

УДК 621.382: 621.383.5; 535.231.62

Применение эквивалентной шуму разности температур для сравнения фотоприемников сверхвысокой размерности на основе многослойных структур с квантовыми ямами

© 2020 г. **А. И. Козлов***, канд. техн. наук; **А. Р. Новоселов****, канд. техн. наук;
М. А. Демьяненко*, канд. физ.-мат. наук; **В. Н. Овсяк***, доктор физ.-мат. наук

*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

**Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения

Российской академии наук «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», Новосибирск

E-mail: aikozlov13@mail.ru

Поступила в редакцию 11.10.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-01-37-44

Развита методология анализа температурного разрешения фотоприемников дальнего и среднего инфракрасного диапазонов. Обсуждаются особенности создания кремниевых мультиплексоров для таких фотоприемников. Анализируется эквивалентная шуму разность температур инфракрасных фотоприемников на основе кремниевых мультиплексоров с кадровым накоплением для фотодетекторов на основе многослойных структур с квантовыми ямами. Разработанные кремниевые мультиплексоры сравниваются с целью применения фоточувствительных кристаллов, в том числе имеющих повышенные темновые токи, для создания фотоприемников инфракрасного диапазона с температурным разрешением на уровне характеристик подобных фотоприемников ведущих компаний. Структурно-технологические принципы создания мозаичных фотоприемников развиты для случая сверхвысокой размерности. Рассмотрен достигнутый технологический уровень прецизионной микросборки кристаллов субмодулей в мозаичные фотоприемники. Предложены методы формирования мультиспектральной характеристики фоточувствительности мозаичных фотоприемников. Выполнен сравнительный анализ размеров «слепых зон» разных определяющих материалов.

Ключевые слова: инфракрасный мозаичный фотоприемник сверхвысокой размерности, кремниевый мультиплексор, сверхрешетки, фотоприемник на основе многослойных структур с квантовыми ямами.

Коды OCIS: 040.3060, 110.3080, 130.5990

ВВЕДЕНИЕ

Современные запросы рынка фотоприемников (ФП) дальнего и среднего инфракрасного (ИК) диапазонов и необходимость улучшения пространственного разрешения определяют актуальные направления развития кремниевых мультиплексоров (КМ) [1–8]. Фундаментальные направления исследований — увеличение размерности ФП и уменьшение размеров фоточувствительных элементов (ФЧЭ) [1–5]. Высокочувствительные ИК ФП с относительно большими размерами ФЧЭ применяются для увеличения дальности действия. Подобные ИК ФП продолжают оставаться среди предлагаемых моделей ведущих компаний. Применение

высокочувствительных ИК ФП с длиной волны максимума спектральной чувствительности в расширенном диапазоне 8–16 мкм обосновано на близких расстояниях при условии высокого фоновое излучения и минимального поглощения в среде распространения излучения. Различные характеристики, такие как обнаружительная способность, нормированная обнаружительная способность, эквивалентная шуму мощность, параметр R_0A , эквивалентная шуму разность температур (NETD) и др. могут быть использованы для сравнения различных ИК ФП. Параметр R_0A — это произведение площади ФЧЭ A и дифференциального сопротивления R_0 при нулевом напря-

жении смещения. Параметр R_0A демонстрирует уровень технологии и предельные фотоэлектрические характеристики ФЧЭ. Применение NETD для сравнения различных ИК ФП обеспечивает высокую степень ясности при прямом анализе общего шума системы преобразования изображений, включающей ИК ФЧЭ и канал считывания КМ при заданной разности температур в 1 К в качестве входного сигнала этой системы [1–8].

