

УДК 621.383

Третье поколение ИК-приемников на базе HgCdTe*

Часть II

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, такими как 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. Дано описание технических разработок, которые являются ключевыми для устройств третьего поколения, такие как сухое травление, эпитаксия из паровой фазы и концепции улучшенного считывания.

Некоторые задачи разработки

Многие задачи вызывают необходимость разработки тепловизоров третьего поколения на основе КРТ. Здесь рассматриваются некоторые параметры таких тепловизоров:

- эквивалентная шуму разность температур;
- размеры элементов изображения и ИС в готовом приборе;
- однородность;
- надежность;
- стоимость.

Эквивалентная шуму разность температур (NETD)

NETD приемника представляет собой изменение температуры для падающего излучения, которое дает выходной сигнал, равный среднеквадратичному значению уровня шума. При обычном понимании NETD как системного параметра NETD приемника и NETD системы одинаковы, за исключением потерь в системе.

NETD определяется по формуле

$$\text{NETD} = \frac{V_n (\partial T / \partial Q)}{(\partial V_s / \partial Q)} = V_n \frac{\Delta T}{\Delta V_s},$$

где V_n — среднеквадратичное значение шума;

ΔV_s — сигнал, измеренный для разности температур ΔT .

Из работы [31] можно показать, что

$$\text{NETD} = \left(\tau C \eta_{\text{BLIP}} \sqrt{N_w} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где τ — спектральный коэффициент пропускания оптики;

C — температурный контраст;

N_w — число сфотогенированных носителей, интегрированных за время одной интеграции t_{int} ;

Q_B — плотность потока фотонов, падающих на чувствительную площадку приемника A_d .

$$N_w = \eta A_d t_{\text{int}} Q_B.$$

Температурный контраст — отношение производной спектральной плотности падающего потока фотонов по температуре к спектральной

* Часть I данной статьи опубликована в журнале "Прикладная физика" № 4 за 2003 г. В этой части нумерация рисунков, формул и ссылок на источники литературы продолжается.

плотности падающего потока фотонов выражается формулой

$$C = \frac{\partial Q / \partial T}{Q}$$

Контраст в средневолновом ИК-диапазоне спектра при температуре 300 К составляет 3,5–4 % по сравнению с 1,6 % для длинноволнового диапазона ИК-спектра.

Процентное соотношение VLIP, η_{VLIP} — это отношение шума фотонов к комбинированному шуму фокальной матрицы

$$\eta_{\text{VLIP}} = \left(\frac{N_{\text{photon}}^2}{N_{\text{photon}}^2 + N_{\text{FPA}}^2} \right)^{1/2}$$

Из вышеприведенных формул следует, что управляющая зарядовая емкость схемы считывания, время интеграции, связанное со временем кадра, и темновой ток чувствительного материала становятся основными данными параметрами ИК фокальных матриц. NETD — обратно пропорционально квадратному корню из интегрированного заряда, и поэтому, чем больше заряд, тем лучше характеристики. Следует отметить различие между временем интеграции и временем кадра фокальной матрицы. При интенсивном фоне часто бывает невозможно управлять большим количеством носителей, генерируемых за время, превышающее время кадра, совместимое со стандартными видеоскоростями. Внематричное накопление кадров может использоваться для достижения уровня чувствительности сенсора, который соизмерим с D^* , ограниченной приемником, и неограничен D^* , определяемой управлением зарядов. Даже если обнаружительная способность ИК-приемников на длинных волнах ограничена фоном, современные силы считывания могут собирать только ~1 % заряда в единичной ячейке из потока $10^{16} \div 10^{17}$ фотонов/(см²·с). Конденсаторы единичных ячеек заполняются через ~100 мс, а время кадра ~10 мс.

