

УДК 621.383

## Большие смотрящие КРТ-матрицы компании "Софрадир"

Ф. Триболе

Компания "Софрадир", г. Шатенэ-Малабри, Франция

Ж. Дестефанис

Лети/Си, г. Гренобль, Франция

*Число элементов в смотрящих матрицах разных ИК-диапазонов становится все больше и больше, благодаря чему появляются системные решения многих вопросов. Компания "Софрадир" (Франция) усовершенствовала процесс создания чувствительного материала теллурида кадмия ртути (HgCdTe или КРТ) и подняла еще выше уровень технологии гибридной интеграции, достигнув новых вершин в создании высокоэффективных смотрящих матриц. За последние годы были внедрены многочисленные усовершенствования для достижения еще большей однородности матриц чувствительных элементов в фокальной плоскости (МФП), реализации новых функций в мультиплексорах таких, как аналого-цифровое преобразование (АЦП), и наконец, была существенно повышена надежность всей сборки криостата с микрокриогенной системой охлаждения (МКС). В "среднем" ИК-диапазоне (MWIR) представлено высокоэффективное фотоприемное устройство (ФПУ) на КРТ размерности 1280×1024. Рассмотрены тенденции в разработке перспективных ФПУ.*

Компания SOFRADIR ("Софрадир") опираясь на технологию теллурида кадмий ртути (КРТ) и возможность подстройки ее энергетического интервала, позволяющую охватить широкий диапазон инфракрасного спектра [1—17], предлагает высокоэффективные ФПУ для решения задач систем обеспечения безопасности, оборонного и космического назначения. Для обеспечения потребностей перспективных систем компания сосредоточила усилия на разработке устройств третьего поколения, отличительными особенностями которых являются многодиапазонность, а также большое число чувствительных элементов в матрицах фокальной плоскости. Для таких ФПУ необходимо создавать высококачественные, большие и однородные активные слои. Реализация поставленных задач становится доступной благодаря использованию гибкой технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) ввиду возможности выращивания нескольких слоев для многодиапазонных ФПУ, а также ввиду выращивания гетероэпитаксиальных слоев на подложках большого формата, выполненных из альтернативных материалов. Существующая технология выращивания по-прежнему опирается на использование жидкофазной эпитаксии на согласованных решетках из CdZnTe [3].

Несмотря на то, что данный материал хорошо адаптирован для выращивания КРТ как с точки зрения химии, так и физики, однако он имеет ограничение по максимально возможному формату. Для замены CdZnTe во Франции было решено использовать германий (Ge) [7, 8] благодаря тому,

что его поверхность легче подготавливать для выращивания МЛЭ как ex-situ, так и in-situ, а также благодаря значительно меньшей стабильности оксидов германия.

Компания "Софрадир" и LETI/CEA (LIR) создали специальное совместное предприятие (СП) под названием DEFIR (Design of Excellence for the Future of IR). Целью создания СП было сократить время подготовки внедрения в производство и повышение эффективности указанного нового технологического процесса для создания ФПУ третьего поколения. Новое предприятие DEFIR в своей работе продемонстрировало зрелость и воспроизводимость указанного нового материала, а также возможность изготавливать большие смотрящие матрицы в "среднем" ИК-диапазоне 3—5 мкм, такие как новое ФПУ компании "Софрадир" под названием JUPITER, имеющие 1280×1024 пикселей, расположенных с шагом 15 мкм.

### Обработка процесса выращивания МЛЭ пленок

Специалисты DEFIR используют для работы две машины для выращивания МЛЭ на подложках размером 3 дюйма, которые имеются в LETI/CEA. Данные машины обеспечивают исключительный контроль за параметрами выращиваемого материала и демонстрируют возможность создания высококачественных МФП для работы в "среднем" (MW) диапазоне ИК-спектра. Однако такие небольшие машины имеют существенное ограничение с точки зрения однородности создаваемого

материала, что может в дальнейшем ухудшить производственную себестоимость. Например, типичная карта, полученная с помощью ИК-преобразования Фурье (FTIR) по 36 точкам дает среднюю величину радиальной однородности на уровне  $(4,50 \pm 0,15)$  мкм. Для выращивания CdTe/Ge размером 4 дюйма однородность толщины CdTe, измеренная системой отображения с ИК-преобразованием Фурье по 260 точкам, равна  $(5,80 \pm 0,04)$  мкм. Радиальная однородность проиллюстрирована на рис. 1. Она лучше той, что может быть достигнута с помощью 3-дюймовых машин. Построение карты с ИК-преобразованием Фурье по 72 точкам дает величину  $(4,63 \pm 0,10)$  мкм. В будущем эту величину предполагается улучшить благодаря оптимизации элементов Cd и Te.

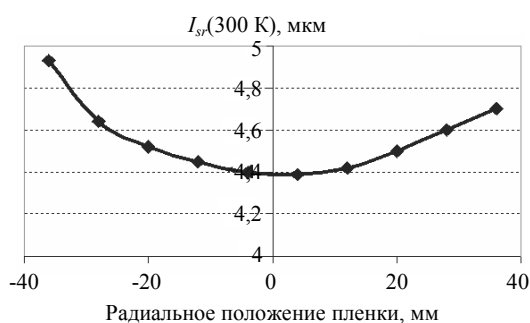


Рис. 1. Радиальные измерения правой граничной длины волны при 300 К

При выращивании CdTe на Ge анализ показывает, что абсолютная температура пластины воспроизводится с точностью  $\pm 6\text{—}8$  °C [11]. Изменение температуры можно отслеживать в реальном времени. Для контроля состава КРТ-слоев была в первую очередь внедрена спектрометрическая эллипсометрия. При таком контроле воспроизводимость состава слоев получается с точностью  $\pm 0,002$  [2].

### Результаты измерения процесса выращивания слоев

#### Воспроизводимость процесса выращивания

В процессе выращивания CdTe измерялись потоки As, Zn и CdTe с помощью выдвижного зонда Баерта-Альперта, и они подстраивались для нового процесса с использованием данных предыдущего процесса благодаря расчету отклонения ожидаемого сублимационного пара элемента. Качество кристаллов, являющееся ключевым моментом, характеризующим CdTe/Ge-слой, проверялось по измерениям средней величины полной ширины на половине от максимума (FWHM) двойной дифракционной кривой качания рентгеновского излучения. На рис. 2 представлено распределение

средней величины FWHM, полученное более чем по 100 3-дюймовых CdTe-слоев. В настоящее время достигнуты величины, близкие к 100 угл. сек. Те слои, которые характеризуются средней величиной  $\text{FWHM} < 150$  угл. сек, отбираются для дальнейшего использования в процессе создания КРТ-фотодиодов, а затем и производства матриц. Слои с средней величиной  $\text{FWHM} 150\text{—}200$  угл. сек применяются для калибровки КРТ. Среднеквадратичное отклонение для отображения FWHM равно  $\pm 40$  угл. сек, т. е. может быть получен коэффициент полезного выхода, равный 75 %.



