

Инфракрасные датчики длинноволнового диапазона на квантовых ямах компании IRnova

Сергей СМУК (Sergiy SMUK), д. т. н.
Sergiy.Smuk@ir-nova.se
Юрий КОЧАНОВ, к. в. н.
Максим ПЕТРОШЕНКО
Дмитрий СОЛОМИЦКИЙ

Полупроводниковые системы, применяемые в настоящее время в инфракрасной фотоэлектронике, продолжают интенсивно совершенствоваться за счет нанотехнологий. Это позволяет достичь лучших результатов при обнаружении сигналов ИК-спектра и их селекции. Одним из таких направлений является разработка и производство ИК-датчиков на квантовых ямах (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP). Основанная в 2007 году шведская инжиниринговая компания IRnova выпускает целый ряд фотонных датчиков длинноволнового диапазона на основе технологии квантовых ям. В статье рассматривается технология производства фотонных детекторов IRnova и приводится обзор их технических характеристик.

Введение

Датчики инфракрасного (ИК) диапазона широко применяются в различных областях техники. К таковым относятся, прежде всего:

- оборонная отрасль, безопасность и наблюдение, спасательные работы в чрезвычайных ситуациях;
- космос — наблюдение за поверхностью Земли, в том числе гиперспектральное, и спектроскопия;
- промышленность — неразрушающий контроль, мониторинг, обнаружение утечек различных газов;
- научные исследования;
- автомобильные системы ночного видения;
- пользовательский ИК-интерфейс;
- системы видеонаблюдения.

В практических областях, где требуется обнаружить, распознать и идентифицировать объекты, максимум теплового излучения приходится на длинные волны (8–12 мкм) диапазона ИК-спектра. Область применения ИК-датчиков постоянно расширяется, прежде всего, за счет развития детекторов длинноволнового диапазона на основе нанотехнологий. Появление таких детекторов относится к середине 1980-годов. В 1986 году шведская компания Асгео¹ приступила к проведению исследований по ИК-тематике с полупроводниками III и V групп из арсенида галлия/арсенида алюминия-галлия (GaAs/AlGaAs). Исследования и разработки продолжались более 10 лет,

и в 1999 году компания Асгео одной из первых в мире приступила к промышленному выпуску FPA (Focal Plane Array) на квантовых ямах — матриц из чувствительных в ИК-диапазоне пикселей (QWIP-датчиков). В 2007 году часть активов фирмы Асгео была передана новой компании IRnova, в штат которой были включены сотрудники, занятые разработкой и производством QWIP-датчиков.

За время своего существования компания IRnova выпустила тысячи QWIP-датчиков, успешно функционирующих по всему миру в разных областях применения. Сочетание знаний и опыта сотрудников IRnova, внедрение современных технологий производства и достижение соответствия стандарту ISO9001 предопределили высочайшее качество выпускаемой продукции: за весь период производства не было ни одного случая рекламации от заказчиков на QWIP-датчики IRnova.

Краткий обзор ИК-детекторов

Технологии производства инфракрасных детекторов развиваются и совершенствуются уже на протяжении более 200 лет с момента проведения опыта английским астрономом У. Гершелем. При испытании он обнаружил, что в полученном с помощью призмы спектре Солнца температура контрольного термометра повышается за границей красного света (то есть в невидимой части спектра), и его значения отличаются от показаний других термометров.

Процесс изучения и освоения данного направления значительно интенсифицировался в последние 40 лет. Сегодня, рассма-

тривая физические принципы обнаружения теплового излучения и, в определенной степени, существующие технологии, можно классифицировать инфракрасные детекторы по группам. Они представлены на рис. 1.

Принцип работы всех тепловых детекторов основан на изменении электрических характеристик материала приемника за счет энергии поглощенного теплового излучения. У микроболометров повышение температуры приемника изменяет его электропроводность, у термопилей появляется термо-ЭДС, у пироэлектрического приемника изменяется значение поверхностного заряда, а у термоэлектронных тепловых диодов — значение тока внутренней термоэлектронной эмиссии.

Технологии изготовления тепловых детекторов достигли определенной степени совершенства и предопределили ряд преимуществ, благодаря которым сенсоры этого типа занимают доминирующее положение на рынке в количественном отношении. Их достоинства хорошо известны. В самом общем виде — это простота конструкции и отсутствие необходимости в охладителе, что приводит к значительно меньшим энергозатратам по питанию. Кроме того, практически нет необходимости в сервисном обслуживании. Для пироэлектриков и термопилей — это отсутствие питания и необходимости температурной компенсации, вследствие чего резко уменьшаются шумы ($1/f$). Микроболометры также не требуют охлаждения, для них достигнут температурный эквивалент шума (NETD) 40–50 мК для апертурного числа 1. И, конечно, конкурентоспособная ценовая составляющая играет особую роль при выборе ИК-датчика.