Фотодиоды на основе соединения кадмий-теллур (КРТ) и фотодетекторы на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ) наиболее часто используются для создания гибридных ИК ФП [1, 2, 4, 5, 8, 9]. Разные архитектуры КМ сравниваются качественно в работах [2, 4–8]. Концепция системы преобразования изображений, включающей ИК ФЧЭ и канал считывания КМ, вводится в употребление в серии статей, где соответственно оцениваются значения NETD [1–8]. Наиболее часто в этих публикациях анализируются системы, основанные на КРТ-фотодиодах и отличающиеся от других ИК ФП высокими квантовой эффективностью и неоднородностью параметров ФЧЭ по полю матрицы [2–7]. Однако подобные современные исследования фотодетекторов на основе МСКЯ (например на основе GaAs/AlGaAs), характеризующиеся высокой однородностью параметров ФЧЭ по полю матрицы, рассматриваются в литературе весьма ограниченно [1, 4, 5, 8, 9].

В настоящей статье изложены принципы создания КМ для исследования достижимых характеристик ИК ФП, для анализа системы, включающей ИК ФЧЭ и канал считывания КМ, с учетом структурно-технологических ограничений МСКЯ-фотодетекторов и применяемых КМ, также как и перспективы мозаичной технологии для производства ИК ФП сверхвысокой размерности.

МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ШУМУ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР ИНФРАКРАСНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Температурное разрешение длинноволновых ИК ФП в спектральном диапазоне 8–14 мкм проанализировано в зависимости от различных структурно-технологических параметров КМ и ФЧЭ, а именно в зависимости от параметра R_0A , квантовой эффективности η , размеров ФЧЭ l_{pix} , зарядовой емкости интегратора Q_{ROIC} в каждом канале КМ и длины волны λ_{max} максимума спектральной fotocувствительности ФЧЭ. Обычно КМ создают в виде массива ячеек считывания фотосигналов и системы мультиплексирования сигналов ячеек на общий выход или выходы [1–8].

Значения NETD оцениваются как отношение шума системы, включающей ИК ФЧЭ и канал считывания КМ, к температурной чувствительности ИК ФЧЭ при данной квантовой эффективности η

$$\text{NETD} = \frac{U_n}{(\partial U_{\text{sig}}/\partial Q)(\partial Q/\partial T)} \approx \frac{U_n \Delta T}{\Delta U_{\text{sig}}}, \quad (1)$$

где U_n — напряжение шума системы, включающей ИК ФЧЭ и канал считывания КМ, $\partial U_{\text{sig}}/\partial Q$ — вольтовая чувствительность ФЧЭ, Q — входной поток фотонов, $\partial Q/\partial T$ — температурный градиент, ΔT — разность температур на входе оптической системы и ΔU_{sig} — разность сигнального напряжения для данной разности ΔT [1, 3].

Напряжение шума системы «ИК ФЧЭ — канал считывания КМ», приведенное к емкости интегратора, вычислялось как функция параметра R_0A или темнового тока при температуре фона 300 К и апертурном угле 30°. Обобщенное выражение, иллюстрирующее вычисление U_n , может быть записано следующим образом:

$$U_n = \sqrt{\left(\frac{4kT}{R_{\text{det}}} + 2qgI_{\text{inp}} \right) \frac{\eta_{\text{inj}}^2 t_{\text{int}}}{2C_{\text{int}}^2} + \frac{4kTC_{\text{inp}}}{3C_{\text{int}}^2} + \int_{\Delta f} \frac{t_{\text{int}}^2}{R_{\text{det}}^2 C_{\text{int}}^2} \left(\frac{8kT}{3g_m} + \frac{A_m}{f^\alpha} \right) df + \frac{2kT}{C_{\text{int}}} + \int_{\Delta f_a} \left(\frac{8kT}{3g_{ma}} + \frac{A_a}{f^\alpha} \right) df}, \quad (2)$$

где R_{det} — дифференциальное сопротивление ФЧЭ, I_{inp} — общий ток ФЧЭ в рабочей точке, η_{inj} — входной коэффициент инжекции фотосигнала, C_{inp} — емкость входного узла, C_{int} — емкость интегратора, t_{int} — время накопления, g — фотоэлектрический коэффициент МСКЯ [10, 12], g_m — крутизна входного транзистора, g_{ma} — крутизна активного транзистора усилителя, A_m — спектральная плотность шума входного транзистора на частоте 1 Гц, A_a — спектральная плотность шума транзистора усилителя на частоте 1 Гц, A/f^α — наиболее общая форма записи $1/f$ -шума (фликкер-шума), Δf — полоса пропускания интегратора, Δf_a — по-

лоса пропускания усилительного каскада (усилителя) [2, 3, 7, 8].

