

# Фотоэлектроника

УДК 621.383:621.384.3

## Третье поколение ИК-приемников на базе HgCdTe

Часть I

А. Рогальский

Институт прикладной физики, Военно-технологический университет, г. Варшава, Польша

*До настоящего времени два семейства многоэлементных приемников на базе HgCdTe (КРТ) используются для военных и гражданских целей в ИК-области спектра: одно — для сканирующих систем (первое поколение), другое — для смотрящих систем (второе поколение). В общем понимании ИК-системы третьего поколения обладают лучшими возможностями: большее количество элементов изображения, большие скорости прохождения кадров, лучшее тепловое разрешение, а также многоцветные функциональные возможности и другие функции, обеспечиваемые с помощью микросхем. В статье рассмотрены вопросы, связанные с разработкой и эксплуатацией приемников третьего поколения на базе КРТ. Основные требования, направленные на создание устройств с многоцветными функциональными возможностями, касаются усложненных структур этих устройств, выращивания более толстых и многослойных материалов, большей трудоемкости при создании устройств, особенно когда увеличивается размер матрицы и уменьшается размер элемента изображения. Также описаны технические разработки, которые являются ключевыми для устройств третьего поколения: травление, эпитаксия из паровой фазы, концепции улучшенного считывания.*

Так как технология создания ИК-приемников продолжает совершенствоваться, то имеется растущая потребность в многоспектральных приемниках для улучшенных ИК-систем с лучшим распознаванием и идентификацией целей. Приемники на базе КРТ предлагают большую гибкость при выборе рабочей длины волны и многоцветные функциональные возможности от ближней ИК-области до дальней длинноволновой.

Многоцветные функциональные возможности очень желательны для улучшенных ИК-систем. Системы, регистрирующие данные в отдельных полосах ИК-области спектра, могут определять как абсолютную температуру, так и уникальные признаки объектов в наблюдаемой картине. С обеспечением нового уровня контраста многополосное обнаружение также позволяет с помощью улучшенных алгоритмов обработки цветных сигналов увеличивать чувствительность по сравнению с одноцветными устройствами. Это чрезвычайно важно для процесса идентификации разности температур между такими объектами ракеты, как головные части и ложные цели. Многоспектральные ИК-фокальные матрицы могут также выполнять много важных задач при дистанционном исследовании Земли и планет, в астрономии и т. д. [1, 2].

В настоящее время при обработке данных многоспектральных систем используются сложные методики создания изображения, которые либо распределяют оптический сигнал по многоэлементным ИК-фокальным матрицам, либо используют кольцевой фильтр для спектрального анализа изображения, сфокусированного на одной фокальной матрице. Эти системы содержат разделители пучка, линзы и полосовые фильтры в оптическом ходе лучей для фокусировки изображений на отдельных фокальных матрицах, работающих в различных областях ИК-спектра. Также требуется сложная операция выравнивания, чтобы отобразить многоспектральное изображение от пикселя к пикселю. Следовательно, эти подходы являются дорогостоящими, имея в виду размер, сложность и требования, предъявляемые к охлаждению.

Как фотодиоды на базе КРТ, так и ИК-фотоприемники со структурой на квантовых ямах (QWIP) обеспечивают многоцветные функциональные возможности в ИК-области спектра на средних и длинных волнах. Каждая из этих технологий имеет свои преимущества и недостатки. QWIP-технология базируется на хорошо разработанной системе материала  $A^3B^5$ , которая имеет большую промышленную базу с целым

рядом возможностей использования для военных и гражданских целей. Материал КРТ используется только для фотоприемников. Поэтому QWIP-фотоприемники легче создать, обеспечив высокие эффективность и работоспособность, хорошую однородность и меньшую стоимость. С другой стороны, фокальные матрицы на базе КРТ имеют более высокие квантовую эффективность, рабочую температуру и возможность для получения наилучших характеристик. Более подробное сравнение обеих технологий дано в работах Tidrow и др. [3] и Рогольского [4, 5].

### Современное состояние ИК-систем первого и второго поколений на базе HgCdTe

Для основных военных и гражданских применений в ИК-области спектра можно рассмотреть два семейства многоэлементных приемников: одно используется для сканирующих систем, а другое — для смотрящих систем. Самая простая сканирующая линейная фокальная матрица представляет собой ряд приемников с общими мультиплексорами: первый — на выходе, второй — на входе фокальной матрицы (рис. 1, а). Изображение создается сканированием рассматриваемой картины поперек линейки с использованием, как правило, механического сканера. При стандартных скоростях прохождения видеокадров каждый элемент изображения (приемник) работает в режиме накопления очень короткое время, и все заряды приводятся в соответствие. Смотрящая матрица представляет собой двумерную матрицу (2-D) чувствительных элементов приемника (рис. 1, б), которые сканируются электронной схемой. Эти типы матриц могут обеспечить повышенную чувствительность и дать выигрыш в массе камеры. Отношение сигнал-шум сенсора увеличится как квадратный корень из числа элементов приемника в матрице до такой степени, что они смогут регистрировать пропорционально большее количество сигналов от рассматриваемой картины.

Сканирующая система, которая не имеет функций мультиплексирования в фокальной плоскости, принадлежит к системам первого поколения. Типичным примером этого вида приемника является линейная фотопроводящая матрица, в которой электрический контакт для каждого элемента многоэлементной матрицы выводится из охлаждаемой фокальной матрицы наружу, где имеется один электронный канал при окружающей температуре для каждого элемента приемника. Матрицы США на базе об-

щего КРТ-модуля имеют 60, 120 или 180 фотопроводящих элементов в зависимости от использования. Фотопроводники из КРТ вошли в производство в конце 70-х годов XX века после создания репродуцированных методов выращивания объемных материалов и пассивации поверхности окислом анода. Структура фотопроводящего устройства показана на рис. 2, где металлические электроды подводятся к чистому материалу с проводимостью *n*-типа, толщина которого уменьшена до ~10 мкм. Стандартные фотоприемники пассивируются анодным окислом и, кроме того, на них наносится антиотражающее покрытие из сульфида цинка.