Рис. 2. Дисперсия среднего значения угла FWHM для 3-дюймовой CdTe/Ge-поверхности в зависимости от количества циклов производственного процесса МЛЭ

Для определения характеристик состава КРТ измеряли передачу при преобразовании Фурье и правую граничную длину волны при 300 К. Затем были рассчитаны значения правой граничной длины волны  $(L_{sr})$ , ожидаемые при 77 К и удовлетворяющие спектральному отклику функционального ФПУ. На рис. 3 показана правая граничная длина волны  $L_s$  (77 К), пересчитанная из значения ИК-преобразования Фурье для  $L_s$  (300 К), измеренного на трех HgCdTe/Ge-слоях, полученных во время разных циклов производства МЛЭ, что включает в себя более 100 таких КРТ-слоев. Статистические данные оказываются равными  $L_{sr} = (5,22 \pm 0,39)$  мкм при 77 К, и продемонстрирована очень хорошая воспроизводимость процесса выращивания КРТ.



Рис. 3. Дисперсия значения правой граничной длины волны при 77 К, измеренной более чем по 100 3-дюймовым слоям КРТ на подложке из Ge

Дисперсию можно сократить, если использовать *in-situ* эллипсометрический контроль [1] состава сплава. Наблюдалось 4-, 5-кратное улучшение распределения. Такой контроль будет разработан и внедрен для использования на 4-дюймовой машине Epineat.

### Качество эпитаксиальных слоев

Из результатов, полученных DEFIR видно, что эпитаксиальные слои, выращенные методом МЛЭ, сегодня достигли определенного качества (таблица), сравнимого с качеством эпитаксиальных слоев, получаемых при хорошо налаженной технологии жидкофазной эпитаксии (плотность смешения порядка  $<5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ , концентрация носителей после отжига *n*-типа — порядка  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , подвижность электронов —  $10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{В}^{-1}$ , срок жизни неосновных носителей заряда порядка нескольких микросекунд и т. п.).

### Характеристики материала слоев, выращенных методом МЛЭ

Тип материала	Плотность смещений	Измерения топографии в рентгеновском излучении
Заготовка CdZnTe	$<5 \cdot 10^4 / \text{см}^2$	20—40 угл. сек
МЛЭ HgCdTe на CdZnTe	$<5 \cdot 10^4 / \text{см}^2$	+10—30 угл. сек относительно подложки
МЛЭ CdTe на Ge	$<5 \cdot 10^5 / \text{см}^2$	80—100 угл. сек
МЛЭ HgCdTe на Ge	$<5 \cdot 10^6 / \text{см}^2$	90—130 угл. сек

При выращивании HgCdTe на Ge плотность дефектов измеряли вручную с помощью оптического микроскопа. При этом оказывается, что плотность дефектов размера более 1 мкм составляет порядка 200—300 на квадратный сантиметр. Под дефектами понимаются пустоты, выпавший в осадок теллур и пылевидные соединения кадмия и теллура. В соответствии с наблюдениями [13] подтверждается влияние негативных эффектов таких дефектов на характеристики будущего устройства. Измеренная методом Ханнерта и Шенка [14] плотность ямок травления оказывается порядка  $10^6 / \text{см}^2$  при использовании буферного слоя CdTe/Ge, решетка которого не согласована с HgCdTe. В настоящее время проводятся работы [15], направленные на уменьшение плотности ямок травления HgCdTe, выращенного на CdTe/Si благодаря согласованию решеток буферного слоя путем добавления Zn либо Se, либо обоих этих материалов. Авторы статьи также проводят исследования в данном направлении для композитных подложек из CdTe/Ge. Однако было показано, что получаемая плотность смешения соответствует VLP ограниченному ФПУ, работающему в "сред-

нем" (MW) ИК-диапазоне при температуре 80—140 К и имеющему малое число дефектных пикселей.

Качество кристаллов оценивается по полной ширине на половине от максимума (FWHM) дифракционной кривой качания рентгеновского излучения. Мы использовали спектральную линию излучения Cu  $K_{\alpha}$ , сфокусированную на пятне размером  $10 \text{ мм}^2$ . В эксперименте использовался прибор DCD-Pro компании Accent, способной снимать карту заготовочных пластин размером до 4 дюймов включительно. Для слоев CdTe/Ge обычной толщины в 7 мкм средний результат составил 80—100 угл. сек, для толщины 10 мкм — 50 угл. сек. Авторы регулярно получали результаты от 90 до 130 угл. сек на HgCdTe/Ge, что показывает высокое качество структуры эпитаксиальных слоев. На рис. 4 представлена карта 4-дюймового слоя HgCdTe, характеризующегося величиной FWHM, равной  $(97 \pm 14)$  дюймов.

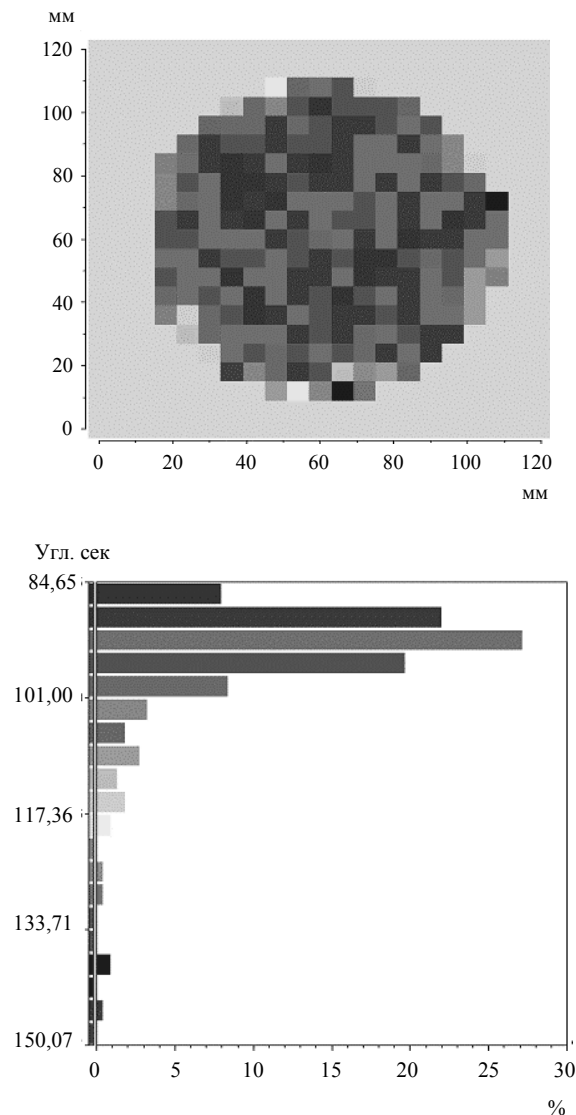


Рис. 4. Карта 4-дюймового слоя HgCdTe/Ge с величиной FWHM, равной  $(97 \pm 14)$  дюймов

Другим ключевым параметром является морфология поверхности, имеющая первостепенное значение для достижения высоких характеристик создаваемых приборов. Мы получили очень гладкую, зеркальную поверхность HgCdTe для слоев размером как 2, так и 3 дюйма [8—10], и позже — для 4-дюймового HgCdTe на Ge, как показано на рис. 5.