¹ В настоящее время компания Асгео организационно входит в Swedish ICT — Шведский институт информационных и коммуникационных технологий.

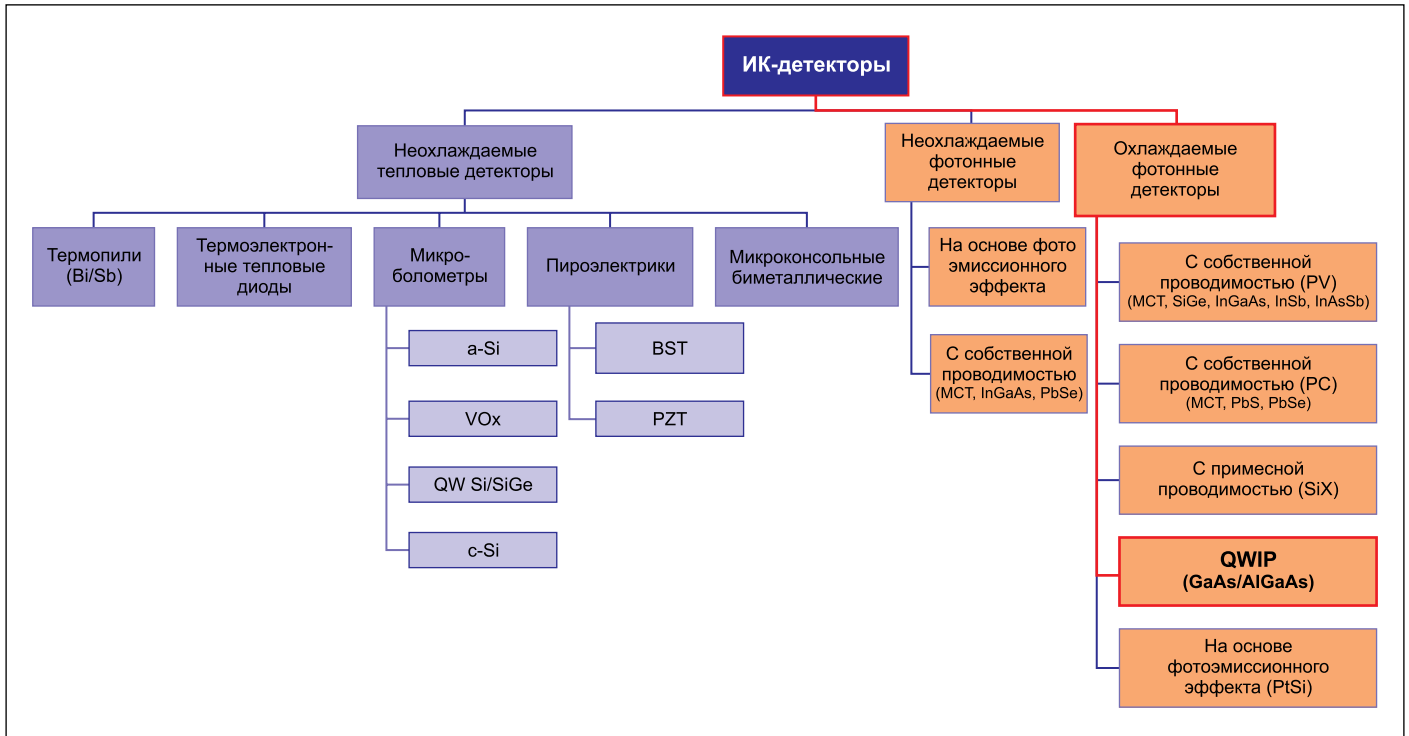


Рис. 1. Классификация инфракрасных детекторов

Но тепловые детекторы обладают и недостатками, которые оказываются весьма существенными при выборе ИК-датчика для работы в требовательных приложениях. Таковыми являются конструктивная и технологическая сложность термоизоляции множества пикселей детектора друг от друга и от подложки, их чувствительность к колебаниям температуры и вибрациям при сравнительно небольших относительных изменениях электрических характеристик материала на один градус изменения температуры объекта, инерционность спектрального отклика и невысокая однородность изображения.

Следует отметить, что достигнутый для микроболлометров NETD в 40–50 мК для апертуры 1 является бесспорным прогрессом. Недостатком, однако, является рост NETD пропорционально квадрату апертурного числа. На практике это свойство приводит к тому, что применять микроболлометры для получения изображения на длинных дистанциях проблематично. В этом случае требуется оптика большего размера. Цена же инфракрасной оптики, к примеру германиевой линзы, растет пропорционально кубу линейного размера. Как следствие, теряется ценовое преимущество тепловых детекторов при заведомо худших основных технических характеристиках по сравнению с сенсорами фотонного типа.