Хорошая емкость зарядов — это максимальный объем заряда, который может накапливаться на конденсаторе каждого элемента. Размер единичной ячейки ограничен размерами элемента приемника в матрице. Предполагается, что время интеграции таково, что емкость узловой точки считывания остается заполненной наполовину. Для пикселя размером 30×30 мкм² емкости хранения ограничиваются числом электронов 1–5·10⁷. Например, для емкости хранения 5·10⁷ электронов общая плотность тока приемника с пикселями размером 30×30 мкм² должна быть меньше 27 мкА/см² при времени интеграции 33 мс. Если общая плотность тока ~1 мА/см²,

то время интеграции должно быть уменьшено до 1 мс. Для ИК длинноволновых фокальных матриц на базе КРТ время интеграции обычно менее 100 мкс. Так как ширина полосы пропускания шума $\Delta f = 1/2t_{\text{int}}$, то небольшое время интеграции вызывает дополнительный шум во время интеграции.

Тепловизоры второго поколения обеспечивают NETD ~20–30 мК с оптикой $f/2$. Цель тепловизоров третьего поколения — достижение улучшения чувствительности, соответствующее NETD ~1 мК. Из уравнения (1) следует, что при наблюдении объектов с температурой 300 К в длинноволновой ИК-области спектра с тепловым контрастом 0,04 необходимая емкость для накопления зарядов превышает 10⁹ электронов. Такая большая плотность хранения зарядов при маленьких пикселях, вероятно, не может быть получена со стандартными КМОП-конденсаторами (см. [2], часть I). Несмотря на то, что уменьшенная толщина окисла при субмикронной технологической норме обеспечивает большую емкость на единицу площади, уменьшенное напряжение смещения, как показано на рис. 13, в значительной степени сводит на нет любое улучшение плотности хранения зарядов. Ферроэлектрические конденсаторы могут обеспечивать большие плотности хранения зарядов, чем конденсаторы из окисла на кремнии, которые теперь используются; однако такая технология еще не включена в технологический процесс при производстве стандартных КМОП-структур.

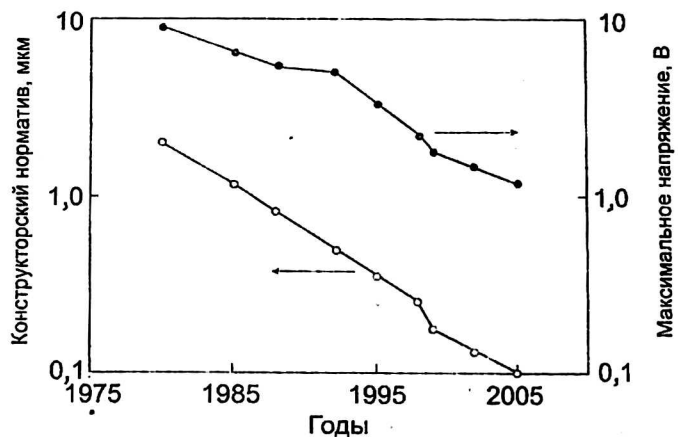


Рис. 13. Тенденции уменьшения минимального конструкторского норматива и уменьшения максимального напряжения смещения согласно требованиям кремниевых производств [2]

Norton и др. (см. [2], часть I, вып. 4) предложили использовать наложенные друг на друга гибридные структуры в качестве временного решения для достижения желательной плотности хранения зарядов в структурах приемник—считывающее устройство—конденсатор.

Размеры пикселей и чипов

Размеры пикселей и чипов являются важными вопросами при обсуждении форматов многоцветных тепловизоров. Небольшие пиксели уменьшают стоимость увеличения числа считывающих элементов приемника, потенциально имеющегося в обработанных пластинах. Небольшие элементы изображения также позволяют использовать оптику с меньшими размерами и массой.

Фундаментальный предел размера пикселя определяется дифракцией. Размер дифракционного пятна, или дифракционных кружков, определяется формулой

$$d = 2,44 \lambda f, \quad (2)$$

где d — диаметр пятна;

λ — длина волны;

f — относительное отверстие фокусирующей линзы.

Для стандартной оптики $f/2,0$ на длине волны 5 мкм размер пятна составляет 25 мкм. Так как пользователи системы предпочитают делать отбор с некоторым запасом, размер пикселя может быть уменьшен до 12 мкм для средневолнового ИК-диапазона. Norton (см. [1], часть I) предсказал, что размер пикселя на средних волнах, в конце концов, будет уменьшен до ~10 мкм в некоторой точке для получения записи меньшего пикселя. Размер пикселя для коротковолнового ИК-диапазона будет, соответственно, уменьшаться для случаев, где нужна максимальная пространственная разрешающая способность. Пиксели для работы в длинноволновом ИК-диапазоне не должны быть уменьшены до уровня, значительно меньшего 20 мкм. Однако ожидается, что пиксели для длинноволнового ИК-диапазона будут иметь такой же размер, как пиксели для средневолнового ИК-диапазона, так как конструкция единственного считывающего устройства позволяет работать как со средневолновыми, так и с длинноволновыми ИК фокальными матрицами.