При создании ИК ФП, как правило, требуется обеспечить режим ограничения фоном (ОФ), когда параметры ФП определяются шумом фонового излучения. Обычно, в режиме ОФ NETD обратно пропорционально корню квадратному из времени накопления t_{int} — $\text{NETD} \approx 1/(t_{\text{int}})^{1/2}$, поэтому в случае, когда температурное разрешение определяется $1/f$ -шумом входных транзисторов в ячейках КМ, соотношение вклада шумов в значение NETD должно быть проверено наиболее тщательно, потому что прямая пропорциональность

$NETD \approx (t_{\text{int}})^{1/2}$ следует из выражения для $\Delta\mu^1$ -зависимой модели $1/f$ -шума [1, 11].

В длинноволновом ИК спектральном диапазоне для оценки NETD выбрана более перспективная полоса фоточувствительности МСКЯ 8,5–9,5 мкм ФП [1, 4, 5, 8, 9]. Время накопления определялось из условия полного заполнения входным током емкости интегратора с учетом максимального напряжения питания технологии КМ с кадровым накоплением (КН) [1, 2, 4–8]. Характеристики ИК ФП проанализированы для КМ с КН при формате матрицы 640×512, четырех выходах, емкости в цепи обратной связи столбцового усилителя, равной емкости интегратора, шаге ячеек 20×20 мкм и 0,18 мкм-технологии кроме специально оговоренных случаев [1, 2, 4, 5].

¹ $1/f$ -шум, или фликкер-шум, транзистора общеизвестный из литературы шум, например [1, 11], наиболее распространены две модели, описывающие фликкер-шум — ΔN -зависимая модель и $\Delta\mu$ -зависимая модель.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА NETD ИНФРАКРАСНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ

Полученные аналитические оценки NETD ФП с использованием выражений (1)–(2) для МСКЯ и сверхрешеток (СР) иллюстрируются на рис. 1 а–г [1, 4, 10, 12]. В качестве примера можно рассмотреть СР на основе InAs/GaInSb, по которым выходит большое количество публикаций. Сверхрешетки на основе InAs/GaInSb находятся на стадии глубоких технологических исследований и обеспечивают параметр R_0A на порядок величины меньше, чем МСКЯ [10, 12]. Зависимости NETD ФП на основе СР изображены только как справочные значения для сравнения с МСКЯ [12]. Преимущества использования КМ с КН для МСКЯ-фотодетекторов и КМ с построчным накоплением (ПН) для КРТ-фотодиодов в расширенном длинноволновом ИК диапазоне 8–16 мкм выявлены в серии статей [1, 2, 4–8].