Фотонные приемники излучения обеспечивают преобразование падающего потока фотонов в электрический сигнал за счет непосредственного взаимодействия фотонов с электронной подсистемой материала приемника. По сравнению с тепловыми детекто-

рами охлаждаемые фотонные сенсоры имеют NETD 10–20 мК, и этот показатель практически не меняется в широких пределах времени интегрирования (5–7 мс и более). Обнаружительная способность (detectivity) фотонных приемников примерно на два порядка выше, чем у тепловых. Это позволяет использовать большие апертурные числа при проектировании камер.

У детекторов фотонного типа лучше соотношение сигнал/шум и высокое быстродействие. Вместе с тем они требуют глубокого криогенного охлаждения, и это приводит к усложнению конструкции, увеличению ее геометрических размеров, веса и большому энергопотреблению. Кроме того, если ресурс работы самой фотоприемной матрицы фотонного детектора может определяться десятилетиями, то ресурс охладителя не превышает 30 тысяч часов работы (лучших моделей), после чего охладитель необходимо заменить. Все это приводит к удорожанию сенсоров данного типа по сравнению с тепловыми детекторами, а также к увеличению стоимости их эксплуатации. Тем не менее критерий цены, как правило, не является определяющим в требовательных приложениях, где находят свое применение приемники фотонного типа, так как их технические показатели лучше.

Пропускание ИК (теплого) излучения атмосферой

При прохождении через атмосферу Земли тепловое излучение ослабляется вследствие поглощения молекулами газов, а также рас-

сеяния скоплениями молекул и частиц (аэрозолями) — дождем, снегом, туманом, дымом, смогом, пылью. Молекулы множества широко используемых газов имеют полосы поглощения в инфракрасной области спектра. Например, максимумы поглощения воды расположены на 2,7; 3,2 и 6,3 мкм, углекислого газа — на 2,7; 4,3 и 15 мкм, озона — на 4,8; 9,6 и 14,2 мкм, закиси азота — на 4,7 и 7,8 мкм, окиси углерода — на 4,8 мкм и метана — на 3,2 и 7,8 мкм. Молекулярное поглощение является главной причиной ослабления излучения (в отсутствие сильного задымления и т. п.), причем наиболее сильно излучение поглощается парами воды, углекислым газом и озоном. В нижних слоях атмосферы поглощением закисью азота и окисью углерода обычно можно пренебречь.

Полосы поглощения водяного пара с центром 6,3 мкм и углекислого газа с центрами 2,7 и 15 мкм ограничивают пропускание излучения атмосферой в диапазоне длин волн 2–20 мкм, определяя положение так называемых окон прозрачности атмосферы: 3–5 и 8–12 мкм (рис. 2). По сложившейся классификации эти окна прозрачности соответствуют средне- (MWIR) и длинноволновому (LWIR) диапазонам ИК-спектра.

В международной фотометрической системе положение окон прозрачности имеет стандартизацию, соответствующую длине волны ($\lambda \pm \Delta\lambda$):

- в видимом и начале ближнего ИК-диапазона: V, V, R, J — до 1,2 мкм;
- Н-диапазон — (1,6 ± 0,1) мкм;
- К-диапазон — (2,2 ± 0,3) мкм;
- L-диапазон — (3,6 ± 0,45) мкм;

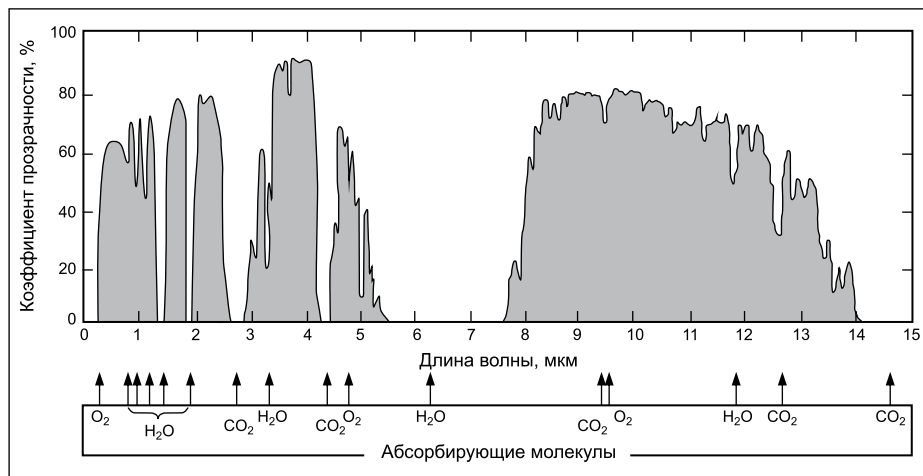


Рис. 2. Спектр пропускания атмосферы Земли

- М-диапазон — $(4,6 \pm 0,5)$ мкм;
- N-диапазон — (10 ± 2) мкм;
- Q-диапазон — $(20 \pm 0,4)$ мкм.