Считывающие пластины обрабатываются на стандартных коммерческих предприятиях и могут ограничиваться по размеру предельными возможностями пошаговых принтеров при фотолитографии (см. [2], часть I). Этот предел в настоящее время составляет ~22×22 мм² для субмикронной литографии. В таком случае сама матрица может занимать площадь 18×18 мм² при допуске ~2 мм с каждой стороны для периферийных схем (источники напряжения смещения, регистры сдвига, усилители столбцов и формирователи выходных сигналов). В этих условиях матрица форматом 1024×1024 должна иметь элементы изображения не более 18 мкм.

Схему считывания 1024×1024 HAWAII, например, можно выполнить с использованием установки последовательного шагового экспонирования пластин GSA; ее площадь равна 3,8 см², а вмещает она >3,4 млн транзисторов. Некоторые более новые установки последовательного шагового экспонирования, которые могут поддерживать технологический размер 0,25 мкм, имеют немного большие поля. Для самых больших фокальных матриц на базе HgCdTe с размером единичного элемента 18×18 мкм² считывание с КМОП 2048×2048 матрицы осуществлялось путем стыковки четырех оптических полей для создания каждой схемы. Каждый квадрант размещается с точностью <0,05 мкм для получения схемы считывания 4×4 см² [32].

Будет очень трудно организовать структуру двух- или трехцветного приемника с маленькими пикселями, имеющими такие размеры как 18×18 мкм². Имеющиеся двухцветные пиксели для одновременного режима работы с двумя индиевыми столбиками на элемент изображения невозможно было создать с пикселями менее 40 мкм.

Однородность

По мнению Levine [33], когда обнаружительная способность приближается к значению 10⁻¹⁰ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹, характеристики фокальной матрицы ограничены неоднородностью и, следовательно, не зависят от этой обнаружительной способности. Улучшение неоднородности с 0,1 до 0,01 % после соответствующей корректировки могло бы уменьшить значение NETD с 63 до 6,3 мК.

Величина неоднородности обычно рассчитывается с использованием стандартного отклонения от среднего значения, рассчитанного по всем пикселям в матрице. Для системы, работающей в длинноволновом ИК-диапазоне, изменение контраста изображаемой картины при изменении температуры составляет ~2 %/К. Следовательно, при измерении эффективной температуры для получения изменения от пикселя к пикселю на уровне менее 20 мК неоднородность фотосигнала должна быть менее 0,04 %. Такой результат почти невозможно получить без корректировки выходного сигнала фокальной матрицы, поэтому обычно используется двухточечная корректировка.

Однородность фокальной матрицы влияет на сложность ИК-системы и важна для точного измерения температуры, вычитания фона и порогового тестирования. Неоднородности вызывают необходимость совершенствования алгоритмов компенсации для корректировки изображения, поскольку для этого требуется ряд аналого-

цифровых битов, они одновременно уменьшают динамический диапазон системы.

Тактические ИК фокальные матрицы требуются для работы в длинноволновом окне ИК-области спектра и находят небольшое применение для работы в диапазоне 3—5 мкм. Расстояния от сенсора до мишени обычно короткие, что позволяет использовать сенсоры для формирования изображений с большими фокальными матрицами, где точная радиометрия не является критической. Матрицы для создания изображений обычно могут допускать некоторый процент неработающих или плохого качества пикселей без риска ухудшения выполнения задания. Тактические фоны в ИК-окнах сравнительно сильные. Плотность потока фотонов, достигающих приемника, составляет $\sim 10^{16}$ фотонов/(см²·с).

