзистора; 7 — подложка; 8 — индиевые микроконтакты; 9 — тонкий слой монокристаллического р-КРТ.

выглядит предпочтительной для матриц на основе монокристаллического материала. Однако по мере отработки эпитаксиальных слоев на первый план вышла технология с использованием индиевых микроконтактов, которая и сейчас остается основной при создании фотодиодных матриц из КРТ. К концу 80-х годов было разработано оборудование и технология для проведения процесса объединения фотодиодных матриц и кремниевых мультиплексоров методом "холодной" сварки (В. Н. Головин, В.Ю. Иванов).

В 1988–1992 гг. были изготовлены и исследованы первые матрицы на основе фотодиодов из КРТ с числом элементов 32×32 на спектральные диапазоны 1,5–2,5; 3–5 и 8–12 мкм из эпитаксиальных слоев, выращенных методами изотермической эпитаксии на подложках CdTe и жидкофазной эпитаксии на подложках CdZnTe [46, 47]. В таблице 2 представлены основные фотоэлектрические параметры этих матриц. Дисперсия токовой чувствительности по работоспособным элементам ($> 98\%$) не превышает 30 %. Тогда же были получены и первые результаты по "смотрящим" матрицам формата 128×128 .

При изготовлении матриц формата 128×128 и более серьезно ужесточаются требования к исходному материалу как по однородности электрофизических параметров, так и по качеству поверхности. При наличии неполадок или выступов на поверхности высотой более

Таблица 2. Основные характеристики матричных фотоприемных устройств формата 32×32 (НИИПФ, 1988–1992 гг.)

Граничная длина волны, мкм	Шаг, мкм	Токовая чувствительность, А Вт ⁻¹	Обнаружительная способность, см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹	$T_{\text{раб}}, \text{ К}$
2,8	70	1,1	$2,4 \times 10^{10}$	300
4,0	70	1,5	$2,5 \times 10^{10}$	190
9,4	150	3,0	$4,1 \times 10^{10}$	80
1,5	70	4,0	$1,7 \times 10^{10}$	80
13,0	150	5,2	$1,1 \times 10^{10}$	80

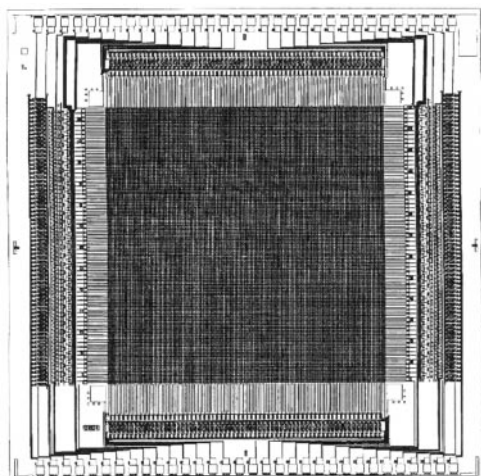


Рис. 16. "Смотрящая" фотодиодная матрица 128×128 (НИИПФ, 1996 г.).

2–3 мкм образцы становятся непригодными для проведения операции стыковки с кремниевыми мультиплексорами. Во второй половине 90-х годов была разработана технология изготовления матричных приемников с числом элементов от 128×128 до 384×288 [48] (рис. 16). Средние значения удельной обнаружительной способности при $T = 80$ К составляют $4,2 \times 10^{10}$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹, число дефектных каналов менее 3 %. Измеренное значение эквивалентной шуму разности температур, т.е. разрешимый температурный контраст $\Delta T < 0,1$ К.