Между полосами прозрачности существуют полосы полного поглощения ИК-излучения атмосферой, в основном углекислым газом CO_2 (2,6–2,9; 4,2–4,4 мкм) и парами воды H_2O (5–8 мкм).

Те или иные диапазоны имеют свои преимущества в разных применениях. Диапазон LWIR по сравнению с MWIR более подходит для работы в условиях задымленности и запыленности, а также для наблюдения за объектами в условиях холодного климата (Арктика), не подвержен влиянию солнечных отражений и блеска морской поверхности. Опытным путем установлено, что в диапазоне LWIR помехи от излучения неоднородностей небосвода, переотраженного от взволнованной морской поверхности, примерно в 10 раз меньше, чем в MWIR. Ближний ИК-диапазон (SWIR) заканчивается на 2,5 мкм и отличается от средне- и длинноволнового тем, что объекты генерируют чрезвычайно мало собственного теплового излучения. Наблюдение в ближнем ИК-диапазоне ведется за счет отраженного света, то есть требуется подсветка от какого-то мощного источника, так что этот диапазон во многом схож с видимым диапазоном. Обычно классификация ближнего ИК-диапазона ведется по технологиям детекторов.

Обоснование выбора QWIP-датчика в длинноволновом диапазоне волн для работы в требовательных приложениях

Общая структура устройства и фундаментальные свойства материалов определяют те основные технические параметры, которые влияют на сферу применения КРТ-матриц и матриц на квантовых ямах (КЯ). Несмотря на то, что основу матриц на КЯ составляют фотопроводники, некоторые свойства фотодиодов, такие как высокий импеданс,

быстрое время отклика, высокое время накопления и малая потребляемая мощность, также присущи данным устройствам. Кроме того, одной из немаловажных характеристик, свойственной обоим типам приемников, является возможность простого согласования со считывающей интегральной электроникой (ROIC).

Фотопроводник сам по себе не обладает базовыми недостатками, которые свойственны фотодиодам. К ним относятся: неоднородность вследствие легирования полупроводником p-типа; g-г тунелирование, связанное с эффектом рекомбинации Шокли-Рида-Холла; нестабильность в приповерхностной и интерфейсной областях.

Основными проблемами приемников на КЯ являются относительно низкая эффективность преобразования и относительно высокий уровень теплового возбуждения при $T > 80$ К. Эти особенности QWIP не позволяют ему конкурировать с КРТ-приемниками в данном температурном диапазоне, а также в приложениях, где требуется малое время накопления. Но, несмотря на подобное сравнение, в сверхдлинноволновом диапазоне (VLWIR) и при низкой температуре материал матриц на КЯ демонстрирует отличные показатели, в том числе в условиях с невысоким уровнем фона.

По сравнению с матрицами на КЯ КРТ-устройства имеют более высокую квантовую эффективность и широкий спектральный диапазон. При этом генерируемый в КРТ-системе темновой ток в точке $T > 77$ К относительно невелик по сравнению с технологией на КЯ. К недостаткам технологии КРТ можно отнести проблемы, связанные со стабильностью материала, особенно для LWIR-диапазона. Такая нестабильность делает КРТ-прибор более чувствительным к воздействиям. Следует также добавить, что КРТ сложны в эксплуатации, имеют высокую неоднородность и малый выход годных изделий при изготовлении. Улучшенные широкоформатные КРТ могут работать

и в дальнейшем ИК-диапазоне при повышенных рабочих температурах, но сама разработка подобных устройств сложна и требует значительных финансовых затрат, и в итоге стоимость КРТ-прибора выше, чем у приборов на КЯ.

Обзор технологии производства QWIP-датчиков GaAs/AlGaAs компании IRnova

Квантовые ямы создают, помещая тонкий слой полупроводника с узкой запрещенной зоной между двумя слоями материала с более широкой запрещенной зоной (рис. 3). В результате электрон оказывается «запертым» в одном направлении, что и приводит к квантованию энергии поперечного движения. В то же время в двух других направлениях движение электронов будет свободным, поэтому можно сказать, что электронный газ в квантовой яме становится двумерным.