Неоднородность — серьезная проблема для приемников на базе КРТ, работающих в длинноволновой ИК-области спектра. Изменение x в пластинке из $Hg_{1-x}Cd_xTe$ вызывает гораздо большую спектральную неоднородность (например, при 77 К изменение $\Delta x = 0,2\%$ дает $\Delta \lambda_c = 0,064$ мкм при $\lambda_c = 5$ мкм, но $\Delta \lambda_c = 0,51$ мкм при 14 мкм), которую полностью нельзя скорректировать с помощью двух- или трехточечной коррекции (см. [3], часть I). Поэтому для очень длинных волн в ИК-спектре требуется гораздо более строгий контроль состава, чем для средних волн в ИК-спектре.

Приемнику на базе КРТ очень трудно конкурировать с ИК-фотоприемником со структурой на квантовых ямах для получения высокой однородности и работоспособности при большом формате матрицы, особенно при низкой температуре и очень больших длинах волн. В случае с ИК-фотоприемниками со структурой на квантовых ямах увеличение граничной длины волны осуществить сравнительно легче, так как требуется небольшое изменение в свойствах материалов, в процессах выращивания и обработки. Однако серьезным условием для обеспечения характеристик устройства является снижение рабочей температуры.

Из-за более низких барьеров квантовых ям темновой ток термоионной эмиссией доминирует при более низкой температуре. Для достижения эквивалентной характеристики ИК-приемника со структурой на квантовых ямах с 10 мкм — граничной длиной волны температура равна 77 К, температуру нужно уменьшить до 55 К для 15 мкм — граничной длины волны и до 35 К — для 19 мкм — граничной длины волны (см. [4, 5], часть I).

Надежность

Военные системы должны иметь особенно высокую надежность для гарантии успеха в вы-

полнении операции, так и для обеспечения минимального риска для пользователя. Существуют два сомнения в отношении надежности фокальных матриц: сохранность запоминающей системы в условиях высокой окружающей температуры и устойчивость к повторяющимся температурным циклам между температурой окружающей среды и криогенной температурой.

Очень большие фокальные матрицы могут превышать по надежности гибридные ИС, работающие в существующих охлаждаемых структурах. В гибридных структурах используются механические напряжения для усиления сжатия этих двух составляющих элементов, чтобы они хорошо сочетались друг с другом. Этот подход может иметь пределы, когда напряжение достигает точки, где кристалл разрушается.

Для возможного решения этой проблемы предлагают три решения:

исключение толстой подложки, которая ограничивает активную область приемника от деформации при более медленной скорости считывания с кремниевой ИС;

подразделение матрицы на множество областей;

использование кремния в качестве подложки для выращивания материалов приемника.

Технология создания фотодиодов на базе КРТ на кремниевой подложке должна быть предельно простой из-за большей сложности имеющейся кремниевой технологии. Однако основными вопросам для обсуждения при этом подходе являются следующие (см. [2], часть I):

схема считывания должна быть размещена на меньшей площади;

требуются матрицы микролинз для восстановления коэффициента заполнения;

качество материала может быть адекватным для приемников с небольшим натеканием, особенно для фотодиодов на базе КРТ для длинноволновой области ИК-спектра;

кремниевые интегральные схемы изготавливаются при обработке кремния с ориентацией $\langle 100 \rangle$, однако более предпочтительной является ориентация, например, при выращивании КРТ на кремнии, близкая к $\langle 211 \rangle$.

Менее сложными подходами для устранения толстой подложки приемника являются контур или очень плотные вертикально встроенные структуры фотоприемного устройства, уже примененные на практике в GEC Magconi и DRS, соответственно. При таком подходе КРТ приклеивается к ИС считывания и контактам, проходящим через тонкий слой (10—20 мкм), после удаления подложки (см. рис. (6), часть I). Другим вариантом является удаление подложки после присоединения ИС с помощью индиевых столбиков. Удаление подложки является стан-

дартной операцией при работе с очень большими гибридными матрицами из InSb (1024×1024 пикселей). Этот подход был принят недавно для матриц ИК-фотоприемников со структурой на квантовых ямах. После заполнения эпоксидной смолой зазоров между матрицей и считывающим мультиплексором подложка утончается

до очень тонкой мембраны (~1000 Å). Это позволяет не только устранить проблему температурного несовпадения кремниевой ИС считывания и матрицы приемника на подложке из GaAs, но и полностью устранить оптическую связь между пикселями, и наконец, значительно усилить оптическое поглощения ИК-излучения в пикселях ИК-фотоприемника со структурой на квантовых ямах.