Практически одновременно со "смотрящими" матрицами в НИИ прикладной физики были начаты разработки многорядных матриц формата $M \times N$ (M — число строк, N — число элементов в строке) для режима временной задержки и накопления (ВЗН) в системах с оптико-механическим сканированием. Разрабатывалось несколько вариантов матрицы формата $M \times N$: $4 \times N$ и $2 \times 2N$. Различие между ними показано на рис. 17. В отличие от приемников с внутренним интегрированием фотосигналов здесь происходит суммирование сигналов от элементов, расположенных в столбцах. В результате обнаружительная способность прибора возрастает примерно в $\sqrt{M}$ раз. В приемниках формата $4 \times N$ и $2 \times 2N$ обнаружительная способность, следовательно, в 2–1,4 раза выше по сравнению с приборами формата $1 \times N$. Приборы формата $4 \times N$ имеют большую обнаружительную способность, но требуют чересстрочного сканирования.

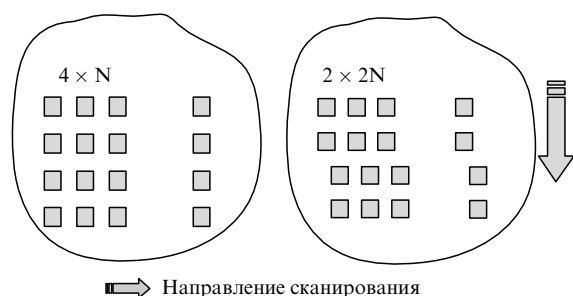


Рис. 17. Топология ВЗН-матриц формата $4 \times N$ и $2 \times 2N$.

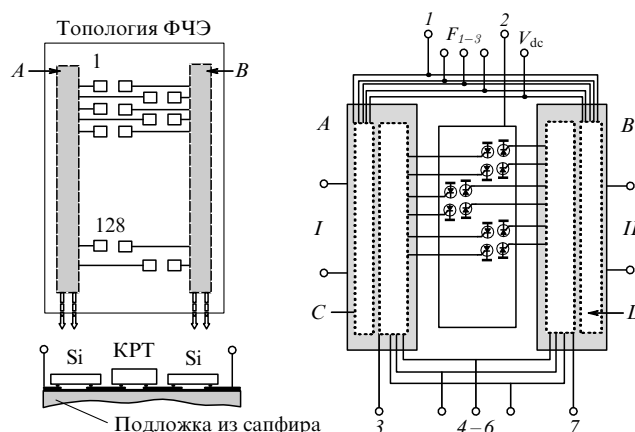


Рис. 18. Узел фоточувствительных элементов (ФЧЭ) ВЗН-матрицы из КРТ формата 2×256 : A — мультиплексор элементов 1...128 и 257...384; B — мультиплексор элементов 129...256 и 385...512; C , D — сдвиговые регистры; I , II — выходы мультиплексированных фотосигналов; 1 , 2 — общие выводы матрицы ФД и сдвиговых регистров; F_{1-3} , V_{dc} — импульсные напряжения и постоянное напряжение для управления сдвиговыми регистрами; 3 , 7 — шины управления напряжением смещения фотодиодов; $4-6$ — шины управления считыванием фотосигналов.

Для объединения ВЗН-матриц фотодиодов, имеющих прямоугольную форму (порядка 4×12 мм), с кремниевыми мультиплексорами разработана специальная технология стыковки через промежуточный сапфировый растр, на металлических дорожках которого выращиваются индиевые микроконтакты (рис. 18). К концу 90-х годов в НИИ прикладной физики были разработаны матричные фотоприемные устройства из КРТ формата 4×16 , 2×32 , 4×48 , 2×96 , 4×128 , 2×256 .

Серьезную проблему при создании тепловизионных матриц составила разработка методов и оборудования для контроля их параметров, существенно отличающихся от ранее разработанных для малоэлементных приборов. Действительно, доступ к фотодиодам (число которых в матричном фотоприемнике 384×288 превышает 100 тыс) возможен только через кремниевый мультиплексор, сдвиговый динамический регистр которого может подключить один элемент к измерительной системе на доли секунды, а затем переключает вход измерительной системы на другие элементы. Для вычитания мультиплексированного сигнала из темновых токов становится обязательным использование микропроцессорной цифровой обработки. ВЗН-матрицы имеют выходные шины, на которые параллельно выводятся сигналы от каждой линейки, содержащей от 16 до 128 чувствительных элементов. Такая организация работы фотоприемного модуля требует для измерения параметров каждого элемента применения стробирующих методов, позволяющих выделять и измерять в исследуемом видеосигнале заранее выбранный участок, относящийся к конкретному фоточувствительному элементу. В 1990–1999 гг. в НИИ прикладной физики были разработаны принципы построения гибких автоматизированных измерительных систем, позволяющих исследовать матричные приемники на частотах 10–50 кадров с⁻¹ (В.Н. Соляков, К.О. Болтарь).