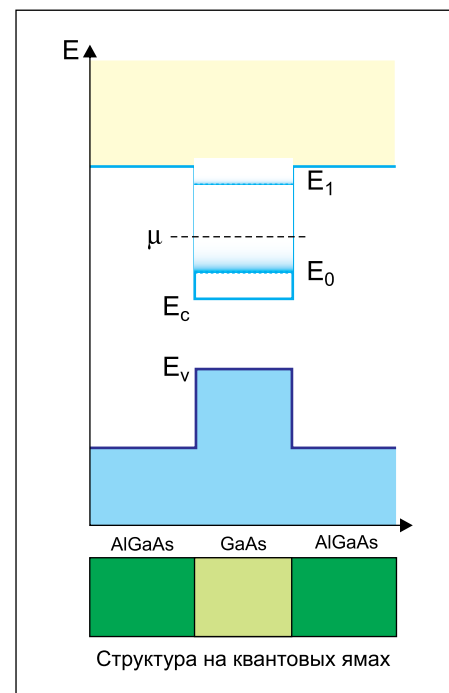


Рис. 3. Энергетическая диаграмма КЯ

Для выращивания фоточувствительной структуры IRnova применяет метод газовой фазной эпитаксии (metal-organic vapour phase epitaxy, MOVPE) с использованием водорода в качестве газа-носителя и, как правило, жидких источников газов-прекурсоров. Выращиваются структуры на стандартных подложках арсенида галлия. Реактор (рис. 4, 5) позволяет работать с трех- и четырехслойными подложками. В настоящее время IRnova использует четырехслойные подложки. Подложка помещается на подогреваемый держатель, который быстро вращается для обеспечения равномерности выращиваемой структуры (рис. 4). Температура подложки контролируется бесконтактной си-

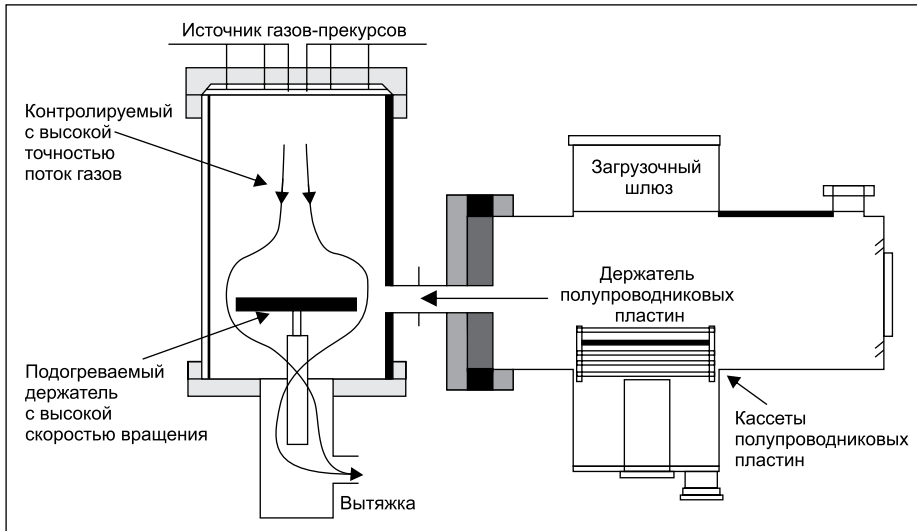


Рис. 4. Схема реактора установки газозофазной эпитаксии



Рис. 5. Общий вид установки газозофазной эпитаксии в IRnova

стемой RealTemp. Точный контроль потока газов-прекурсоров осуществляется системой трубопроводов и вентилях, управляемых компьютером.

Реактор калибруется перед каждой серией путем выращивания специальных калибровочных структур, которые в свою очередь аттестуются с помощью таких методик, как фотолюминесценция, измерение подвижности носителей методом Холла и рентгеновская дифракция. Каждая пластина серии после выращивания контролируется на соответствие структуры техническим требованиям путем измерения фотолюминесценции и рентгеновской дифракции. Из одной пластины каждой серии изготавливается однопиксельный детектор по упрощенной по сравнению с настоящим детектором технологии, который аттестуется с точки зрения спектральной чувствительности и темнового тока. Перед передачей в производство каждая пластина проходит также тщательную визуальную инспекцию на предмет дефектов эпитаксиальной структуры, которые впоследствии могут сказаться на характеристиках детектора.

После визуальной инспекции пластины поступают на производство, где они обрабатываются для получения матрицы. Полупроводниковый процесс — это целый ряд литографических процессов с травлением, нанесением металлизации, пассивирующих покрытий, пикселизации, получения двумерной решетки на поверхности каждого пикселя и т. п. На рис. 6 показан общий вид пластины после проведения полупроводникового процесса изготовления QWIP-детектора.

Затем пластина проходит стадию нанесения индиевых столбиков (рис. 6) и режется на отдельные чипы. Аналогично кремниевая шестидюймовая пластина с мультиплексором также проходит стадию нанесения индиевых столбиков и резки на отдельные чипы.