Стоимость

Стоимость фокальной матрицы сильно зависит от уровня отработки технологии и изменяется в зависимости от выпуска в различных фирмах. Итак, фокальные матрицы большого размера для длинноволновых ИК-приемников разработаны в научно-исследовательских лабораториях без опыта массового производства. На основе опыта производства приемников из КРТ фирмы Sofradig постоянные усилия в области совершенствования производства уменьшили стоимость КРТ-приемников в 5—10 раз [35]. Стоимость создания охлаждаемых компонентов с высокими характеристиками можно разделить на три примерно равные части: чип (приемник и интегральная схема считывания), дьюар, элементы интеграции и контроля. Кроме того, пользователю следует учесть стоимость криогенной машины, которой нельзя пренебречь по сравнению со стоимостью компонентов. Даже если схема обнаружения бесплатная, общая стоимость должна быть уменьшена только на ~15—20%. Это объясняет, почему стоимость приемников на базе PtSi и фотоприемников со структурой на квантовых ямах незначительно меньше стоимости фотонных приемников такой же сложности, даже если сырье (Si или GaAs) гораздо дешевле, чем для КРТ. Так как PtSi требует очень широкой оптической апертуры для получения нужных характеристик и ИК-фотоприемники со структурой на квантовых ямах требуют более низких рабочих температур, чем другие фотонные приемники, то, возможно, уменьшение стоимости покупки компенсируется значительным увеличением эксплуатационной стоимости.

Приемники на базе КРТ занимали центральное место в промышленности высоких технологий за последние три десятилетия. Технология отработана для коротких и средних волн ИК-си-

стем, но она еще не охватывает длинных волн. Для того чтобы компоненты имели больше пикселей, требуется уменьшение шага или овладение операцией по утоньшению, которая необходима, чтобы обеспечить устойчивость к термостабильности (что зависит от разности коэффициентов теплового расширения между CdZnTe и кремнием). В будущем более удобным представляется использование подложек из Si, которые имеют много известных преимуществ по сравнению с подложками из слитка CdZnTe (гораздо больший размер при меньшей стоимости, соответствие коэффициента теплового расширения с кремниевой схемой считывания, более высокая чистота и совместимость с технологией автоматизированной обработки пластин / методологией проведения технологических процессов из-за их превосходной механической прочности и плоскостности).

В настоящее время матрицы для средневолнового ИК-диапазона с работоспособностью пикселей (процент действующих пикселей) 98% могут производиться из этого материала. Для сравнения — работоспособность матриц из материала из CdZnTe обычно 99% или больше.

Фотоприемники из КРТ в сравнении с ИК-фотоприемниками на квантовых ямах

В настоящее время КРТ является широко используемым полупроводником с изменяемой запрещенной зоной и занимает ведущее положение как в длинноволновом, так и в очень длинноволновом ИК-диапазонах спектра. ИК-приемники со структурой на квантовых ямах для длинноволнового ИК-диапазона не могут конкурировать с фотодиодом из КРТ в качестве отдельного устройства, особенно при более высоких температурах охлаждения (>70 К) из-за фундаментальных ограничений, связанных с переходами между поддонами [3—5, (см. часть I) и 33, 34, 36]. Однако преимущество КРТ менее заметно в температурном диапазоне ниже 50 К из-за проблем, связанных с материалом КРТ (легирование *p*-типа, рекомбинация Шокли-Рида, туннелирование, связанное с ловушками захвата, поверхностная нестабильность и нестабильность на границах раздела).

Сравнивая технологии создания фотовольтаических приемников на базе КРТ- и ИК-фотоприемников со структурой на квантовых ямах, мы приходим к следующим выводам (см. [5], часть I):

должны быть преодолены две основные проблемы, которые препятствуют получению хороших характеристик фотоприемников со структурой на квантовых ямах: эффективность оптического преобразования и темновой ток;

в случае приемников на базе КРТ необходимо улучшение однородности матрицы;

ИК-приемник со структурой на квантовых ямах, по-видимому, обладает большим потенциалом для осуществления работы фокальной матрицы на длинных и очень длинных волнах ИК-диапазона (также в многоцветном режиме).