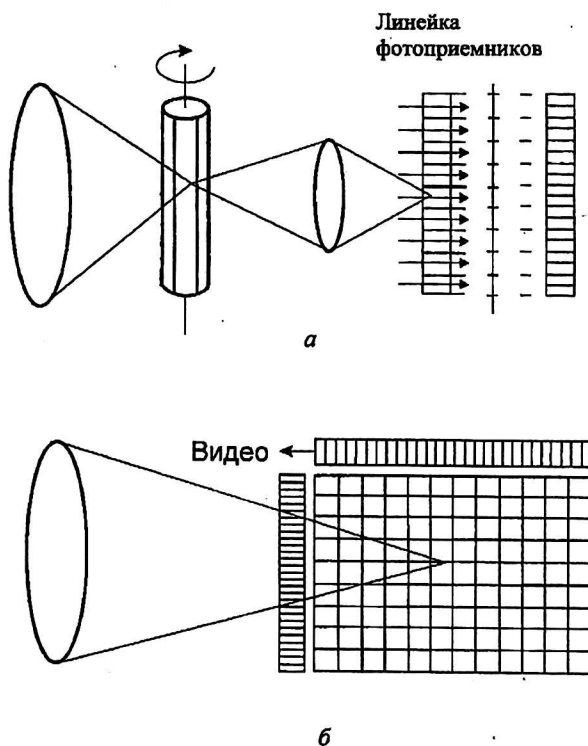


Рис. 1. Фокальная матрица: а — сканирующая; б — смотрящая

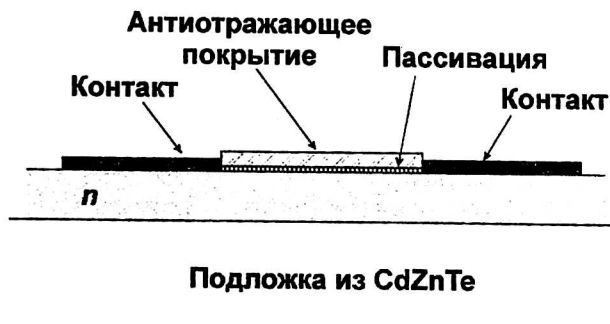


Рис. 2. Поперечное сечение фоторезистора из КРТ

Системы промежуточного класса также изготавливаются с мультиплексируемыми сканируе-

мыми линейными матрицами фотоприемников и, как правило, с функциями временной задержки и накопления (ВЗН). Типичными примерами этих систем являются многолинейные  $288 \times 4$  матрицы на базе КРТ, изготовленные фирмой Sofradir для спектральных диапазонов 3–5 и 8–10,5 мкм с обработкой сигналов в фокальной плоскости (накопление фототока, считывание, разбиение; ВЗН-функция, предварительное усиление выходных сигналов и некоторые другие).

Второе поколение устройств на базе КРТ представляет собой двумерные матрицы фотодиодов. Эта технология появилась в конце 70-х годов и в последующее десятилетие привела к большому выпуску продукции. ИК-фотодиоды для работы на длинных волнах, имеющие умеренный импеданс (произведение сопротивления на площадь или  $R_0A$ ) на уровне  $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ , могут стыковаться с кремниевыми матрицами считывания с помощью индиевых столбиков на уровне чувствительных элементов.

В середине 70-х годов впервые продемонстрирована архитектура гибридной фокальной матрицы (рис. 3), где осуществлена стыковка с

помощью индиевых столбиков считывающей электроники, что обеспечивает мультиплексирование сигналов от тысяч чувствительных элементов на несколько строк на выходе, значительно упрощая связь между вакуумированным криогенным сенсором и электроникой системы. Материал приемника и мультиплексор имеют оптимальные характеристики независимо друг от друга. Другими преимуществами гибридных фокальных матриц являются почти 100%-ные коэффициенты заполнения и увеличенная площадь для обработки сигналов на чипе мультиплексора.

Приемники с гибридными фокальными матрицами и мультиплексоры также изготавливаются с использованием петлевого соединения. В этом случае приемник и чип мультиплексора склеиваются вместе для формирования единого чипа перед изготовлением приемника. Фотовольтаический приемник формируется путем ионной имплантации, а углубления для петлевых соединений создаются ионным травлением. Технология контурных соединений предлагает более стабильные механические и тепловые характеристики, чем гибридная архитектура перевернутого кристалла.

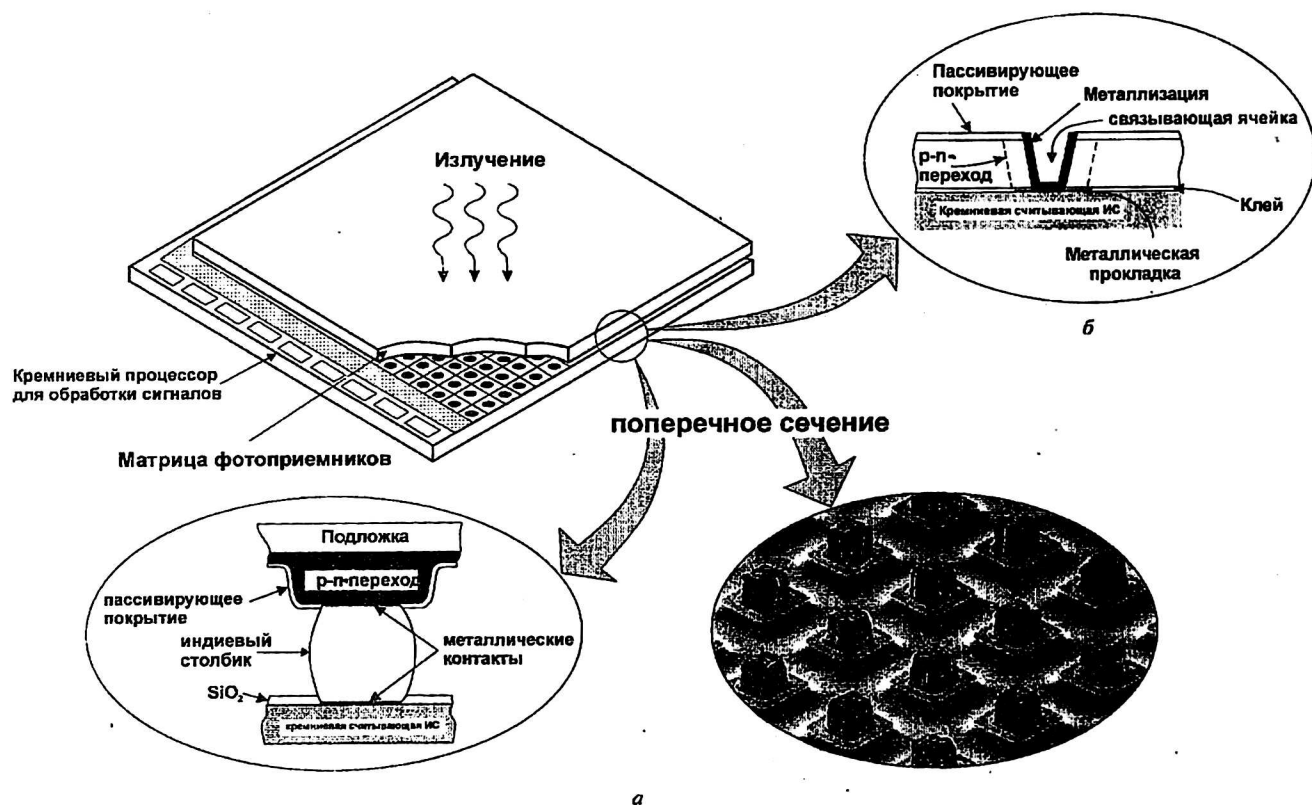


Рис. 3. Гибридная ИК-фокальная матрица с оптимизированным обнаружением сигнала и считыванием: а — технология с индиевыми столбиками; б — контурная технология

КМОП-мультиплексоры являются наилучшим выбором для выполнения накопления и обработки сигналов для двумерных матриц. Преимуществом КМОП-структуры является то, что существующие производства, которые создают специфические интегральные схемы, могут быть успешно использованы и адаптированы к заданным конструктивным размерам. Интегральные схемы с минимальным конструктивным размером 0,25 мкм находятся в производстве, а интегральные схемы с минимальным конструктивным размером 0,18 мкм — в процессе подготовки производства. В результате схемы с такими размерами больше подходят для отдельных ячеек мультиплексоров видимого и ИК-диапазонов спектра, обеспечивая меньший размер ячеек, что позволяет создавать матрицы большего формата.