В таблице 3 представлены недавние результаты по созданию матриц в НИИ прикладной физики.

Таблица 3. Параметры матриц из КРТ (НИИПФ, 2002 г.)

Число элементов	Топология	Размер элемента, мкм	Шаг, мкм	Граничная длина волны, мкм	Апертурный угол	Обнаружительная способность, см Гц ^{1/2} Вт ⁻¹
32 × 32	N × N	40 × 40	70	10,5	60°	(3–4) × 10 ¹⁰
128 × 128	N × N	30 × 30	35	10,5	60°	(3–4) × 10 ¹⁰
384 × 288	N × N	30 × 30	35	10,5	60°	(2–3) × 10 ¹⁰
4 × 48	4 × N	30 × 30	60	10–10,5	60°	≥ 7 × 10 ¹⁰
2 × 96	2 × 2N	30 × 30	60	10–10,5	51°	≥ 5 × 10 ¹⁰
2 × 256	2 × 2N	35 × 35	70	10,5 11,5 12,5	64°	(4–5) × 10 ¹⁰

В первой половине 80-х годов в работы по проблеме матричных фотоприемников включился Сибирский НИИ оптических систем (НИИОС, г. Новосибирск), занявшийся разработкой методов и средств обработки тепловизионных изображений, получаемых с использованием многоэлементных приемников из КРТ. Спецификой ИК-диапазона и фотоприемных устройств, используемых в этом диапазоне, является превышение, иногда значительное, фоновых и темновых составляющих сигнала над полезным сигналом. Другая особенность связана со значительной разницей между элементами по чувствительности и темновому току, что дает структурный шум, который маскирует изображение объектов на малоcontrastной тепловой сцене. Это потребовало разработки алгоритмов, схемотехники и создания специальных микропроцессорных устройств, обеспечивающих выравнивание неравномерности чувствительности элементов, привязку к нулевому уровню, вычитание фоновой составляющей, "замену" дефектных каналов и других методов (И.С. Гибин, А.Н. Потапов, Н.М. Малеев и др.) [50].

В настоящее время матричные устройства на основе фотодиодов из КРТ представляют собой сложные фотоэлектронные информационные комплексы, в состав которых помимо матрицы фотодиодов и охлаждаемой микроэлектроники считывания фотосигналов входят микрокриогенная система охлаждения и специальные микропроцессорные цифровые устройства, обеспечивающие на выходе последовательность тепловизионных сигналов в стандартном телевизионном формате.

4. Гибридные линейчатые приемники.

Приборы на основе МДП- и МТДП- структур

Во второй половине 80-х годов в НИИ прикладной физики было развито еще одно направление по приемникам с микроэлектроникой предварительной обработки фотосигналов, расположенной в зоне чувствительных элементов из КРТ. Основной задачей являлась разработка технологических процессов изготовления фотоприемников с числом элементов до 128 с внутренней коммутацией фотосигналов в холодной зоне, что резко снижало число выводов из вакуумированной полости. Это повышало надежность конструкции, снижало теплопритоки (темы "Рубеж", "Селенга", научный руководитель В.П. Пономаренко). Узел фоточувствительных элементов одного из таких фотоприемников показан на