Два отдельных чипа — фоточувствительная матрица и матрица мультиплексора — совмещаются по принципу пиксель против пикселя и сжимаются до получения надежного элек-

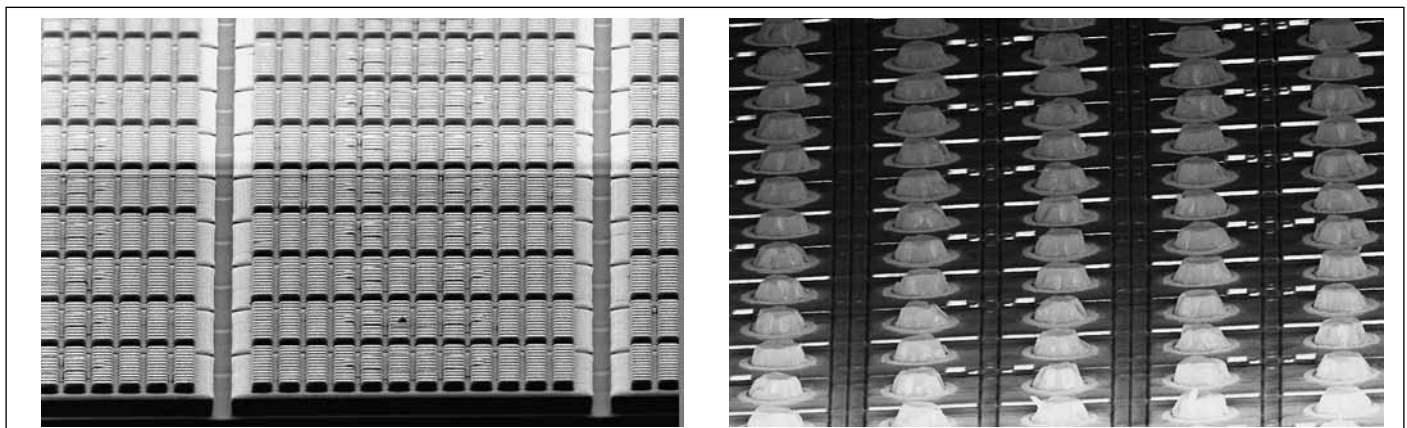


Рис. 6. Вид фоточувствительной пластины после проведения полупроводникового процесса — пикселизации и после нанесения индиевых столбиков

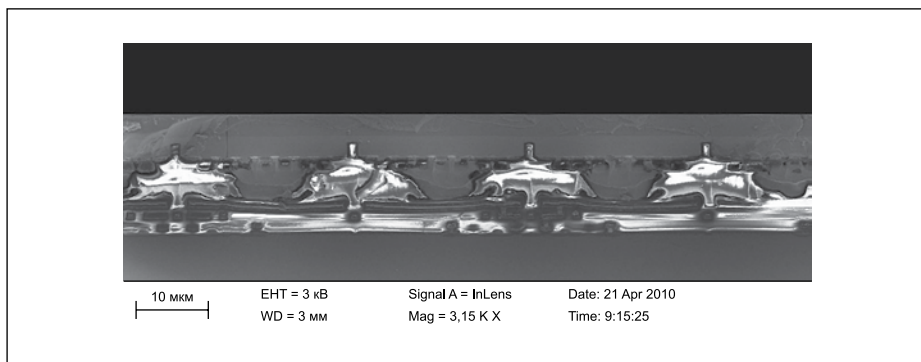


Рис. 7. Скол детектора после проведения flip-chip гибридации. (Хорошо виден контакт между мультиплексором и фоточувствительной частью посредством индия; также хорошо видны элементы двумерной дифракционной решетки)

трического контакта между соответствующими пикселями обеих матриц. После этого пространство между матрицами заполняется специальным клеем. Полученный гибридный монтируется на керамическом носителе и направляется на утонение, где сначала механически, а затем химически полностью удаляется подложка арсенида галлия, на которой выращивалась фоточувствительная структура.

Завершается процесс гибридации монтированием на керамический носитель температурных диодов и, если требуется, других компонентов, а также ультразвуковой сваркой выводов мультиплексора с выводами носителя. После этого детектор приобретает законченный вид (рис. 7) и поступает на аттестацию для отправки заказчику либо для интегрирования в модуль.

Следует отметить, что контрольные измерения на соответствие техническим требованиям проводятся для каждой матрицы несколько раз в течение процесса гибридации. Качество ультразвуковой сварки каждой матрицы и каждого проводка контролируется неразрушающими испытаниями.