Основными недостатками технологии создания ИК фокальных матриц со структурой на квантовых ямах для длинноволнового ИК-диапазона являются ограничение характеристик для использования при малом времени накопления и низкая рабочая температура. Их основные преимущества связаны с небольшим разбросом характеристик и возможностью изготавливать матрицы большого размера. Большая промышленная инфраструктура для выращивания, обработки и компоновки материалов, устройств, вызванная использованием устройств на базе GaAs в индустрии телесвязи, дает ИК-фотоприемникам со структурой на квантовых ямах потенциальное преимущество в производстве и стоимости. Единственное известное использование материала КРТ до настоящего времени — для ИК-приемников. Основной недостаток технологии создания фокальных матриц из КРТ для длинноволновой ИК-области спектра — невозможность изготовления матриц большого размера, необходимых для ТВ-формата и еще больших.

Даже если ИК-фотоприемник со структурой на квантовых ямах является фотопроводником, то некоторые его свойства, такие как высокий импеданс, быстрота реакции, продолжительное время накопления и небольшое потребление энергии — хорошо подчиняются требованиям создания больших фокальных матриц. Благодаря высокому качеству материала при низкой температуре ИК-фотоприемник со структурой на квантовых ямах имеет потенциальные преимущества над фотоприемником на базе КРТ при использовании фокальных матриц для очень длинных волн ИК-диапазона в части размера матрицы, однородности, производственного выхода и стоимости систем. Фокальные матрицы ИК-фотоприемников со структурой на квантовых ямах сочетают преимущества матриц из PtSi с барьером Шоттки (высокая однородность, большой выход, радиационная стойкость, большие размеры матрицы, меньшая стоимость) с преимуществами матриц на базе КРТ (высокая квантовая эффективность и чувствительность на длинных волнах). Можно также ожидать, что присущая ИК-фотоприемникам со структурой на квантовых ямах чувствительность к поляризации может использоваться в ИК-системах изображения при селекции истинных и ложных целей.

Современное состояние технологии производства ИК фокальных матриц со структурой на квантовых ямах и фотоприемников на базе КРТ

обеспечивает подобие показателя качества характеристик, потому что они ограничиваются в преобладающем большинстве схемами считывания. Можно показать, что величина эквивалентной шуму разности температур (NETD) для ИК-фотоприемников со структурой на квантовых ямах с ограничением зарядов даже лучше, чем для фотодиодов из КРТ на коэффициент $(2g)^{1/2}$, так как приемлемое значение g составляет 0,4 [37]. Небольшое увеличение фотопроводимости фактически увеличивает отношение сигнал/шум, а фокальная матрица ИК-фотоприемника со структурой на квантовых ямах может иметь лучшее значение NETD, чем фокальная матрица из КРТ с подобной емкостью хранения. Этот вывод был подтвержден экспериментально Scheider и др. [38, 39]. Используя малошумящую фотовольтаическую структуру ИК-фотоприемника со структурой на квантовых ямах, в которой g составляет только 0,05, группа получила значение NETD 7,4 мк при времени накопления 20 мс и 5,2 мк — при 40 мс.

Очень короткое время накопления устройств из КРТ для длинных волн обычно менее 300 мкс, что очень полезно для остановки сцены с быстро движущимися объектами. Приборы на ИК-фотоприемниках со структурой на квантовых ямах из-за прекрасной гомогенности и слабого фотоэлектрического усиления достигают лучшего значения NETD, однако для этого время накопления должно быть больше в 10–100 раз (обычно оно равно 5–20 мс). Поэтому выбор наилучшей технологии определяется специфическими нуждами системы. Наблюдение за всемирным рынком в течение последних лет показало, что даже фотодиоды из КРТ демонстрируют более высокие характеристики, чем ИК-фотоприемники со структурой на квантовых ямах. Тенденции рынка в будущем следующие:

- КРТ для небольших форматов (например 128×128), небольшой шаг, высокие скорости кадров и малое время накопления;
- ИК-фотоприемник со структурой на квантовых ямах для больших форматов (например 640×480 и больше) при малых скоростях кадров и большом времени накопления.