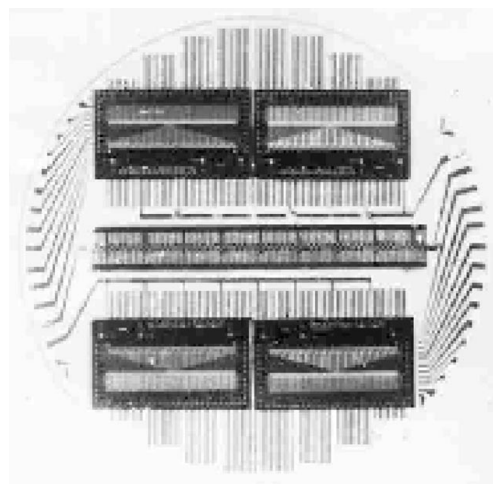


Рис. 19. Узел фоточувствительных элементов гибридного фотоприемника на основе фотодиодов из КРТ ("Рубеж") с числом элементов 1 × 128 (НИИПФ, 1989 г.).

рис. 19. В центре сапфирового раstra расположена линейка фотодиодов с числом элементов 1 × 128, а по разные стороны от нее две пары 32-канальных МОП-коммутаторов на основе транзисторных ключей и соответствующие регистры сдвига. Число выводов из холодной зоны приемника не превышает 30.

В качестве чувствительных элементов таких гибридных приемников использовались фотодиоды с р–п-переходом, а также новый тип диодных структур — фотодиоды Шотки с туннельно-прозрачным слоем диэлектрика (МТДП), разработанные при выполнении темы "Рубеж". Классические барьеры Шотки, получаемые при нанесении различных металлов на поверхность КРТ, не имели распространения из-за высокой плотности поверхностных состояний на границе КРТ–металл. Наличие сверхтонкого пассивирующего слоя между металлом и КРТ могло устранить этот недостаток и привести к созданию нового типа высокочувствительных элементов для регистрации ИК-излучения. При толщинах диэлектрика 5–9 нм барьер для носителей, образованный таким сверхтонким диэлектрическим слоем, настолько узок, что они легко туннелируют сквозь него. Перспективными для использования в качестве туннельно-прозрачных пассивирующих слоев оказались

оксиды и фториды, полученные плазменным анодированием поверхности, "несобственные" диэлектрики Al_2O_3 и SiO_2 . Были изготовлены фоточувствительные структуры с числом элементов 2×128 на основе таких МТДП-фотодиодов со средними значениями обнаружительной способности $D_{\lambda, \max}^* = 3 \times 10^{10} \text{ см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ [56]. МТДП-диоды оказались эффективными источниками инжекции электронов, что позволило использовать их в качестве сток-источковых элементов в полевых транзисторах на основе р-КРТ. В результате в конце 80-х годов был создан новый тип полевых транзисторов со структурой МТДП на основе узкозонных твердых растворов [57].

Первые сведения о создании полевых транзисторов с изолированным затвором на основе объемных монокристаллов и эпитаксиальных слоев КРТ за рубежом относятся к 1980 г. [51, 52], а в 1989 г. было даже опубликовано сообщение о создании простейшей цифровой микросхемы, построенной из транзисторов на КРТ [53].

Работы по созданию транзисторов на основе КРТ были начаты в НИИ прикладной физики в 1984 г. (тема "Селенга"). К 1986 г. были получены первые n-канальные МДП-транзисторы с длиной канала $L = 60 \text{ мкм}$ [54] (рис. 20). Одной из центральных проблем при их создании оказалась проблема разработки МДП-структуры затвора. Качество границы раздела в таких структурах должно быть исключительно высоким, чтобы обеспечить эффективный перенос инжектированных носителей от истока к стоку. Был исследован целый ряд методов создания подзатворных диэлектриков: плазменное анодирование и фторирование, нанесение Al_2O_3 , SiO_2 различными способами и другие методы. В конце концов наиболее технологичным оказался метод высокочастотного магнетронного нанесения пленок Al_2O_3 в кислородсодержащей плазме. Здесь были реализованы следующие параметры границы раздела Al_2O_3 –КРТ: плотность положительного фиксированного заряда $Q_{\text{fc}} = (3-6) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, плотность быстрых поверхностных состояний $N_{\text{fs}} < 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$, плотность медленных поверхностных состояний $N_{\text{ss}} \sim 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$. Это позволило впервые в Советском Союзе изготовить полевые длинноканальные транзисторы на основе р- $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ с удельной крутизной выходных характеристик на линейном участке $g^* = 1,4 - 1,5 \text{ мА В}^{-2}$ (И.В. Шиманский, Е.А. Салмин, В. П. Пономаренко).