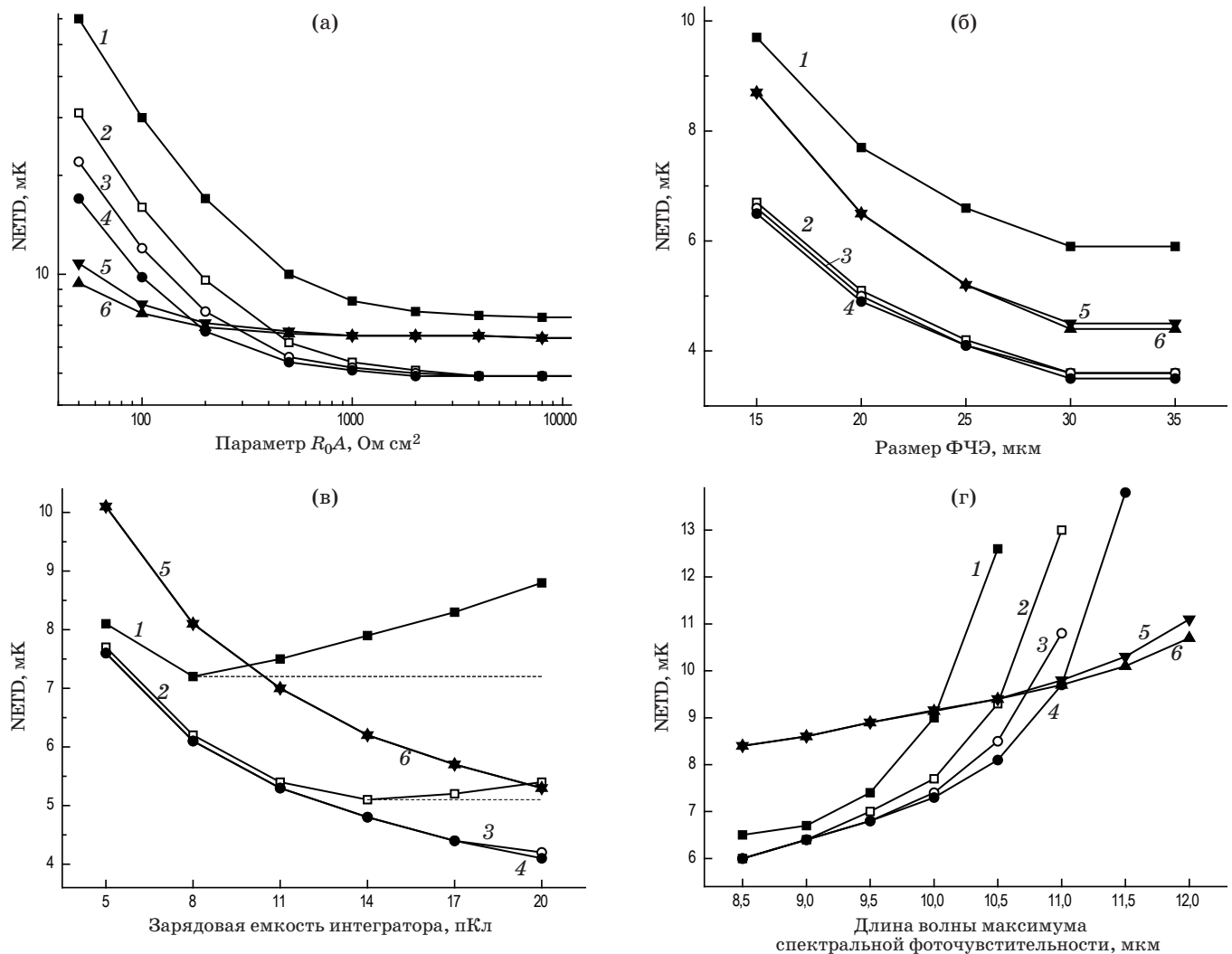


Рис. 1. Зависимости NETD ФП от параметра R_0A (а), от размеров ФЧЭ (l_{FET}) (б), от зарядовых емкостей интеграторов (Q_{ROIC}) в каналах КМ (в) и от длины волны максимума спектральной фоточувствительности (для КМ выбрана 0,35 мкм-технология) (г) при квантовой эффективности η МСКЯ 0,05 (1), 0,1 (2), 0,15 (3), 0,2 (4) и СР 0,3 (5), 0,4 (6).