В настоящее время КМОП-структура с минимальными элементами  $\leq 0,5$  мкм дает возможность также создавать монолитные КМОП-устройства изображения для видимого диапазона, так как фотолитография с большей плотностью упаковки позволяет выделять сигнал с низким уровнем шума и производить обнаружение на высоком уровне с высоким оптическим коэффициентом заполнения в каждом чувствительном элементе [6—9].

Инфраструктура производства кремниевых пластин, которая привела к появлению персональных компьютеров во многих домах, позволяет теперь получать изображение на базе КМОП-структур в такой аппаратуре, как видео и цифровые бесшумные камеры.

Матрица приемника может освещаться либо спереди (фотоны проходят через прозрачный кремниевый мультиплексор), либо сзади (фотоны проходят через прозрачную подложку матрицы приемника). В целом последний подход является самым предпочтительным, так как мультиплексор будет иметь участки металлизации и другие непрозрачные области, которые могут уменьшить эффективную оптическую площадь структуры. В гибридных КРТ-фокальных матрицах фотоэлектрические приемники обычно формируются из тонких эпитаксиальных слоев КРТ на прозрачных подложках из CdTe или ZnCdTe. Для гибридной технологии перевернутого кристалла при создании фокальных матриц на основе КРТ максимальный размер чипа  $\sim 10$  мм<sup>2</sup>. Для решения этой задачи разрабатывается технология PACE (productible alternative to CdTe for epitaxy) с сапфиром или кремнием в качестве подложки для приемников из КРТ.

При использовании непрозрачных материалов подложки следует делать тоньше и доводить

до уровня менее 10 мкм для получения достаточной квантовой эффективности и уменьшения оптической связи.

Несмотря на большие возможности, появившиеся при разработке больших матриц, прошло много лет, прежде чем вышли из лаборатории фотодиоды из КРТ. На рис. 4 показана эволюция во времени этой разработки, а на рис. 5 — структура фотодиода с вытравленной мезаструктурой. Контакты выполнены с  $p^+$ -слоем в каждом пикселе и со слоем  $n$ -типа на краю матрицы (не показано). Поток ИК-излучения падает через подложку, прозрачную для ИК-лучей.

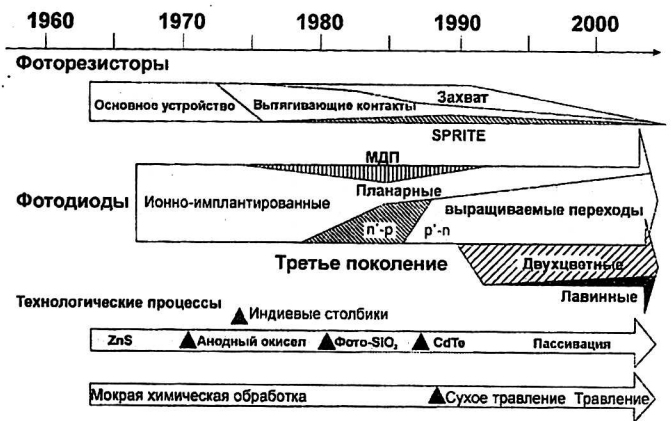


Рис. 4. Эволюция во времени трех поколений ИК-приемников из КРТ и основные способы технологии обработки [9]

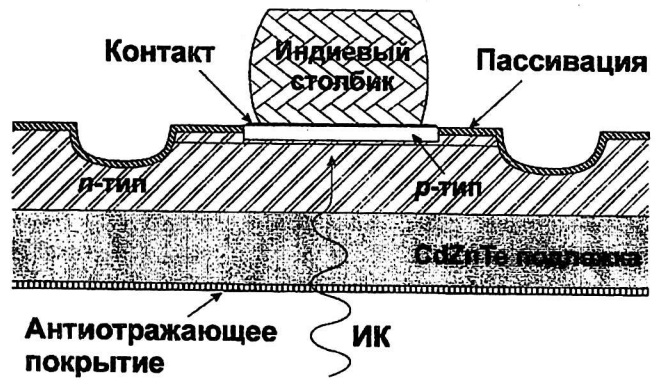


Рис. 5. Поперечное сечение КРТ-фотодиода с протравленной p-n-мезаструктурой. Активная область n-типа заключена между подложкой из CdZnTe и сильнолегированными областями с более широкими запрещенными зонами

Пассивация поверхности является основной технологией, необходимой для создания фотодиодов. При базировании на успешную пассивацию кремния усилия сначала были направлены в основном на окислы. Анодный окисел был необходим для фотопроводников из-за фиксированного положительного заряда. Что касается фотодиодов, то анодный окисел закорачивал устройства, инвертируя поверхности  $p$ -типа.

Окись кремния использовалась для пассивации фотодиодов в начале 80-х годов, базирующейся на осаждении при низкой температуре с использованием фотохимической реакции. Оказывается, однако, что превосходные свойства поверхности (с низкой плотностью состояний и превосходными свойствами фотодиодов) не могли бы сохраняться при длительном нагревании устройств в вакууме, поскольку при этом требуется сохранить хорошую вакуумную плотность. Кроме того, наращивание поверхностного заряда происходило при работе в обстановке космического излучения. Последние усилия сосредоточены главным образом на пассивации CdTe и CdZnTe. Первоначально большая новаторская работа в этой области была проделана во Франции на фирме SAT в середине 70-х годов [10, 11]. Пассивация CdTe является стабильной в циклах термообработки при вакуумировании, небольшое влияние излучения отмечается при работе в космосе. Диоды не обнаруживают изменения произведения  $R_0A$  в зависимости от размера диода, позволяя сделать вывод о том, что можно пренебречь эффектами по периметру поверхности.

Большая исследовательская деятельность направлена на приемники с двумерными матрицами, состоящими из более чем  $10^6$  элементов. ИК-фокальные матрицы номинально имеют такой же темп производства, что и интегральные схемы динамического ЗУ с доступом (ДЗУД), производство которых удваивалось примерно через каждые 18 мес.; это следствие закона Мура, который предсказывает способность удваивать интеграцию транзистора на каждой интегральной схеме примерно через каждые 18 мес., однако запаздывание по размерам составляет 5–10 лет. Это происходит по двум главным причинам. Во-первых, технология соз-

дания ДЗУД требует только одного транзистора на бит, а считывание данных в фокальной матрице требует минимум трех. Во-вторых, рынок для фокальных матриц является малой частью рынка компьютерной памяти, а предприятия, производящие считывающие устройства, обычно на один или два порядка хуже тех, которые производят чипы памяти по современной технологии.