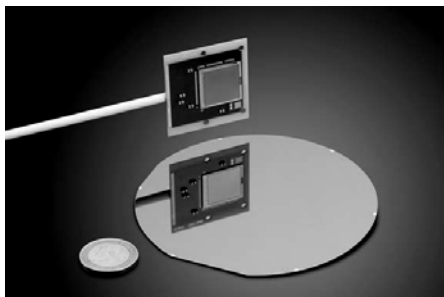


Рис. 5. Морфология поверхности 4-дюймового HgCdTe/Ge

### Большая смотрящая матрица "среднего" (MW) ИК-диапазона 1280×1024 с шагом чувствительных элементов 15 мкм

Для обеспечения очень больших дальностей обнаружения и идентификации необходимо повысить разрешающую способность детектора. Например, для систем тепловизионного поиска и сопровождения целей (IRST), а также для разведывательных систем большой дальности необходимо использовать матрицы "среднего" (MW) ИК-диапазона очень большого формата и совместимые с медленной оптикой.

Для удовлетворения таких потребностей компания "Софрадир" разработала в совместном предприятии DEFIR детектор, состоящий из 1280×1024 фотоэлементов (общее число элементов — 1,3 млн.!), чувствительных в диапазоне 3—5 мкм. Прибор уже готов для серийного производства.

Детектор состоит из микросхемы-мультиплексора считывания сигнала (ROIC), гибридной с КРТ-матрицей среднего диапазона MW. При этом используется новый КРТ-материал, выращенный методом МЛЭ на 4-дюймовой подложке из германия. Благодаря этому оказалось возможным создать матрицу очень большого формата с очень высокой степенью однородности и добиться приемлемой себестоимости производства. КРТ-матрица выполнена из диодов *N*-типа, имплантированных в КРТ-слой *p*-типа. Правая граничная длина волны материала превышает 5,3 мкм, коэффициент заполнения — больше 80 %.

Выбор шага чувствительных элементов 15 мкм опять же связан с решением экономической задачи обеспечения приемлемой себестоимости. Действи-

тельно, 15-микронный шаг позволяет по-прежнему использовать существующие на современных заводах по производству микросхем установки совмещения и последовательного шагового мультиплицирования на пластину. Благодаря этому достигается бóльший процент полезного выхода изготавливаемых микросхем, а также увеличивается число матриц, размещаемых на КРТ-пластине заготовки (так, при использовании 15-микронного шага на 4-дюймовой КРТ-пластине заготовки размещаются 18 матриц размером 1280×1024, что в 1,8 раза превышает число матриц такого же формата, но имеющих шаг чувствительных элементов 20 мкм).

Такая МФП с очень высоким разрешением требует использования эффективной системы холодного экрана. Предлагается холодный экран высотой 30 мм, который адаптирован для малых значений *f*, вплоть до 1.

Были минимизированы термальная масса и термальная нагрузка, и криостат использовался с линейной МКС Стирлинга мощностью 1 или 1,5 Вт (рис. 6).



Рис. 6. Криостат для детектора JUPITER формата 1280×1024 в диапазоне MW

Микросхема-мультиплексор обладает высокими характеристиками и обеспечивает работу по принципу "мгновенного снимка". В микросхеме реализован простой электрический интерфейс со специальными функциями обработки. Максимальная зарядовая емкость составляет 4,7 Me<sup>-</sup>, реализованы оба режима считывания принятых данных: параллельное (Integrate While Read-out (IWR)) и последовательное (Integrate Then Read-out (ITR)) интегрирование и считывание. Есть два фиксированных формата изображения: 1280×1024 и 1024×1024, а также два оконных режима (использование одного или двух окон). Благодаря наличию цифрового интерфейса пользователь может выбрать 4 или 8 выходов, а также направление видеосканирования. Максимальная частота видеосигнала составляет 20 МГц на каждый выход, что является одним из наивысших значений, используемых в настоящее время для таких МФП. Максимальная выходная частота соответствует частоте кадров 120 Гц (при использовании 8 выходов) для полного формата матрицы,

т. е.  $1280 \times 1024$ . Это означает, что имеется возможность произвести "микросканирование" данной большой матрицы и получить изображение с разрешением  $2560 \times 2048$  пикселей при частоте кадров 30 Гц! Кроме того, можно оптимизировать потребление электроэнергии в зависимости от выбранного режима работы, потребление варьируется от 70 мВт (при работе с 4 выходами, частота 10 МГц) до 230 мВт (при работе с 8 выходами, частота 20 МГц).

### Результаты оценки характеристик ФПУ JUPITER

Несколько первых экспериментальных образцов МФП для ФПУ JUPITER, выращенных методом МЛЭ на подложке из германия, были помещены в экспериментальные криостаты и подвергнуты полному циклу испытаний. Измерения приведены при следующих условиях:

рабочая температура 80 К;

холодный экран соответствует использованию оптики  $f/2$ ;

максимальная частота выходного сигнала 20 МГц на выход;

4 сигнальных выхода;

время накопления (интеграции) 1,2 мс, что соответствует  $\sim 40$  % динамического диапазона при работе с протяженным черным телом температурой 20 °С.

Вначале был измерен спектральный отклик нескольких фотодиодов без холодного фильтра. Результаты приведены на рис. 7. Они показывают высокую однородность материала и значение правой граничной длины волны 5,5 мкм при температуре 80 К. Типичная спектральная чувствительность (рис. 8) составляет примерно 2,75 А/Вт при среднеквадратичном отклонении (СКО) меньше 5 %. Эта величина подтверждает высокую квантовую эффективность более 70 % с учетом пропускания входного окна. Соответствующее среднее значение эквивалентной шуму разницы температур (NETD) равно 19 мК для динамического диапазона менее 40 % и очень малом СКО (рис. 9). Плотность дефективных пикселей (критерий дефективности — NETD в два раза превышает среднее значение) показана на рис. 10. Очень малая плотность дефективных пикселей (в данном случае 0,18 %) подтверждает тот факт, что КРТ-материал, выращенный на германиевой подложке, способен обеспечить высокое качество создаваемых матриц чувствительных элементов. Линейность нового ФПУ измерялась для двух значений выходной частоты сигнала (10 и 20 МГц на каждый выход)

(рис. 11). Результаты показывают очень высокую линейность — лучше 99,7 %, начиная от нескольких процентов динамического диапазона (другими словами — коэффициента заполнения зарядовой емкости) до более чем 80 % динамического диапазона.