Такие структуры оказались исключительно полезными при исследованиях явлений переноса неосновных носителей заряда в приповерхностных слоях узкозонных твердых растворов. Были обнаружены и исследованы новые квантоворазмерные эффекты вблизи

границы раздела диэлектрик–р-КРТ. Здесь из-за малой эффективной массы длина волны электрона $\lambda_n = h/2\pi(m_n^*kT)^{1/2}$ оказывается сравнимой с толщиной области пространственного заряда в приповерхностной области МДП-структуры $l_n = kT/qE_s$ (E_s — поперечное поле вблизи поверхности МДП-структуры). Вследствие этого полевые зависимости подвижности электронов в инверсионных каналах (например в подзатворной области транзистора) имеют ряд особенностей, обусловленных двумерностью электронного газа и квантованием движения в направлении, перпендикулярном поверхности. Эти исследования позволили установить основные закономерности явлений переноса носителей заряда в приповерхностных слоях узкозонных твердых растворов [55].

5. Заключение

Последнее десятилетие можно охарактеризовать как период стремительного и плодотворного развития технологий теллурида кадмия–ртути и приборов на его основе. Основа, заложенная в 60–80-е годы специалистами НИИ прикладной физики, ГИРЕДМЕТА, Сибирского НИИОС, завода чистых металлов и многих других организаций, несмотря на сложный период реорганизации науки и промышленности в стране, позволила решить крупную научно-техническую проблему по созданию элементной базы для нового поколения приборов тепловидения, тепlopеленгации, лазерной локации и связи, высокосоввершенных монокристаллов и эпитаксиальных слоев КРТ и инфракрасных матричных фотоприемных устройств на их основе. Несмотря на изобилие новых идей и методов регистрации ИК-излучения в диапазоне 8–14 и 3–5 мкм (квантовые ямы, сверхрешетки на основе широкозонных полупроводников и другие структуры), эти приборы вместе с фотоприемниками на основе InSb , PbSe , PbS , PtSi и микроболометрами вероятнее всего будут доминировать в оптико-электронном приборостроении ближайшего будущего.

Возможности рассмотренных в статье технологий далеко не исчерпаны. В ближайшем будущем их использование приведет к созданию более крупноформатных матричных приборов для тепловидения. Не исчерпаны и возможности фоторезисторных технологий, где использование идей и методов объединения фоточувствительных элементов с кремниевой охлаждаемой микроэлектроникой обработки фотосигналов, первоначально развитых для фотодиодов, может привести к созданию многоэлементных гибридных фоторезисторов с числом элементов 10^3 и более.

Список литературы

1. Бовина Л.А., Стафеев В.И., в сб. *Физика соединений $A^{II}B^{VI}$* (Под ред. А.Н. Георгобиани, М.К. Шейнкмана) (М.: Наука. Физматлит, 1986) с. 246
2. Курбатов Л.Н. *Вопросы оборонной техники, Сер. XI* (1–2) 3 (1998)
3. Курбатов Л.Н. *Прикладная физика* (3) 5 (1999)
4. Барышев Н.С. *Свойства и применение узкозонных полупроводников* (Казань: УНИПРЕСС, 2000)
5. Kane E.O. *J. Phys. Chem. Solids* **1** 249 (1957)
6. Lawson W.D. et al. *J. Phys. Chem. Solids* **9** 325 (1959)
7. Шнейдер А.Д., Гавришак И.В. *ФТТ* **2** 2079 (1960)
8. Verie C., Ayas J. *Appl. Phys. Lett.* **10** 241 (1967)