На рис. 6 показаны тенденция увеличения размера 4-мегапиксельных ИК-фокальных матриц за прошедшие 25 лет и некоторые планы на 2000–2010 гг.

Недавно появились сообщения по ИК-фотоприемникам со структурой на квантовых ямах, имеющих размеры  $640 \times 480$  элементов изображения [12]. PtSi, InSb и KPT соответствуют темпам производства динамического ЗУ с произвольной выборкой (ДЗУПВ) с отставанием примерно на 10 лет. Фирма Rockwell разработала самую большую ИК-фокальную матрицу на базе KPT для работы на коротких длинах волн для применения в астрономии и в условиях слабого фона [13]. Формат устройства — гибридная матрица  $2048 \times 2048$  с размером одного элемента  $18 \times 18$  мкм. Четыре матрицы будут скомпонованы в конфигурацию  $2 \times 2$ , обеспечивающую  $4096 \times 4096$  элементов изображения [14]. Одна мозаичная конфигурация  $4096 \times 4096$  будет установлена в камеру на Mauna Kea, Гавайи, а другая — в тепловизоре на Gemini South в Чили. Разработка мозаичных ИК-сенсоров большого формата, высокой чувствительности для астрономии наземного базирования — цель многих обсерваторий мира (большие матрицы радикально увеличивают объем данных на выходе телескопа).

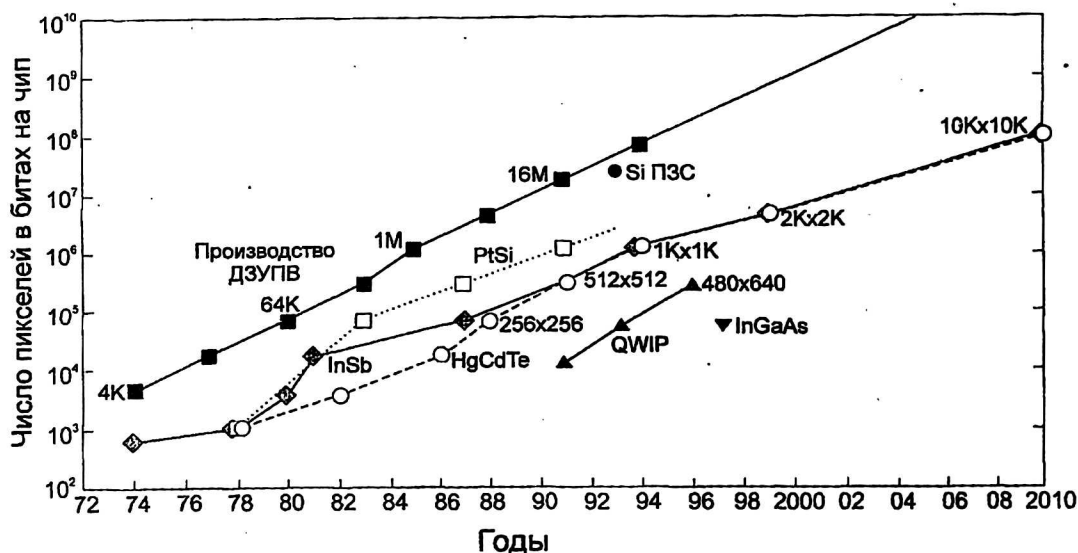


Рис. 6. Тенденция увеличения размера формата матрицы

Следует подчеркнуть, что при значительном увеличении числа элементов изображения и средних длинах волн большая часть времени или все время может использоваться для накопления сигнала. В длинноволновой ИК-области спектра поток фотонов от "сцен" на земле заполняет емкость для накопления зарядов каждой единичной ячейки в такой промежуток времени, который ограничивает преимущество при усреднении полного сигнала в "смотрящем" режиме. Даже в этом случае важно отметить улучшение по сравнению со сканируемыми сенсорами, работающими в длинноволновой ИК-области спектра.

### ИК-системы третьего поколения на базе КРТ

Определение ИК-систем третьего поколения не очень хорошо установлено. В общем понимании ИК-системы третьего поколения обеспечивают улучшенные возможности, такие как большее число пикселей, большие скорости прохождения кадров, лучшее температурное разрешение, так же как возможность работы в многоцветном режиме, и другие функции на кристалле. Согласно Reago и др. [14] третье поколение предназначено для поддержания имеющегося преимущества, которым пользуются США и вооруженные силы союзников. Этот класс устройств включает как охлаждаемые, так и неохлаждаемые фокальные матрицы [2, 15]: охлаждаемые тепловизоры с высокими характеристиками и высокой разрешающей способностью, работающие в двух или трех спектральных полосах; неохлаждаемые тепловизоры с характеристиками от среднего до высокого уровня; неохлаждаемые тепловизоры однократного применения, очень дешевые.

Далее в статье будут рассматриваться результаты, связанные с разработкой многоцветных устройств на базе КРТ.

*Влияние эпитаксиального выращивания на разработку систем третьего поколения.* На рис. 7 показана эволюция во времени технологий выращивания кристаллов КРТ. Исторически выращивание кристаллов КРТ было главной проблемой в основном из-за сравнительно высокого давления Hg в процессе выращивания, что затрудняет контроль за стехиометрией и составом выращиваемого материала. Методики эпитаксиального выращивания в сравнении с методиками объемного выращивания предлагают возможность выращивания эпитаксиальных слоев большой площади и усложненных структур для устройств с хорошей боковой гомогенностью, неровным и сложным составом и профилями

распределения легирующей примеси, конфигурация которых может улучшить характеристики фотоприемников. Выращивание происходит при низких температурах, что дает возможность уменьшать плотность собственных дефектов. Процессы выращивания при низких температурах, такие как молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и охлаждение из химических паров металлоорганических соединений, а также высокотемпературные процессы, включая жидкофазную эпитаксию (ЖФЭ), испытывают воздействие этой проблемы.

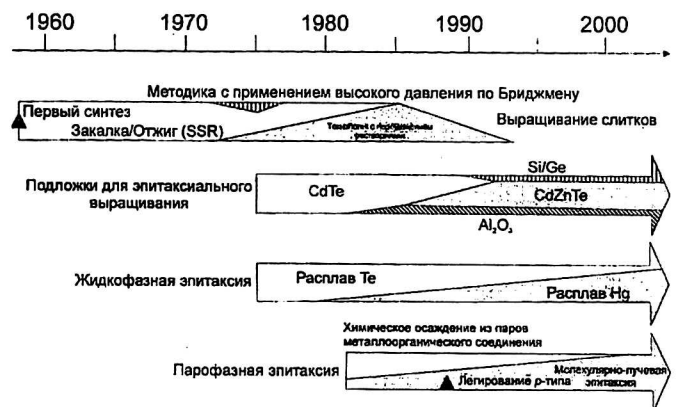


Рис. 7. Эволюция технологии выращивания кристаллов из КРТ (1960—2000 гг.)