QWIP-датчики и модули длинноволнового диапазона компании IRnova

Спектр продукции компании IRnova включает в себя QWIP-детекторы (фоточувствительная матрица с мультиплексором на носителе) различного разрешения и спектральной чувствительности, а также готовые модули на их основе. В состав модуля помимо детектора входит вакуумированный контейнер (дюар) и блок охлаждения по циклу Стирлинга (рис. 8). Заказчик имеет возможность выбора между применением готового модуля и заказом отдельной QWIP-матрицы с ее последующей интеграцией с охладителем. Следует отметить, что второй путь требует наличия большого количества разнообразных know-how на более низком уровне, чем обычно необходимо при разработке аппаратуры. Использование готового модуля значительно упрощает задачу разработчиков готовой аппаратуры. В этом случае разработчик мо-

жет сосредоточиться на вопросах приборостроения, специфических для задач, которые должен решать данный прибор: на подборе оптики, питания, механической подвески, теплоотвода, обработки изображения и т. п.

Непосредственно QWIP-датчики доступны для заказа в четырех разрешениях с разным шагом матрицы: 320×256, 384×288,



Рис. 8. QWIP-датчик и готовые модули на его основе

Таблица 1. Характеристики QWIP-датчиков

QWIP-датчик	IRnova320-ER FPA	IRnova384-ER FPA	IRnova640 FPA	IRnova640-ER FPA
Разрешение / шаг матрицы, мкм	320×256 / 30	384×288 / 25	640×480 / 25	640×512 / 25
Диапазон спектрального отклика, мкм	7,5–9			
Пик спектрального отклика, мкм	8,6			
Разность температур, эквивалентная временному шуму / пространственному шуму, (NETD), мК	25 / 10	25 / 10	30 / 15	30 / 15
Количество пикселей, соответствующих техническим критериям, %	>99,9			
Оптический отклик	20 мВ/°С	20 мВ/°С	7 мкА/°С	20 мВ/°С
Коэффициент заполнения активной площади, %	93	92	92	92
Динамический диапазон, дБ	> 78			
Траб датчика, К	70			
Максимальная частота кадров, Гц	260	260	60	107

Модуль	IRnova384-ER-LW integral cooler DDCA	IRnova320-ER-LW integral cooler DDCA	IRnova320-ER-1055 integral cooler DDCA**
Разрешение / шаг матрицы, мкм	384×288 / 25	320×256 / 30	320×256 / 30
Диапазон спектрального отклика, мкм	7,5–9		
Пик спектрального отклика, мкм	8,6	10,55	—
Разность температур, эквивалентная временному шуму / пространственному шуму, (NETD), мК	25 / 15	25 / 15	30 / 15
Апертурное число (F/#)	F/2		
Количество пикселей, соответствующих техническим критериям, %	>99,9		
Частота кадров, Гц	60		
Интерфейс	LVDS и I ² C		
Потребляемая мощность, Вт	10		
Питание, В	12		
Вес, г	550		

640×480 и 640×512 (табл. 1). Датчики работают в дальнем ИК-диапазоне и имеют чувствительность от 7,5 до 9 мкм. Особенностью приборов на квантовых ямах является сравнительно узкая полоса спектральной чувствительности и возможность ее подстройки в широком диапазоне. Поэтому нужно выделить серию модулей IRnova320 (табл. 2). Представленная линейка включает в себя два модуля с разрешением 320×256 с шагом 30 мкм и 384×288 с шагом 25 мкм. Помимо схожих механического и оптического интерфейсов, одинакового охладителя и близкого разрешения, эти модули объединяет практически идентичный электрический интерфейс.

Особый интерес представляет модуль IRnova320-ER-1055, пик спектрального отклика которого настроен на значение 10,55 мкм. Этот модуль специально изготовлен для применения в тепловизионной технике при поиске утечек элегаза (электротехнический газ, представляет собой шестифтористую серу — SF₆, шестифтор) является необходимой средой для энергетики, где он широко используется как пламя-



Рис. 9. Пример изображения, полученного с помощью модуля IRnova640

Таблица 3. Характеристики модуля IRnova640

Модуль	IRnova640 integral cooler DDCA
Разрешение / шаг матрицы, мкм	640×480 / 25
Диапазон спектрального отклика, мкм	7,5–9
Пик спектрального отклика, мкм	8,6
Разность температур, эквивалентная временному шуму, мК	35
Разность температур, эквивалентная пространственному шуму, мК	15
Апертурное число (F/#)	F/2,7
Количество пикселей, соответствующих техническим критериям, %	>99,9
Частота кадров, Гц	30
Интерфейс	I ² C
Потребляемая мощность, Вт	50 (охлаждение); 17 (стационарный режим)
Питание, В	13,5 / 12 / 3,3
Вес, г	700

гаситель и изолирующий компонент в закрытой среде, а также в коммутационной аппаратуре высокого напряжения. Инертные и диэлектрические свойства элегаза обеспечивают экономичную работу оборудования с низкой частотой технического обслуживания. По сравнению с обычным, оборудование на основе элегаза компактнее на 90%. С другой стороны, элегаз обладает примерно в 20 тысяч раз более сильным парниковым эффектом, чем углекислый газ. Кроме того, он дорог. Вопрос контроля его утечек акту-

ален и во многих странах регулируется законодательно. Кроме элегаза модуль может применяться для обнаружения утечек многих других газов, имеющих линии поглощения в районе 10,5 мкм, например аммиака.