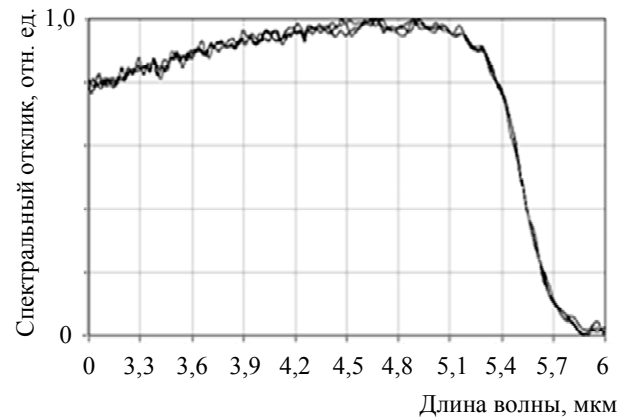


Рис. 7. Кривая спектральной чувствительности

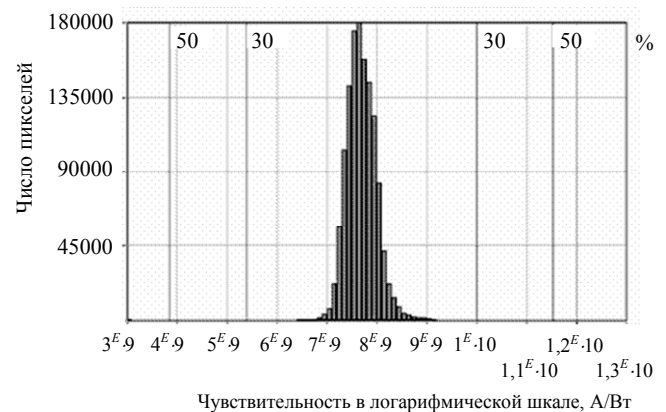


Рис. 8. Гистограмма спектральной чувствительности,  $\sigma = 4,7$  %

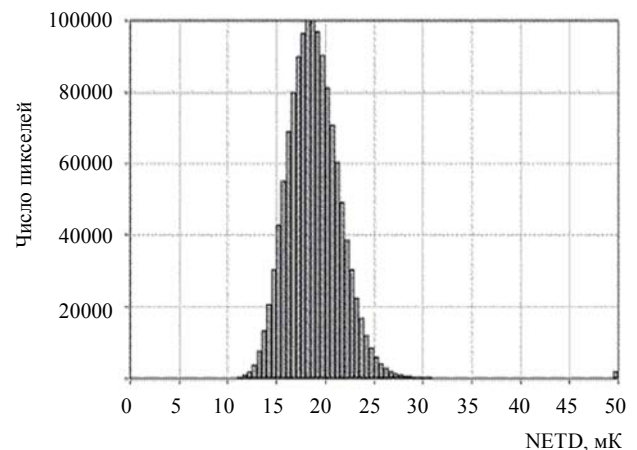


Рис. 9. Гистограмма NETD,  $\sigma = 14$  %

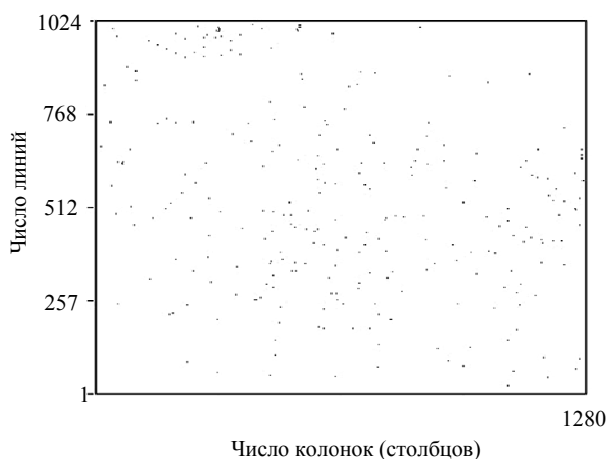


Рис. 10. Дефективные пиксели/работоспособность >= 99,8 %

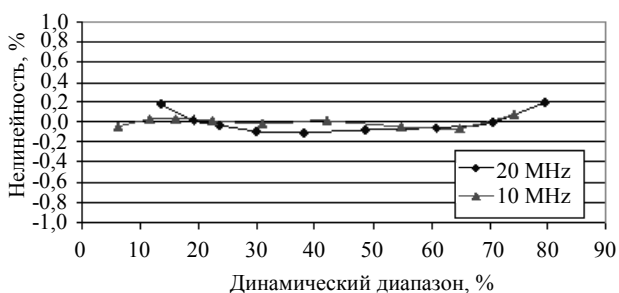


Рис. 11. Нелинейность в зависимости от динамического диапазона для двух значений выходной частоты

Была измерена также функция передачи модуляции (Modulation Transfer Function (MTF)) для длины волны 4,2 мкм (рис. 12). Значение MTF на частоте Найквиста (при  $33,3 \text{ мм}^{-1}$ ) оказывается более 0,57. Этот результат, полученный для наихудшего случая (принимая во внимание ограничения при проведении измерений), подтверждает высокое качество 15-микронной технологии компании "Софрадир" и показывает, что практически нет потери значения MTF при работе с таким малым шагом пикселей и малом числе  $f$ .



Рис. 12. Измерение значения MTF-пикселя

В качестве логического подтверждения этих измерений выполнена демонстрационная теплови-

зионная камера на базе данного ФПУ, которая показала отсутствие артефактов и высокое качество полученного изображения.

### Перспективы развития двухдиапазонных ИК-матриц

*Двухдиапазонная ИК-матрица в "ближнем" (SW) и "среднем" (MW) диапазонах ИК-спектра: формат 256×256 с шагом чувствительных элементов 25 мкм*

#### • Двухдиапазонная матрица чувствительных элементов фокальной плоскости

Одно из перспективных направлений развития больших смотрящих матриц относится к созданию двухдиапазонных матриц для увеличения дальности распознавания и обеспечения всепогодного применения ИК-систем.

Задача состоит в разработке одной МФП, способной одновременно и в одной и той же точке пространства обнаруживать ИК-излучение в различных диапазонах ИК-спектра, а затем производить обработку сигнала по двум параллельным каналам.