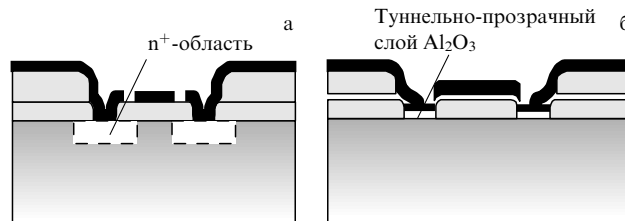


Рис. 20. Полевые транзисторы из КРТ, разработанные в НИИПФ (1988 г.): (а) n-канальный полевой МДП-транзистор из р- $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$; (б) n-канальный полевой транзистор со структурой МТДП из р- $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$.

9. Родо М *Полупроводниковые материалы* (М.: Металлургия, 1971)
10. Бовина Л А, Зайтов Ф А, Стафеев В И, в сб. *Проблемы физики соединений $A^{II}B^{VI}$* . Ч. 1 (Ред. А Ю Шилейка) (Вильнюс: Изд-во ВГУ, 1972) с. 165
11. Бовина Л А, Зайтов Ф А, Стафеев В И *Изв. АН СССР, Сер. Неорганические материалы* **9** (12) 2232 (1973)
12. Бовина Л А, Зайтов Ф А, Стафеев В И, в сб. *Тезисы докл. III Всесоюз. симпозиума по полуметаллам и полупроводникам с малой шириной запрещенной зоны* (Львов: Изд-во ЛГУ, 1972) с. 32
13. Бовина Л А и др., в сб. *Проблемы физики соединений $A^{II}B^{VI}$* . Ч. 2 (Ред. А Ю Шилейка) (Вильнюс: Изд-во ВГУ, 1972) с. 111
14. Бовина Л А и др., в сб. *Тезисы докл. III Всесоюз. симпозиума по полуметаллам и полупроводникам с малой шириной запрещенной зоны* (Львов: Изд-во ЛГУ, 1972) с. 5
15. Бовина Л А и др. *ФТП* **7** 2301 (1973)
16. Горелик Л И и др. *Прикладная физика* (3) 47 (1999)
17. Гуцина В П, Лакеенков В М, Пелевин О В, в сб. *Труды VII Всесоюз. симпозиума по полуметаллам и полупроводникам с малой шириной запрещенной зоны* (Львов: Изд-во ЛГУ, 1986) с. 41
18. Никитин М С и др. "Фотоприемник", Авт. свид. № 1127489 от 01.08.1984
19. Бовина Л А, Никитин М С, в сб. *Труды V Всесоюз. симпозиума по полуметаллам и полупроводникам с малой шириной запрещенной зоны* (Львов: Изд-во ЛГУ, 1980) с. 129
20. Пономаренко В П, Стафеев В И *Труды МФТИ, Сер. Радиотехника и электроника* **7** 57 (1974)
21. Бовина Л А, Савченко Ю Н, Стафеев В И *ФТП* **9** 2084 (1975)
22. Белоусова О Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **20** 370 (1974)
23. Брандт Н Б и др. *ЖЭТФ* **66** 330 (1974)
24. Бовина Л А, Пономаренко В П, Стафеев В И *ФТП* **12** 2207 (1978)
25. Пономаренко В П и др. *ФТП* **13** 441 (1979)
26. Сагинов Л Д и др. *ФТП* **16** 710 (1982)
27. Elliott C T, in *Int. Electron Devices Meeting, San Francisco, CA* (1982) p. 132
28. Трошкин Ю С и др. *Прикладная физика* (2) 63 (1999)
29. Бовина Л А и др. *ФТП* **7** 40 (1973)
30. Головин С В и др. *Оптический журн.* **63** (6) 56 (1996)
31. Бенюшис Т И и др. *Письма в ЖТФ* **15** (6) 59 (1989)
32. Ovsyuk V N et al. *Proc. SPIE* **4340** 15 (2001)
33. *Оружие России* Каталог. Спец. вып. Конструкторское бюро приборостроения (Под ред. А Г Шипунова) (Тула: Изд-во Военный парад, 1997)
34. Kinch M A et al. *Infrared Phys.* **20** 1 (1980)
35. Lewis A, Roberts G, in *Int. Electron Devices Meeting, Washington, DC* (1981) p. 176