Выращивание тонкого слоя методом ЖФЭ на подложках из CdTe началось в начале 70-х годов и продолжалось до их середины. Первоначально растворы Te с растворенным Cd (Cd хорошо растворяется в Te) и насыщенные парами Hg использовались для эффективного выращивания КРТ в температурном диапазоне 420—600 °С. Это позволило использовать расплавы, небольшие по объему с применением скользящих контактов, которые значительно не расходуются во время выращивания. Эксперименты, где используется ЖФЭ с растворителем Hg, начались в конце 70-х годов. Из-за ограниченной растворимости Cd в Hg объем расплавов Hg должен быть гораздо больше объема расплавов Te (обычно около 20 кг), чтобы уменьшить обеднение расплава во время выращивания слоев при температуре 380—500 °С. Это мешало выращиванию с применением скользящих контактов, и эпитаксия из расплава Hg была разработана с использованием больших сосудов для погружения. Четыре слоя (каждый площадью 30 см<sup>2</sup>) общей площадью 120 см<sup>2</sup> могут быть выращены за одну операцию [16].

В начале 90-х годов выращивание слитков было заменено ЖФЭ, что очень подходит для приемников первого и второго поколений. Метод ЖФЭ был успешно применен при изготов-

лении двухслойных  $p$ - $n$ -фотодиодов с гетеропереходами (см. рис. 4), где верхний защитный слой  $p^+$  формируется с использованием мышьяка в качестве легирующей примеси. Однако технология ЖФЭ ограничивает разнообразие улучшенных структур из  $\text{HgCdTe}$ , требующихся для приемников третьего поколения. В ходе ЖФЭ обычно расплавляется тонкий слой нижележащего материала, и каждый раз дополнительный слой наращивается как результат сравнительно высокой температуры выращивания. Кроме того, градиент значений  $x$  в базовом слое  $p^+$ - $n$ -перехода может вызывать перенос барьера в определенных случаях из-за взаимной диффузии [17]. Эти ограничения обеспечили возможность использования парофазной эпитаксии (ПФЭ), МЛЭ и химического осаждения из паров металлоорганических соединений.

Эра МЛЭ и химического осаждения из паров металлоорганических соединений началась в начале 80-х годов, когда были приняты оба этих метода, широко использовавшихся при производстве полупроводниковых материалов  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ . В течение следующего десятилетия было разработано множество металлоорганических соединений, а также конструкций [18] камеры для проведения реакции. В случае МЛЭ специально сконструированные печи с источником  $\text{Hg}$  были успешно созданы для преодоления низкого коэффициента прилипания  $\text{Hg}$  при температуре выращивания [19]. Температура выращивания меньше  $200^\circ\text{C}$  для МЛЭ, но составляет около  $350^\circ\text{C}$  для химического осаждения из паров металлоорганических соединений, затрудняя контроль легирования  $p$ -типа при химическом осаждении из паров металлоорганических соединений из-за формирования вакансий  $\text{Hg}$  при более высоких температурах выращивания. В настоящее время МЛЭ является доминирующим парофазным методом для получения КРТ. Этот метод предлагает выращивание при низких температурах в условиях сверхвысокого вакуума, легирование в ходе процесса примесями  $n$ - и  $p$ -типа и контроль за составом, легированием и граничными профилями. МЛЭ является сейчас предпочтительным методом для выращивания сложных слоистых структур для многоцветных приемников и для лавинных фотодиодов. Несмотря на то, что качество материала, полученного методом МЛЭ, еще несравнимо с качеством при выращивании методом ЖФЭ, в прошлом десятилетии был достигнут большой прогресс. Основы этого успеха — возможность легирования и уменьшение концентрации дырок при травлении до уровня менее  $10^6\text{ см}^{-2}$ .

Серьезные недостатки подложек из  $\text{CdZnTe}$ , по структуре почти соответствующих решеткам,

такие как отсутствие большой площади, высокая стоимость производства, и, самое важное, различие коэффициента теплового расширения в подложках из  $\text{CdZnTe}$  и кремниевых интегральных схемах считывания, а также заинтересованность в ИК-фокальных матрицах большой площади ( $1024 \times 1024$  и более), привели к ограничениям применения подложек из  $\text{CdZnTe}$ . Использование подложек из  $\text{Si}$  очень привлекательно в технологии создания ИК-фокальных матриц не только потому, что эти подложки менее дорогие и имеются в пластинах большого размера, но также потому, что объединение кремниевых подложек с кремниевыми схемами считывания в структуре фокальных матриц позволяет создавать очень большие матрицы, демонстрирующие длительную надежность при термоциклировании. Несмотря на большое несоответствие решеток ( $\sim 19\%$ )  $\text{CdTe}$  и  $\text{Si}$ , МЛЭ успешно использовалась для гетероэпитаксиального выращивания  $\text{CdTe}$  на  $\text{Si}$ . Пользуясь оптимальными условиями выращивания для подложек из  $\text{Si}(211)\text{B}$ , можно было получить [20] слой из  $\text{CdTe}(211)\text{B}$  с концентрацией дырок при травлении от  $10^5$  до  $10^6\text{ см}^{-2}$ . Обещающие результаты были достигнуты в коротковолновой и средневолновой ИК-областях спектра. В течение последних лет концентрация дефектов слоев из КРТ для средневолновой ИК-области спектра, выращенных МЛЭ на кремниевых подложках, уменьшилась с 2000 до менее  $500\text{ см}^{-2}$  [21]. Концентрация дефектов для материала, выращенного методом МЛЭ на кремниевых подложках, предназначенного для использования в длинноволновой ИК-области спектра, продолжает ограничивать характеристики, но она уменьшилась на порядок величины в прошлом десятилетии.

*Приемники на базе КРТ, предназначенные для работы в двух областях спектра.* В настоящее время значительные усилия направляются на изготовление единичной фокальной матрицы с возможностью работы в разных областях спектра для устранения проблем пространственного выравнивания и временной регистрации, которые имеются, когда используются отдельные матрицы, для упрощения оптической конструкции и уменьшения размера, массы и потребления энергии. Недавно был продемонстрирован значительный прогресс исследовательскими группами в Hughes Research Laboratory (Raytheon) [22, 23], Lockheed Martin (BAE Systems) [24], DRS Infrared Technology [25], AIM [26] и Rockwell [28] при изготовлении многоспектральных приемников из  $\text{HgCdTe}$  с использованием главным образом метода МЛЭ (хотя также используются ЖФЭ и химическое осаждение из паров металлоорганических соединений) для изготовления фокальных матриц различного назначения.