В микросхеме-мультиплексоре используется специальный конденсатор для каждого диапазона. Такой режим работы имеет значительные преимущества, так как позволяет легко разделять два фотопотока и проводить независимые оптимизации двух зарядовых емкостей, а следовательно, и оптоэлектронных характеристик.

Накопление (интеграция) заряда проводится в режиме "мгновенной съемки" для обоих диапазонов, однако ввиду того, что в детекторе используется только один столб на каждый пиксель, одновременная интеграция в двух диапазонах невозможна. Тем не менее временная задержка между двумя процессами интеграции минимизирована, как это видно из хронограммы, приведенной на рис. 13. Зарядовая емкость для каждого диапазона была оптимизирована для температуры фокальной плоскости 77 К и динамического диапазона от 290 до 350 К при 3—5 мкм и более 450 К — при 1—3 мкм. Считывание сигнала производится одновременно для двух диапазонов с использованием четырех видеовыходов (по два на каждый диапазон) на частоте 5 МГц. В таком режиме схема может обеспечить частоту кадров 100 Гц.

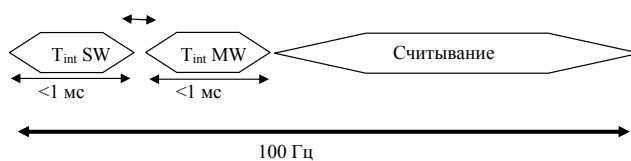


Рис. 13. Хронограмма режима считывания

Основные характеристики двухдиапазонной микросхемы-мультиплексора приведены ниже.

Технология .....	3,3 В—0,35 мкм
Число пикселей .....	256×256
Шаг пикселей, мкм .....	25
Схема матрицы .....	друг над другом
Зарядовая емкость для каждого диапазона, Ме <sup>-</sup> .....	9,3
Оптический коэффициент заполнения, %:	
для "ближнего" диапазона .....	90
для "среднего" диапазона .....	70
Режим накопления (интеграции) .....	мгновенный снимок
Режим считывания .....	после завершения интеграции
Когерентность .....	пространственная
Число выходов .....	2 (для каждого диапазона)
Соотношение сигнал/шум, дБ .....	81 (для каждого диапазона)
Рассеивание мощности при 77 К, мВт .....	15

На рис. 14 показан один из демонстрационных образцов, работающий с тестовой схемой.

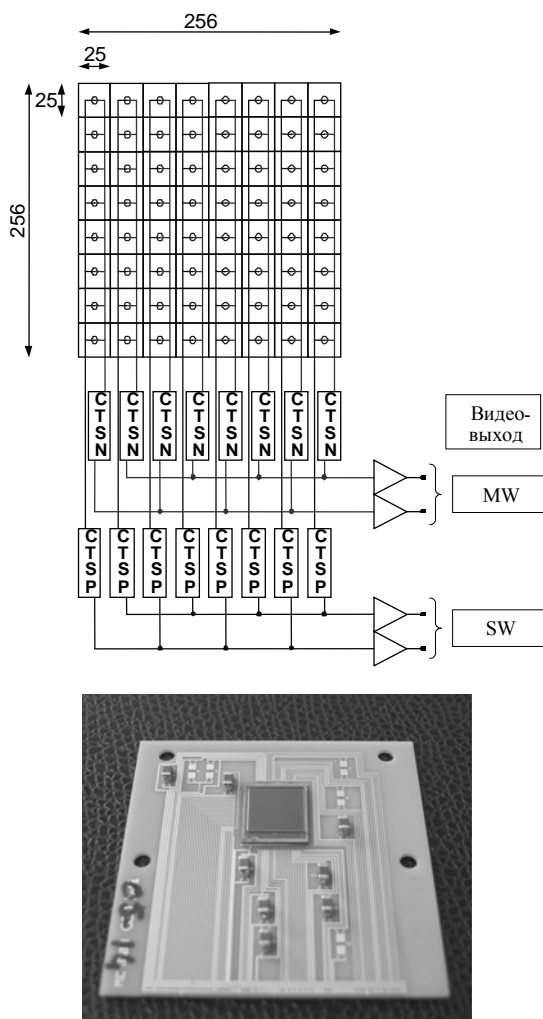


Рис. 14. Упрощенная архитектура NPN демонстрационного образца (сверху) и один из двухдиапазонных демонстрационных образцов, установленный на лабораторной схеме

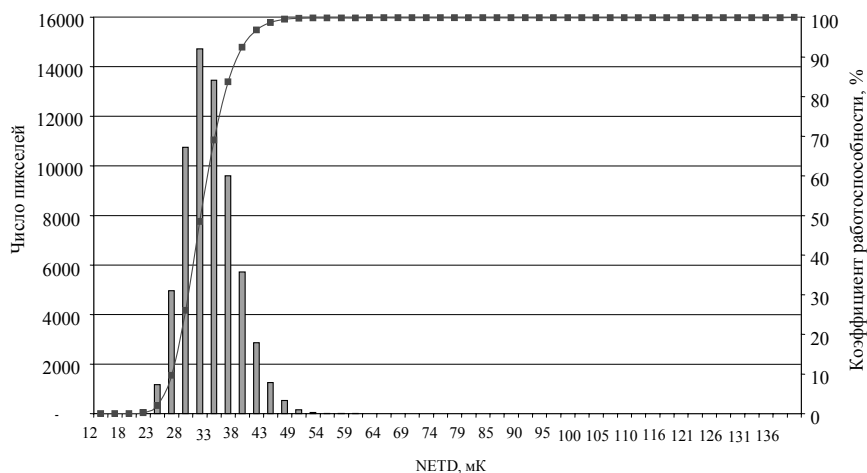
### • Оптоэлектронные характеристики

Была произведена гибридизация пяти матриц, а затем сняты их характеристики при 77 К. Для проведения оптоэлектронных измерений было установлено поле зрения в 30° ( $F/2$ ). Время накопления сигнала для каждой матрицы настраивалось индивидуально порядка 550 мс (диапазон 3—5 мкм) и 230 мс (диапазон 2—3 мкм), чтобы обеспечить заполнение половины зарядовой емкости при наблюдении сцены с температурой 50 °С для диапазона 3—5 мкм и 220 °С — для диапазона 2—3 мкм.