36. Jamison J A *Opt. Eng.* **25** 688 (1986)
37. *Приборы с зарядовой связью* (Под ред. Д Ф Барба) (М.: Мир, 1982) с. 40
38. Бовина Л А и др., в сб. *Примеси и дефекты в узкозонных полупроводниках. Материалы Всесоюз. семинара АН СССР по проблеме "Физика и химия полупроводников"* (Павлодар: Ромайор, 1987) с. 18
39. Бочкарев Э П, Лакеенков В М, Пелевин О В, в сб. *Материалы VII конф. по процессам роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок, Новосибирск, 9–13 июня 1986 Т. 2* (Новосибирск: Изд-во Института неорганической химии АН СССР, 1986) с. 4
40. Lakeenkov V M et al. *J. Cryst. Growth* **197** 443 (1999)
41. Болтарь К О и др., в сб. *Материалы VIII Всесоюз. симпозиума по полуметаллам и полупроводникам с малой шириной запрещенной зоны* (Львов: Изд-во ЛГУ, 1991) с. 14
42. Бовина Л А, Головин С В, в сб. *Материалы VIII Всесоюз. симпозиума по полуметаллам и полупроводникам с малой шириной запрещенной зоны* (Львов: Изд-во ЛГУ, 1991) с. 9
43. Акимов В М и др. *Прикладная физика* (3) 25 (1999)
44. Акимов В М и др. *Прикладная физика* (1) 3 (1999)
45. Koehler T et al. *Proc. SPIE* **244** 153 (1980)
46. Хряпов В Т и др. *Оптический журн.* **59** (12) 33 (1992)
47. Khryapov V T et al. *Opt. Eng.* **31** 678 (1992)
48. Бовина Л А и др. *Прикладная физика* (3) 41 (1999)
49. Бовина Л А, Стафеев В И *Прикладная физика* (2) 58 (1999)
50. Gibin I S *Proc. SPIE* **2051** 460 (1993)
51. Nemirovsky Y, Margalit S, Kidron I *Appl. Phys. Lett.* **36** 466 (1980)
52. Williams G M, Gertner E R *Electron. Lett.* **16** 839 (1980)
53. Schiebel R A, Dodge J, Gooch R *Electron. Lett.* **25** 530 (1989)
54. Пономаренко В П, Шиманский И В, Стафеев В И *ФТП* **22** 62 (1988)
55. Пономаренко В П и др. *ФТП* **23** 189 (1989)
56. Пономаренко В П, Ключко И В, Петрова Е Г, в сб. *Материалы VIII Всесоюз. симпозиума по полуметаллам и полупроводникам с малой шириной запрещенной зоны* (Львов: Изд-во ЛГУ, 1991) с. 39
57. Салмин Е А, Пономаренко В П, Стафеев В И *ФТП* **22** 1142 (1988)

Cadmium mercury telluride and the new generation of photoelectronic devices

V.P. Ponomarenko

State Research Center of Russian Federation,
Federal State Unitary Enterprise "RD&P Center "Orion"
46/2 Entuziastov sh., 111123 Moscow, Russian Federation
Tel. (7-095) 176-22 11, Fax (7-095) 368-80 80
E-mail: root@orion.extech.msk.su

Progress over the period 1969–2002 in developing semiconductor solid solutions of cadmium mercury tellurides (single crystals and epitaxial layers) and in designing IR photodetectors based on this technology (photoresistors and photodiodes, including matrix ones) is reviewed.

Bibliography — 57 references

PACS numbers: **01.65. + g**, 07.57.Kp, 85.60.Gz

Received 4 December 2002