Большие возможности технологии создания ИК-фотоприемников со структурой на квантовых ямах связаны с применением фокальных матриц для очень длинных волн ИК-спектра и многоцветным обнаружением. В ближайшем будущем будут демонстрироваться трех- и четырехполосные фокальные матрицы.

Заключение

Использование ИК-фотоприемных устройств в будущем требует:

- большей чувствительности пикселей;
- дальнейшего увеличения плотности элементов изображения — до $>10^6$ пикселей;

уменьшения стоимости матричных тепловизионных систем за счет использования технологии меньшего охлаждения сенсоров в сочетании с интеграцией приемников и функциями обработки сигналов (с гораздо большим объемом обработки сигналов в чипе);

улучшения функциональности тепловизоров путем разработки многоспектральных сенсоров.

Тепловизоры третьего поколения на базе КРТ ставят сложную проблему для разработки. Для многоспектральных сенсоров усиление чувствительности для максимального увеличения дальности идентификации является главной целью. Разработка больших длинноволновых и многоцветных приемников из КРТ является очень трудной, особенно для использования в условиях слабого фона. В этом случае основной причиной, которая затрудняет достижение необходимых характеристик, является однородность матрицы.

Несмотря на серьезную конкуренцию со стороны альтернативных технологий и более медленный, чем ожидалось, прогресс, мало вероятно, что использование КРТ будет серьезно оспариваться там, где требуются высокие характеристики, а также в случаях, где необходимо работать в многоспектральном режиме и обеспечивать быстроту реакции. Последние успехи конкурирующих приемников с криогенным охлаждением достигнуты благодаря достижениям фундаментальной науки. Стабильный прогресс в технологии эпитаксиального выращивания может сделать устройства из КРТ гораздо более приемлемыми в будущем. Гораздо более высокие рабочие температуры КРТ по сравнению с малоразмерными твердо-

тельными устройствами могут стать решающим аргументом в этом случае.

Литература

31. Kozłowski L. J. and Kosonocky W. F. Infrared detector arrays// in Handbook of Optics, Chap. 23, edited by M. Bass, E. W. Van Stryland, D. R. Williams, and W. L. Wolfe, McGraw-Hill, Inc. New York, 1995.
32. Vural K., Kozłowski 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. № 3698. P. 24–35.
33. Levine B. F. Quantum-well infrared photodetectors// J. Appl. Phys. 1993, № 74. R1–R81.
34. Gunapala S. D., Bandara S. V., Liu J. K., Luong E. M., Rafol S. B., Mumolo J. B., Ting D. Z., Bock J. J., Ressler M. E., Werner M. W., LeVan P. D., Chehayeb R., Kukkonen C. A., Ley M., LeVan P., Fauci M. A. Recent developments and applications of quantum well infrared photodetector focal plane arrays// Opto-Electron. Rev. 2001, № 8. P. 150–163.
35. Chatard J. P. LW MCT IRFPA cost optimisation// Proc. SPIE. 1999, № 3698. P. 407–419.
36. Bertrand F., Tissot J. T., Destefanis G. Second generation cooled infrared detectors. State of the art. And prospects// in Physics of Semiconductor Devices, Vol. II. P. 713–720, edited by V. Kumar and S. K. Agarwal, Narosa Publishing House, New Delhi, 1998.
37. Rogalski A., Quantum well photoconductors in infrared detector technology// Applied Physics Reviews (to be published).
38. Schneider H., Walther M., Schunbein C., Rehm R., Fleissner J., Pleitschen W., Braunstein J., Koidl P., Weimann G., Ziegler J., Cabanski W. QWIP FPAs for high-performance thermal imaging// Physica E 7. 2000. P. 101–107.
39. Schneider H., Koidl P., Walther M., Fleissner J., Rehm R., Diwo E., Schwarz K., Weimann G. Ten years of QWIP development at Fraunhofer// Infrared Phys. Technol. 2001. № 42. P. 283–289.

Toward third generation HgCdTe infrared detectors

Part II

A. Rogalski

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.