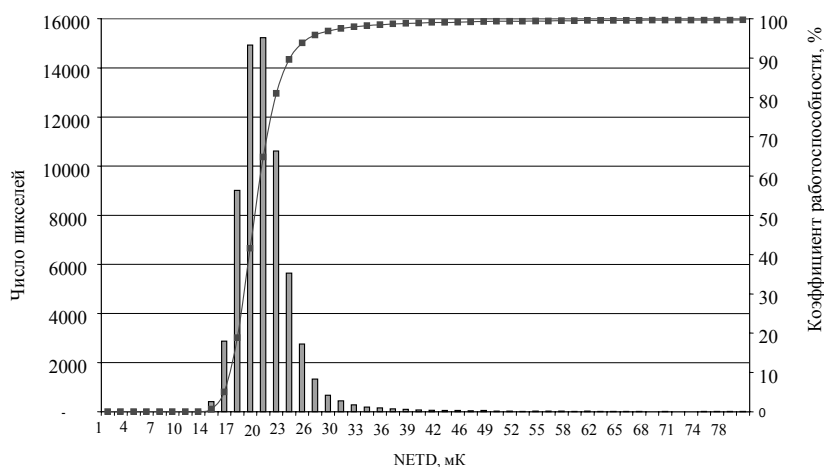
Для всех матриц среднее значение чувствительности составило примерно 50 нА/К в "ближнем" (SW) ИК-диапазоне и 32 нА/К — в "среднем" (MW) ИК-диапазоне. Это соответствует средней квантовой эффективности 90 и 55 % для "ближнего" и "среднего" диапазонов ИК-спектра, соответственно, при оптическом коэффициенте заполнения 90 и 70 %.

Проведенные ранее измерения продемонстрировали, что даже если геометрический коэффициент заполнения для "среднего" диапазона оказывается невелик, оптический размер может достигать геометрического размера пикселя вследствие внутренних отражений на границах бороздок. Коэффициент работоспособности пикселей (т. е. число пикселей, имеющих чувствительность в пределах  $\pm 3$  %), всегда превышает 99 % для "ближнего" диапазона и более 98,9 % — для "среднего". Это доказывает эффективность всего применяемого технологического процесса несмотря на то, что пройден только исследовательский этап.

Отмечалась хорошая повторяемость значений разности температур, эквивалентной шуму NETD. Среднее значение NETD составило около 20 мК для "среднего" диапазона и около 35 мК — для "ближнего". Такие значения NETD соответствуют ФПУ с ограничением только по фоновому шуму. Коэффициент работоспособности достигает 99 % в обоих диапазонах. Под коэффициентом работоспособности понимается число пикселей с NETD меньше, чем двухкратное среднее значение NETD. Качество технологии продемонстрировано на рис. 15, а, б, на которых представлена пространственная карта NETD для одного из демонстрационных образцов. Наблюдается небольшое количество дефектных пикселей и отсутствие значительных кластеров. Число неработоспособных пикселей составляет только 0,11 % для "ближнего" ИК-диапазона и 0,32 % — для "среднего".



a



b

Рис. 15. Гистограмма и пространственная карта значений NETD, измеренные для одного из демонстрационных образцов в диапазоне: а — 2—3 мкм; б — 3—5 мкм

При использовании демонстрационного образца были получены высококачественные изображения, одно из них показано на рис. 16. Слева показано изображение в "ближнем" ИК-диапазоне, хорошо видна вольфрамовая нить накаливания лампы, справа — изображение в "среднем" ИК-диапазоне той же самой сцены. Видно, что изображение лампы полностью насыщено, зато становится видна рука оператора.

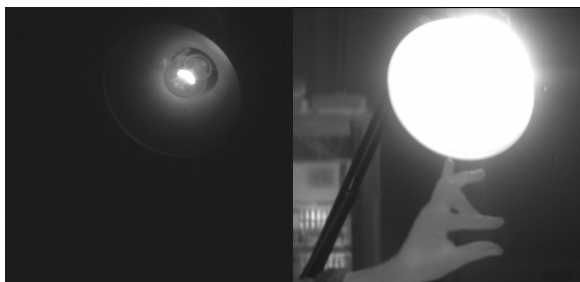


Рис. 16. Изображения в "ближнем" (SW) и "среднем" (MW) ИК-диапазонах, полученные с использованием двухдиапазонного NPN демонстрационного образца

**Двухдиапазонная матрица в "среднем" (MW) и "дальнем" (LW) ИК-диапазонах: псевдопланарная двухдиапазонная матрица чувствительных элементов в фокальной плоскости**

Для отработки данной технологии была разработана микросхема-мультиплексор размерности 256×256 с шагом пикселей 30 мкм. Архитектура такой микросхемы довольно проста и близка к архитектуре односпектральной микросхемы благодаря тому, что для каждого пикселя используются два независимых столба — по одному на каждый диапазон. Для каждого диапазона используется специальный конденсатор, что дает возможность производить независимую оптимизацию оптоэлектронных характеристик. Накопление (интеграция) сигнала происходит в режиме "мгновенного снимка" одновременно в обоих диапазонах. В этом проявляется основное преимущество псевдопланарной технологии, совмещающей в себе временную и квазипространственную когерентность.

Зарядовая емкость была оптимизирована для температуры фокальной плоскости 77 К и динамического диапазона 290—350 К в спектрах 3—5 и 8—10 мкм. Данная схема работает по принципу последовательного накопления и считывания сигнала (Integrate Then Readout (ITR)) — согласно хронограмме, приведенной на рис. 17. Считывание сигнала производилось одновременно для обоих диапазонов спектров с использованием двух видеыходов (по одному на диапазон) с частотой 5 МГц (схема может работать и с частотой кадров 100 Гц).

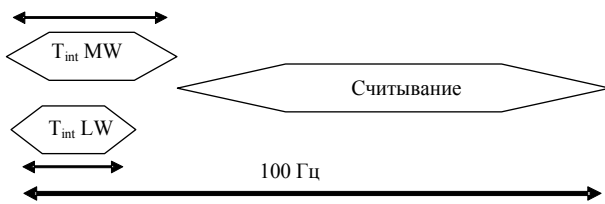


Рис. 17. Режим работы двухдиапазонной демонстрационной матрицы

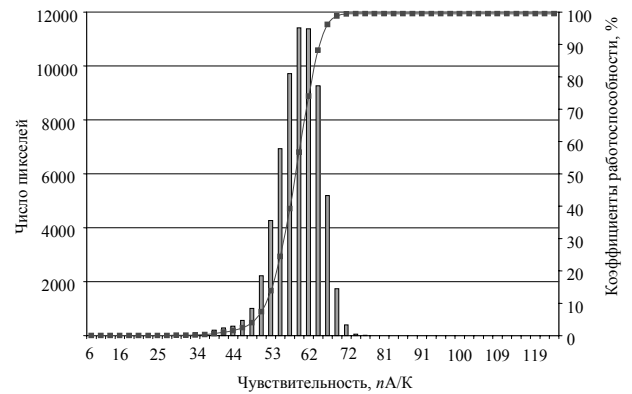
Основные характеристики двухдиапазонной микросхемы-мультиплексора приведены ниже.