Для применений, требующих большего разрешения, подойдет модуль IRnova640 DDCA (табл. 3). Его можно использовать в специальных приборах для поиска и идентификации объектов, для поиска и спасения людей, а также в промышленности. На рис. 9 и 10 приведены примеры возможностей инфракрасной камеры на базе модуля IRnova 640. Видно, что применение этого продукта вкуче с качественной оптической позволяет проводить идентификацию объекта на расстоянии более 5 км, а обнаружить — на расстоянии 18 км.

Заключение

Приборы на основе КЯ, благодаря своим особенностям, все чаще используются в длинноволновой области ИК-спектра. Главной особенностью QWIP по отношению к КРТ-технологии в длинноволновом ИК-диапазоне является отличное качество изображения, долговременная стабильность работы матрицы, надежность и конкуренто-

способная цена. По ряду параметров QWIP-датчики являются лучшим решением с точки зрения функциональности и стоимости приборов для выполнения определенных задач, связанных прежде всего с наблюдением, то есть там, где задействован оператор.

IRnova является надежным, хорошо зарекомендовавшим себя партнером в поставках как матриц, так и модулей дальнего ИК-диапазона. Тысячи приборов IRnova используются заказчиками по всему миру в различных применениях, в том числе в промышленных. Даже среди приборов на КЯ приборы IRnova выделяются высоким процентом работающих пикселей (в среднем более 99,9%) и однородным изображением. ■

Литература

1. Кортаев В. В., Мельников Г. С., Михеев С. В. и др. Основы тепловидения: Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2012.
2. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004.
3. http://www.flir.com/uploadedfiles/Eurasia/MMC/Tech_Notes/TN_0001_RU.pdf
4. http://www.laserportal.ru/content_471
5. <http://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/sistemy-teplovideniya-7.html>

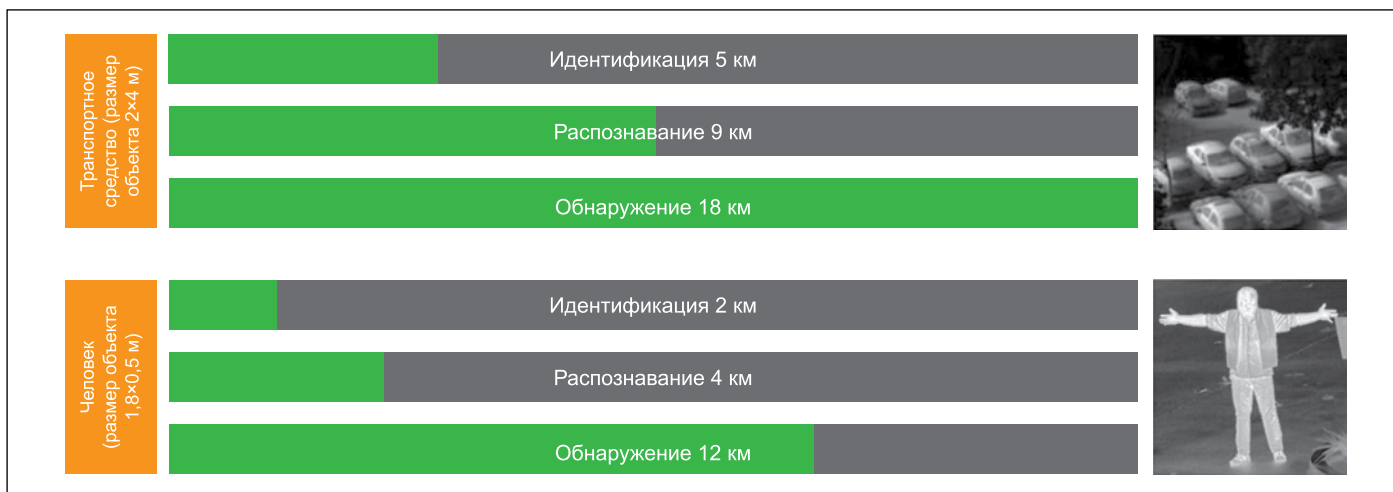


Рис. 10. Пример применения модуля IRnova640 для объектива 704 мм. 1,3° — угол зрения (вероятность обнаружения, распознавания и идентификации на указанных дистанциях принята равной 0,5 при разности температур 2 °С и коэффициенте атмосферного затухания 0,85/км)