При параметре $R_0A > 300 \text{ Ом см}^2$ ФП на основе МСКЯ с длиной волны максимума спектральной чувствительности около 9 мкм начинают обеспечивать предельное температурное разрешение —практически режим ОФ (рис. 1а). По мере того как параметр МСКЯ R_0A уменьшается, шумы темновых токов ФЧЭ и $1/f$ -шумы входных транзисторов в ячейках КМ значительно увеличиваются, поэтому NETD ФП ухудшается. Фотоприемники на основе МСКЯ ($\lambda_{\text{max}} \approx 9 \text{ мкм}$) обеспечивают лучшую NETD, чем на основе СР при $R_0A > 500 \text{ Ом см}^2$ и $\eta \geq 0,1$ (см. рис. 1а) [12]. Параметр NETD ФП на основе МСКЯ монотонно увеличивается по мере того, как линейные размеры ФЧЭ уменьшаются, но при $\eta \geq 0,1$ ФП на основе СР проигрывают ФП на основе МСКЯ в отношении значений NETD (рис. 1б) [1, 4]. Зарядовая емкость интегратора КМ $Q_{\text{ROIC}} = C_{\text{int}}E_P$, где E_P — напряжение питания технологии изготовления КМ. В типичных ИК ФП при квантовой эффективности МСКЯ порядка 5% не требуется зарядовая емкость интегратора КМ более 8 пКл, при квантовой эффективности порядка 10% достаточно $Q_{\text{ROIC}} < 14 \text{ пКл}$ (рис. 1в) [1]. Параметры NETD ФП на основе МСКЯ принимают очень хорошие значения в сравнении с параметрами NETD ФП на основе СР практически во всем диапазоне Q_{ROIC} при $\eta \geq 0,1$ (рис. 1в) [12]. Хорошее (порядка 6–7 мК) температурное разрешение ИК ФП обеспечивается в диапазоне длин волн максимума спектральной фоточувствительности 8,5–9,5 мкм практически независимо от квантовой эффективности МСКЯ, потому что NETD определяется шумом фонового излучения (режим ОФ). По мере дальнейшего роста λ_{max} происходит увеличение NETD ФП со значительным преимуществом для больших значений квантовой эффективности МСКЯ (рис. 1г, кривые 1–4) [1, 4]. Параметр NETD ФП на основе МСКЯ меньше, чем NETD ФП на основе СР при $\eta = 0,05\text{--}0,2$ в диапазоне $\lambda_{\text{max}} < 10\text{--}11 \text{ мкм}$ соответственно.

Применение NETD для сравнения различных ИК ФП сочетает простоту вычисления и наглядность прямого анализа ожидаемого отношения сигнал/шум при данной входной разности температур в 1 К [1, 2, 4–8].

АНАЛИЗ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ШУМУ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР МОЗАИЧНЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ СВЕРХВЫСОКОЙ РАЗМЕРНОСТИ НА ОСНОВЕ ФОТОДЕТЕКТОРОВ НА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Мозаичный принцип — один из перспективных технологических подходов для достижения сверхвысокой размерности ИК ФП. Мозаичные ФП (МФП) сверхвысокой размерности создаются на основе прецизионной микросборки фотоприемных

кристаллов субмодулей меньших форматов, приемлемых для изготовления (рис. 2) [13–17].

Мозаичные ФП сверхвысокой размерности обеспечивают высокую производительность и эффективность параллельного считывания фотосигналов при стандартной тактовой частоте субмодулей и практически неограниченное увеличение фоточувствительности путем структурирования ФЧЭ большой суммарной площади и, как результат, значительное увеличение дальности обнаружения целей и распознавания образов в ИК спектральном диапазоне [15–17]. Формат МФП компонуется на основе мозаичного принципа, а размеры структурированных ФЧЭ формируются суммированием площадей ФЧЭ в зависимости от требуемой фоточувствительности [14–17]. Количественный анализ «слепых зон» МФП выполнен в работах [15–17].

На рис. 2 анализируются достижимые значения NETD ИК МФП 3840×2160 при шаге 10 мкм (кривая 1) или 20 мкм (кривая 2) и кадровой частоте 100 Гц в зависимости от размерности субмодулей и шага МСКЯ-фотодетекторов. Требуемая тактовая частота (кривая 3) и необходимое количество сигнальных выходов (кривая 4) также анализируются в зависимости от размерности субмодулей. На практике достижимая NETD ИК МФП сверхвысокой размерности не зависит от формата субмодулей: меняются только требуемая тактовая частота и необходимое количество сигнальных выходов. Например, вариант МФП 3840×2160 может состоять из матрицы 3×3 кристаллов субмодулей, которые имеют размерность 1280×720 с числом МСКЯ-фотодетекторов 921600 элементов, общее количество МСКЯ-фотодетекторов в МФП — 8294400 элементов.