Технология .....	3,3 В—0,35 мкм
Число пикселей .....	256×256
Шаг пикселей, мкм .....	30
Схема матрицы .....	друг над другом
Зарядовая емкость для каждого диапазона, Ме <sup>-</sup> .....	19,7
Оптический коэффициент заполнения, %:	
для "среднего" диапазона .....	100
для "ближнего" диапазона .....	70
Режим накопления (интеграции) .....	мгновенный снимок
Режим считывания .....	после завершения интеграции
Когерентность .....	временная и квази-пространственная
Число выходов .....	1 (для каждого диапазона)
Соотношение сигнал/шум, дБ .....	81,6 (для каждого диапазона)
Рассеивание мощности при 77 К, мВт .....	13

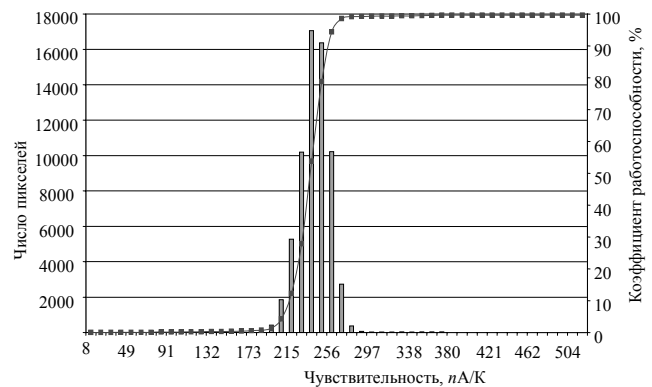
#### • Оптоэлектронные характеристики

Обработка псевдопланарной технологии производилась при 77 К в лабораторном криостате. Использовалась апертура  $F/2$ , время накопления (интеграции) сигнала подбиралось таким, чтобы динамический диапазон охватывал от 20 до 80 °С в обоих диапазонах ИК-спектра. На рис. 18 показана гистограмма чувствительности для одного демонстрационного образца. Результат соответствует оптическому коэффициенту заполнения 100 % для "среднего" диапазона и 70 % — для "дальнего". Коэффициент работоспособности (число пикселей, имеющих чувствительность в пределах

$\pm 3$  %) составляет 98,9 % в "дальнем" (LW) и 98,5 % — в "среднем" (MW) диапазонах ИК-спектра. Это действительно хороший результат для новой технологии.



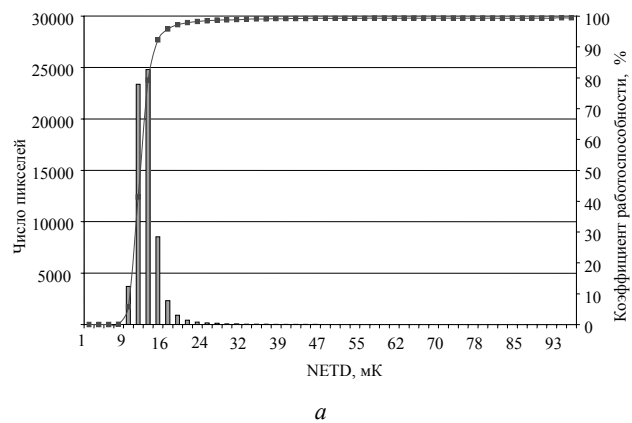
а



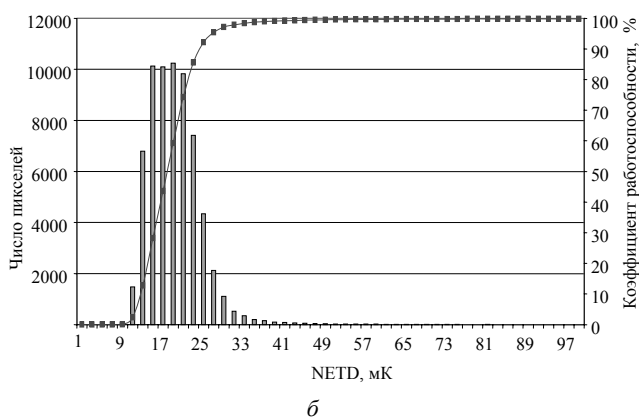
б

Рис. 18. Фотоотклики в "среднем" (а) и "дальнем" (б) диапазонах ИК-спектра для двухдиапазонной P-P демонстрационной матрицы, измеренные при 77 К

Гистограммы значений NETD приведены на рис. 19, при 77 К, апертуре  $F/2$ , времени накопления 747 мс при динамическом диапазоне от 50 до 80 °С для "среднего" диапазона и при 2560 мс — для "дальнего" диапазона. Для "среднего" ИК-диапазона достигается величина NETD, равная 12 мК, а для "дальнего" — 25 мК. Такие характеристики близки к характеристикам VLIP ФПУ. В "среднем" диапазоне ИК-спектра коэффициент работоспособности (число пикселей, имеющих значение NETD менее удвоенного среднего значения NETD) близок к 99 %. В "дальнем" ИК-диапазоне коэффициент работоспособности не столь высок (92,15 %), что указывает на необходимость продолжения разработки данной новой технологии для достижения совершенства моноспектральных компонентов КРТ в "дальнем" ИК-диапазоне.



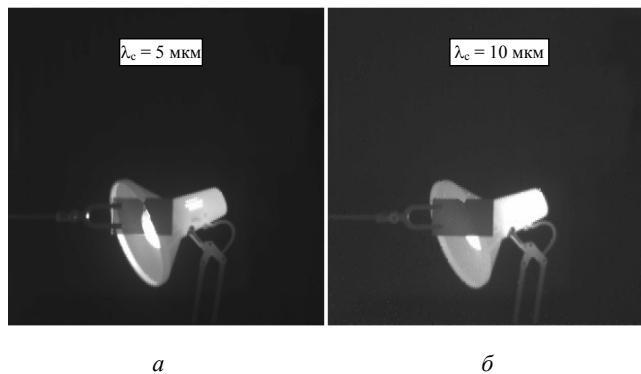
а



б

Рис. 19. Гистограмма значений NETD в "среднем" (а) и "дальнем" (б) диапазонах ИК-спектра для двухдиапазонной Р-Р демонстрационной матрицы, измеренные при 77 К

С помощью демонстрационного образца были получены изображения с хорошим качеством (рис. 20). На рисунке изображена стеклянная пластина (со значением правой граничной длины волны 4,7 мкм), наблюдаемая в "среднем" и "дальнем" ИК-диапазонах. Расположенная на заднем плане лампа с вольфрамовой нитью накаливания видна на левом снимке и не видна на правом.