Единичная ячейка интегральных двухцветных фокальных матриц состоит из двух находящихся вместе приёмников, каждый из которых чувствителен в определенной полосе спектра. В приёмниках с тыльной подсветкой, предназначенных для работы в двух спектральных областях, фотодиод с более длинноволновым порогом вырабатывается эпитаксиально поверх фотодиода с короткой пороговой длиной волны. Фотодиод с более короткой пороговой длиной волны выступает в роли фильтра, пропускающего длинноволновое излучение для фотодиода, работающего с более длинноволновым порогом.

Приемники как для последовательного, так и для одновременного режима считывания изготавливаются из многослойных материалов. Самый простой двухцветный приемник из КРТ и первый из тех, которые следует продемонстрировать, представляет собой фотодиод с *n-p-n*-структурой с тыльной стыковкой базовых поглощающих областей и с выбираемым смещением (рис. 8, а). Базовые поглощающие области *n*-типа специально легируются индием на уровне  $\sim(1-3) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Критический этап при формировании устройств связан с легируемым As в процессе изготовления слоем *p*-типа с хорошими структурными и электрическими свойствами для предотвращения внутреннего усиления при генерировании сигнала усиления, касающимися оптимизации спектральной оптической связи. Пути создания запрещенной зоны заключаются в увеличении мольной фракции CdTe и выборе эффективной толщины слоя *p*-типа для подавления носителей вне рабочей спектральной полосы, чтобы они не собирались у выходного контакта. Приемник последовательного режима считывания имеет один индиевый столбик на единичную ячейку, что позволяет осуществлять последовательный выбор смещения при работе в спектральных полосах, связанных с работающими тандемными фотодиодами. Когда полярность напряжения смещения, подаваемого к столбовому контакту, положительная, верхний (длинноволновый) фотодиод получает смещение обратной полярности, а нижний (коротковолновый) фотодиод получает прямое смещение. Фототок (коротковолновый) шунтируется низким импедансом (коротковолнового) фотодиода с прямым смещением, и единственным фототоком, появляющимся во внешней схеме, является фототок длинноволнового фотодиода. Когда полярность смещающего напряжения меняется на обратную, ситуация также меняется на обратную, и имеет место только фототок (коротковолнового) фотодиода. Длительность в переключении смещения приемника может быть сравнительно короткой, порядка микросекунд, так что обнаружение медленно изменяющихся целей или изображений можно осуществить бы-

стрым переключением между средневолновым и длинноволновым режимами. Один столбиковый контакт предусмотрен для единичной ячейки, как это делается в одноцветных гибридных фокальных матрицах. Это является большим преимуществом приемника с выбираемым напряжением смещения. Он совместим с имеющимися кремниевыми схемами считывания.

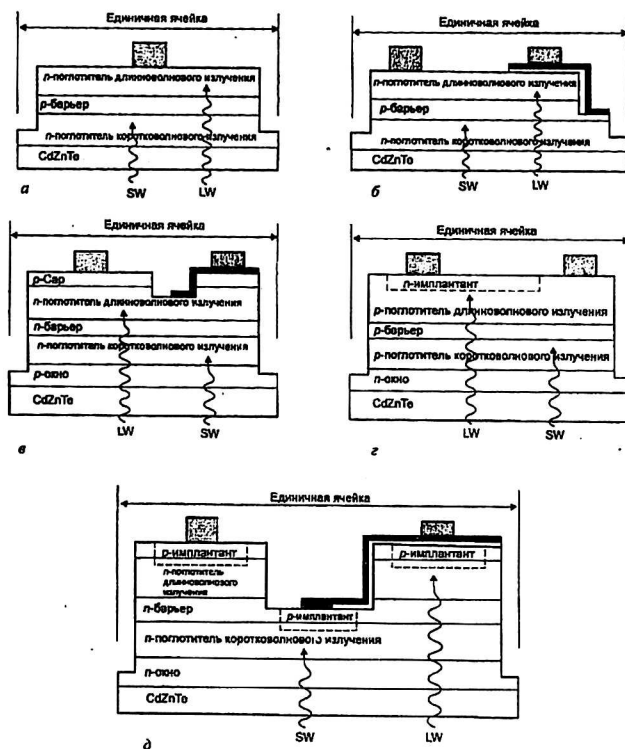


Рис. 8. Вид в поперечном сечении единичных ячеек для различных вариантов двухцветных приемников из КРТ с подсветкой с тыльной стороны:

- а — *n-p-n*-структура с подбором смещения, по данным Raytheon [22]; б — *n-p-n*-конструкция с одновременным режимом работы, по данным Raytheon [23];
- в — *n-p-n-p*-конструкция с одновременным режимом работы, по данным BAE Systems [24]; г — *n-p-p-p-n*-конструкция с одновременным режимом работы, по данным Leti [27];
- д — структура с одновременным режимом работы на базе *n-p*-переходов, по данным Rockwell [28, 29]; SW — коротковолновое излучение; LW — длинноволновое излучение

Трудности, связанные с устройством для выбора напряжения смещения, следующие: его конструкция не позволяет осуществлять независимый выбор оптимального смещающего напряжения для каждого фотодиода, и может возникнуть существенная оптическая связь (на средних волнах) в приемнике, предназначенном для работы на длинных волнах. На рис. 9 показана реализация одновременного режима считывания с использованием второго индиевого столбика в единичной ячейке. Один индиевый столбик вступает в контакт со слоем *n*-типа (для коротковолнового диапазона). Другой столбик вступает в контакт со слоем *p*-типа между активными областями на длинных и коротких волнах.



Рис. 9. Структура двухцветного элемента с одновременным режимом обнаружения

Многие применения требуют истинной одновременности обнаружения в двух спектральных диапазонах. Это было достигнуто в ряде оригинальных конструкций, описанных Reine [29] и показанных на рис. 8. Конструкции приемников, работающих в двух спектральных диапазонах, требуют дополнительного электрического контакта с нижележащим слоем в структуре фо-

новолновый). На рис. 10 показаны примеры спектральной характеристики различных двухцветных устройств. Заметим, что между полосами существует минимальная оптическая связь, поскольку в коротковолновой области поглощается почти 100 % коротковолнового излучения. Испытываемая структура показывает, что отдельные фотодиоды в двухцветном фотоприемнике действуют точно так же, как в одноцветных приемниках с точки зрения изменения достигаемого произведения  $R_0A$  в зависимости от длины волны при данной температуре.

Коэффициенты заполнения фокальных матриц  $128 \times 128$  для работы в средневолновом ИК/средневолновом ИК-спектральном диапазоне, равные 80 %, были получены при использовании одной мезаструктуры, на которой установлены два индиевых столбиковых контакта, необходимых для каждой единичной ячейки размером  $50 \text{ мкм}^2$ . Эквивалентная шуму разность температур (NETD) для обеих спектральных полос как функция температуры показана на рис. 11. Камера, используемая для этих измерений, имела 50-мм объектив с фокусным расстоянием  $f/2.3$ .

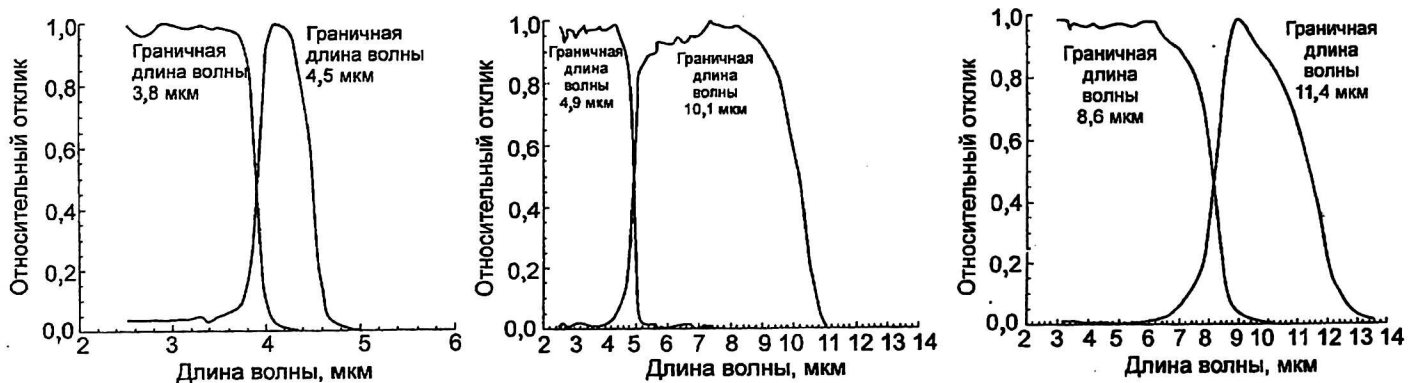


Рис. 10. Кривые спектральных характеристик для двухцветных приемников из КРТ при различных сочетаниях двух зон для работы на средних и длинных волнах ИК-спектра [12]

тодиода со многими переходами, работающего как в коротковолновой, так и в длинноволновой областях. Самым важным отличием является требование ввести вторую схему считывания в каждую единичную ячейку.

Технология создания интегрированных двухцветных приемников на базе КРТ разрабатывалась почти десятилетие с устойчивым прогрессом в направлении широкого разнообразия размеров пикселей ( $30\text{--}61 \text{ мкм}$ ), форматов матриц ( $64 \times 64$  до  $320 \times 240$ ) и спектральной чувствительности (средневолновый/средневолновый, средневолновый/длинноволновый и длинноволновый/длин-

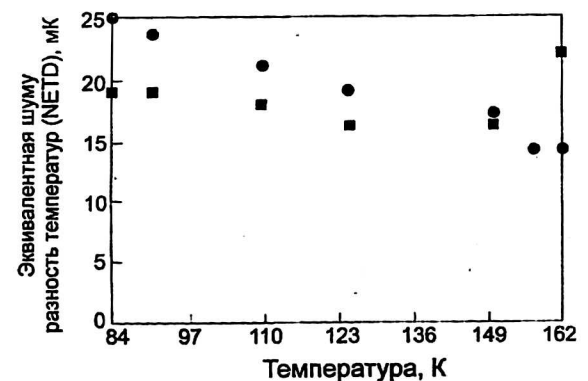


Рис. 11. Эквивалентная шуму разность температур для двухцветной камеры с 50-мм объективом  $f/2.3$  как функция рабочей температуры [12]:

- — средние волны ИК-спектра 1;
- — средние волны ИК-спектра 2.

Недавно фирмы Rockwell и Boeing расширили применение планарной технологии создания гетеропереходов с двойным слоем (DLHJ) на изготовление двухцветных матриц (см. рис. 8, д) [28]. Были созданы двухцветные 128×128 фокальные матрицы с шагом 40 мкм; характеристики обнаружительной способности при низком фоне  $10^{13} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  были получены для ИК-устройств, работающих на средних волнах (3–5 мкм) при температуре <130 К, и для устройств, работающих на длинных волнах (8–10 мкм) при температуре ~80 К.

Jozwikowski и Rogalski [30] теоретически проверили характеристики двухцветных фотоприемников на базе КРТ для работы на средних и длинных волнах, описанные Reine и др. [24]. На рис. 12 показаны измеренные и теоретически предсказанные относительные спектральные характеристики одного двухполосного приемника (двухзонная ИК-фокальная матрица № 3 при  $T = 77 \text{ К}$ , элемент 2353). Фотоответ на средних волнах совсем небольшой для длин волн более 4,5 мкм, что показывает небольшую оптическую связь между длинными и средними волнами, согласующуюся с измеренной величиной оптической связи 0,4 %. Измеренный фотоответ на средних волнах на длине волны менее 2,9 мкм подавляется, вероятно, из-за высокой скорости рекомбинации фотоносителей коротковолновой области на границе раздела между слоем (окном)  $p$ -типа с широкой запрещенной зоной и подложкой из CdZnTe (см. рис. 8, е). Ожидаемая спектральная фильтрация сигнала фотодиода на длинных волнах слоем на средних волнах явно свидетельствует о резком увеличении сигнала на длинных волнах при 4,0 мкм. Согласно [24], некоторые посторонние свойства в длинноволновом спектре на длинах волн 6–7 мкм появляются из-за поглощения водяных паров.

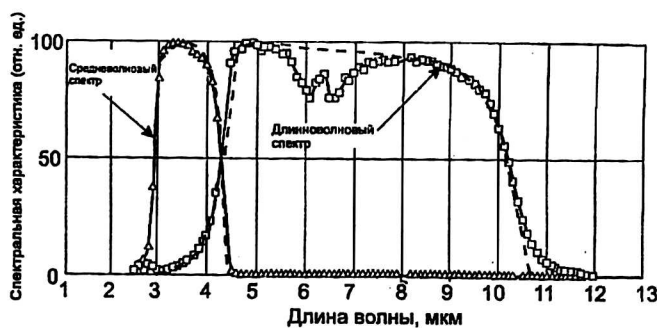


Рис. 12. Сравнение экспериментально измеренных и расчетных относительных спектральных характеристик для двухцветного приемника из КРТ [30]:

- — длинные волны;
- △— — средние волны;
- — данные теоретического расчета

Л и т е р а т у р а

1. Norton P. R. Infrared detectors in the next millennium// Proc. SPIE. 1999. № 3698. P. 652–665.
2. Norton P., Campbell J., Horn S., Reago D. Third-generation infrared imagers// Proc. SPIE. 2000. № 4130. P. 226–236.
3. Tidrow M. Z., Beck W. A., Clark W. W., Pollehn H. K., Little J. W., Dhar N. K., Leavitt P. R., Kennerly S. W., Beekman D. W., Goldberg A. C., Dyer W. R. Device physics and focal plane applications of QWIP and MCT// Opto-Electron. Rev. 1999. № 7. P. 283–296.
4. Rogalski A. Assessment of HgCdTe photodiodes and quantum well infrared photoconductors for long wavelength focal plane arrays// Infrared Phys. Technol. 1999. № 40. P. 279–294.
5. Rogalski A. Quantum well photoconductors in infrared detectors technology// Applied Physics Review (to be published).
6. Thom R. High density infrared detector arrays: Patent US 4,039,833, 8/2/77.
7. Baker I. M., Ballinga R. A. Photovoltaic CdHgTe-silicon hybrid focal planes// Proc. SPIE. 1984. V. 510. P. 121–129.
8. Kozlowski L. J., Vural K., Luo J., Tomasini A., Liu T., Kleinhans W. E. Low-noise infrared and visible focal plane arrays// Opto-Electron. Rev. 1999. № 7. P. 259–269.
9. Norton P. HgCdTe infrared detectors// Ibid. 2002. №. 10. P. 159–174.
10. Ameurlaire J. F., Cohen-Solal G. D.: Patent US 3,845,494, 1974.
11. Cohen-Solal G. D., Lussereau A. G.: Patent US 4,998,774, 1976.
12. Norton P. R. Status of infrared detectors: Proc. SPIE, 1998. V. 3379. P. 102–114.
13. Vural K., Kozlowski L. J., Cooper D. E., Chen C. A., Bostrup G., Cabelli C., Arias J. M., Bajaj J., Hodapp K. W., Hall D. N. B., Kleinhans W. E., Price G. G., Pinter J. A. 2048×2048 HgCdTe focal plane arrays for astronomy applications: Proc. SPIE, 1999. V. 3698. P. 24–35.
14. <http://compoundsemiconductor.net/articles/news/6/8/5/1>.
15. Reago D., Horn S., Campbell J., Vollmerhausen R. Third generation imaging sensor system concepts: Proc. SPIE, 1999. V. 3701. P. 108–117.
16. Tung T., DeArmond L. V., Herald R. F., Herning P. E., Kalisher M. H., Olson D. A., Risser R. F., Stevens A. P., Tighe S. J. State of the art of Hg-melt LPE HgCdTe at Santa Barbara Research Center: Proc. SPIE, 1992. V. 1735. P. 109–131.
17. Rogalski A., Adamiec K., Rutkowski J. Narrow-Gap Semiconductor Photodiodes, SPIE Press. Bellingham. 2000.
18. Irvine S. J. C. Metal-organic vapour phase epitaxy// Narrow-gap II-VI Compounds for Optoelectronic and Electromagnetic Applications, p. 71–96, ed. by P. Capper, Chapman @ Hall. London. 1997.
19. Wu O. K., DeLyon T. J., Rajavel R. D., Jensen J. E. Molecular beam epitaxy of HgCdTe// Narrow-gap II-VI Compounds for Optoelectronic and Electromagnetic Applications, p. 97–130, ed. by P. Capper, Chapman @ Hall, London. 1997.
20. Wijewarnasuriya P. S., Zandian M., Edwall D. D., McLevige M. V., Chen C. A., Pasko J. G., Hildebrandt H., Chen A. C., Arias J. M., D'Souza A. I., Rujirawat S., Sivananthan S. MBE  $p$ -on- $n$   $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  heterostructure detectors on silicon substrates// J. Electron. Mater. 1998. № 27. P. 546–549.
21. DeLyon T. J., Jensen J. E., Gorwitz M. D., Cockrum C. A., Johnson S. M., Venzor G. M. MBE growth of HgCdTe on silicon substrates for large-area infrared focal plane arrays: A review of recent progress// Ibid. 1999. № 28. P. 705–711.
22. Rajavel R. D., Jamba D. M., Jensen J. E., Wu O. K., Brewer P. D., Wilson J. A., Johnson J. L., Patten E. A., Kasai K., Caulfield J. T., Goetz P. M. Molecular beam epitaxial growth and performance of integrated multispectral HgCdTe photodiodes for the detection of mid-wave infrared radiation// J. Crystal Growth, 1998. № 184. P. 1272–1278.

23. Rajavel R. D., Jamba D. M., Jensen J. E., Wu O. K., Wilson J. A., Johnson J. L., Patten E. A., Kasai K., Goetz P. M., Johnson S. M. Molecular beam epitaxial growth and performance of HgCdTe-based simultaneous-mode two-color detectors// J. Electron. Mater. 1998. № 27. P. 747–751.

24. Reine M. B., Hairston A., O'Dette P., Tobin S. P., Smith F. T. J., Musicant B. L., Mitra P., Case F. C. Simultaneous MW/LW dual-band MOCVD HgCdTe 64×64 FPAs: Proc. SPIE, 1998. V. 3379. P. 200–212.

25. Kinch M. A. HDVIP™ FPA technology at DRS// Proc. SPIE. 2001. V. 4369. P. 547–558.

26. Cabanski W., Breiter R., Koch R., Mauk K.-H., Rode W., Ziegler J., Schneider H., Walther M., Oelmaier O. 3<sup>rd</sup> gen focal plane array IR detection modules at AIM: Proc. SPIE. 2001. V. 4369. P. 547–558.

27. Zanatta J. P., Ferret P., Loyer R., Petroz G., Cremer S., Chamonal J. P., Bouchut P., Million A., Destefanis G. Single and two colour infrared focal plane arrays made by MBE in HgCdTe// Proc. SPIE. 2000. V. 4130. P. 441–451.

28. Tennant W. E., Thomas M., Kozlowski L. J., McLevige W. V., Edwall D. D., Zandian M., Spariosu K., Hildebrandt G., Gil V., Ely P., Muzilla M., Stoltz A., Dinan J. H. A novel simultaneous unipolar multispectral integrated technology approach for HgCdTe IR detectors and focal plane arrays// J. Electron. Mater. 2001. № 30. P. 590–594.

29. Reine M. B. HgCdTe photodiodes for IR detection: A review: Proc. SPIE. 2001. V. 4288. P. 266–277.

30. Jozwikowski K., Rogalski A.// J. Appl. Phys. 2001. № 90. P. 1286–1291.

## Toward third generation HgCdTe infrared detectors

### Part I

A. Rogalsky

Institute of Applied Physics, Military University of Technology, Warsaw, Poland

*Hitherto, two families of multielement HgCdTe detectors are used for principal military and civilian infrared applications; one is used for scanning systems (first generation) and the other is used for staring systems (second generation). In the common understanding, third generation IR systems provide enhanced capabilities like larger number of pixels, higher frame rates, better thermal resolution as well as multicolour functionality and other on-chip functions. In the paper, issues associated with the development and exploitation of third generation HgCdTe detectors are discussed. The main challenges facing multicolour devices concern complicated device structures, thicker and multilayer material growth, more difficult device fabrication, especially when the array size gets larger and pixel size gets smaller. Also technical developments, which are key to third generation devices such as dry etching, vapour phase epitaxy, and advanced readout concepts are described.*