а

б

Рис. 20. Изображения в "среднем" (а) и "дальнем" (б) диапазонах ИК-спектра, полученные с помощью двухдиапазонной Р-Р демонстрационной матрицы

### Заключение

Переход к использованию больших подложек и пластин заготовок HgCdTe — необходимый шаг для производства очень больших матриц, таких как новая матрица формата 1280×1024 в "среднем" (MW) диапазоне ИК-спектра с шагом чувствительных элементов 15 мкм, именуемая JUPITER. В качестве альтернативного материала для подложек во Франции был выбран германий, и эта технология прошла успешную отработку. Кроме того, отработан переход от процесса выращивания CdTe/Ge, HgCdTe на 3-дюймовых подложках к 4-дюймовым, получаемый материал обладает большей однородностью по сравнению с материалом, выращенным методом ЖФЭ.

В области создания больших смотрящих матриц была продемонстрирована с хорошими результатами матрица с числом чувствительных элементов 1,3 млн. Перспективные направления развития охватывают создание двухдиапазонных матриц. Такие матрицы с малым шагом чувствительных элементов, равным 25 мкм, уже достигли совершенства в "ближнем" и "среднем" (SW/MW) диапазонах ИК-спектра. В "среднем" и "дальнем" (MW/LW) диапазонах ИК-спектра первые результаты, показанные демонстрационным образцом с шагом чувствительных элементов 30 мкм, обнадеживают. Предполагается, что такие двухдиапазонные матрицы достигнут своего совершенства в ближайшие пять—восемь лет.

Авторы благодарят группу специалистов компании SOFRADIR и LETI/CEA за разработку процесса выращивания материала методом МЛЭ, за дизайн и разработку нового ФПУ JUPITER в рамках работы СП DEFIR, а также Министерство обороны Франции за поддержку технологии HgCdTe и разработку новых матриц большого формата.

### Литература

1. Edwall D., Phillips J.// Journal of Electronic Materials, 2001. V. 30. № 6.
2. Rogalski A., Adamiec K., Rutkowski J. Narrow-gap semiconductor photodiodes, Bellingham, (WA), SPIE: Proc. Press, 2000.
3. Tribolet Ph., Chatard J. P., Costa P., Paltrier S.// J. Electron. Mat. 2001. V. 30 № 6. P. 574—584.
4. Dhar N. K., Zandian M., Pasko J. G., Arias J. M.// Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. P. 1730.
5. De Lyon T. J., Rajavel R. D., Jensen J. E., Wu O. K., Johnson S. M., Cockrun C. A., Vensor G. M.// J. Electron. Mat. 1996. V. 25. P. 1341.

6. Chen Y. P., Sivanathan S., Faurie J. P.// J. Electron. Mat. 1991. V. 22. P. 951.
7. Zanatta J. P., Ferret P., Duvaut P., Isselin S., Rolland G., Theret G., Million A.// J. of Cryst. Growth 184-185. 1998. P. 1297—1301.
8. Zanatta J. P., Ferret P., Theret G., Million A., Wolny M., Chamonal J. P., Destefanis G.// J. Electron. Mat. 1998. V. 27. № 6. P. 542—545.
9. Ballet P., Castelein P., Baylet J., Laffosse E., Fendler M., Pottier F., Gout S., Vergnaud C., Ballerand S., Gravrand O., Deplanche J. C., Martin S., Zanatta J. P., Chamonal J. P., Million A., Destefanis G., to be presented in Warsaw// Poland in August 2005. An account will appear on the proc. of SPIE. V. 5957.
10. Destefanis G., Astier A., Baylet J., Castelein P., Chamonal J. P., DeBorniol E., Gravrand O., Marion F., Martin J. L., Million A., Rambaud P., Rothan F., Zanatta J. P.// J. Electron. Mat. 2003. V. 32. № 7. P. 592—601.
11. Badano G., Garland J. W., Sivanathan S.// J. Cryst Growth. 2003. V. 251. P. 571—575.
12. Johs B., Herzinger C. M., Dinan J. H., Cornfeld A., Benson J. D.// Thin Solid Films. 1998. V. 313. P. 137—142.
13. Buell A. A., Pham L. T., Newton M. D., Venzor G. M., Norton E. M., Smith E. P., Varesi J. B., Harper V. B., Johnson S. M., Coussa R. A., De Lyon T. J., Roth J. A., Jensen J. E.// J. Electron. Mat. 2004. V. 33. № 6. P. 662—666.
14. Hannert and Schenk// J. of Cryst. Growth. 1990. V. 101. P. 251.
15. Chen Y. P., Brill G., Campo E. M., Hierl T., M. Hwang J. C., Dhar N. K.// J. Electron. Mat. 2004. V. 33. № 6. P. 498—502.
16. Large improvement in HgCdTe photovoltaic detector performance at LETI, G. Destefanis and J. P. Chamonal, LETI/CEA/Grenoble, France// Journal of Electronic Materials. 1993. V. 22. № 8).
17. New compact staring detectors for MW and LW applications, A. MANISSADJIAN & al.// SPIE, London 2004, [5612-05].

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## HgCdTe large staring arrays at SOFRADIR

*Ph. Tribolet*

SOFRADIR, CHATENAY-MALABRY, France

*G. Destefanis*

LETI/CEA, Grenoble Cedex, France

*The staring array numbers of pixels are larger and larger and offer system solutions in the different IR wavebands. At SOFRADIR, the HgCdTe (Mercury Cadmium Telluride / MCT) material and process, as well as the hybridization technology, have been taken to an even more advanced level of sophistication to achieve these new high performance staring arrays. A lot of technological improvement have been made regarding uniformity of Focal Plan Arrays (FPA), read-out circuits with new functions like the Analog to Digital Conversion (ADC), and finally the reliability of the whole dewar detector and cooler assembly have been drastically increased during these last years. In mid-wave (MWIR) 1280x1024 HgCdTe high performance staring array is presented. Also, development trends for future IR detectors are presented.*

УДК 621.383

## Низкофонное субматричное ФПУ формата 288×32 на основе InSb с цифровым режимом ВЗН

*В. Ф. Чишко, И. Л. Касаткин, И. Д. Бурлаков, А. А. Лопухин,  
В. П. Пономаренко, А. М. Филачёв*

ФГУП «НПО «Орион»» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Д. В. Бородин, Ю. В. Осипов*  
ООО "Импекс", Москва, Россия

*В. В. Карпов*  
ОАО «Московский завод «Сапфир»», Россия

*А. М. Крошин*  
ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», Самара, Россия

Разработано гибридное субматричное фотоприемное устройство (ФПУ) формата 288×32 элемента с фотодиодными чувствительными элементами на InSb и исследованы