Технологический дизайн МФП обеспечивает формирование мультиспектральной характери-

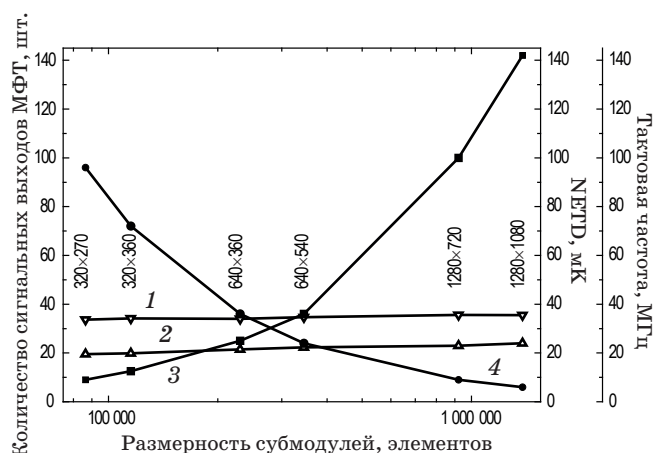


Рис. 2. Зависимости NETD ИК МФП сверхвысокой размерности от шага ФЧЭ (1 — шаг ФЧЭ $10 \times 10 \text{ мкм}$, 2 — шаг $20 \times 20 \text{ мкм}$), тактовой частоты (3) и количества сигнальных выходов (4).

Таблица 1. Фундаментальные технологические характеристики МФП

Определяющий материал	Зазор*, мкм	Размер* области повреждения, мкм	Размер* «слепой зоны», мкм	Число потерянных элементов/шаг ФЧЭ, шт/мкм
Si (КМ)	≤ 2	≥ 5	11–13	1/10
Si (ММБП)	≤ 2	≥ 5	1–3**	0/10
GaAs/AlGaAs с подложкой	≤ 2	≈ 5	11–13	1/10
GaAs/AlGaAs с утонением ¹ подложки	≤ 2	≈ 5	11–13	1/10
HgCdTe на GaAs-подложке	$\leq 3^{***}$	≥ 8 [13, 14, 17]	17–19	2/10
HgCdTe на Si-подложке	$\leq 3^{***}$	≥ 5 –8 [13, 14, 17]	17–19	2/10

Примечание. * — получены предварительные экспериментальные результаты, подтверждающие теоретические значения, ** — значения соответствуют предельной (100%) эффективности преобразования изображений в мозаичных матричных микроболометрических приемниках (ММБП), *** — справочные значения для фотоприемных кристаллов на основе КРТ-фотодиодов.

¹ утонение — технологическая операция уменьшения толщины подложки кристалла матрицы ФЧЭ с целью повышения уровня фотосигнала.

стики фоточувствительности, объединяющей широкополосную и узкополосную части, с применением различных кристаллов субмодулей на основе ФЧЭ разных типов, например, КРТ-фотодиодов и МСКЯ-фотодетекторов, фоточувствительных одновременно в различных ИК спектральных диапазонах. Кадмий-ртуть-теллуриды фотодиоды могут обеспечивать широкополосную часть мультиспектральной характеристики фоточувствительности, а МСКЯ-фотодетекторы — затем ее узкополосную часть [15–17].

Мультиспектральные МФП, например, могут быть созданы на основе МСКЯ-субмодулей различных ИК спектральных диапазонов или на основе ИК и терагерцовых микроболометрических субмодулей, применяемых одновременно. Возможности мозаичной технологии и размеры «слепых зон» различных определяющих материалов сравниваются в табл. 1 [13–17].

Таким образом, развиты структурные и технологические принципы создания МФП сверхвысокой размерности с предельной эффективностью преобразования изображений. В основном, полученные результаты применимы для МФП на основе микроболометров и МСКЯ-фотодетекторов и мультиспектральных ФП.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Линейчатые (1×288, 1×576) и матричные (128×128, 320×256) ИК ФП изготовлены на основе разработанных КМ и созданных фотоприемных кристаллов [2, 5–9]. Характеристики некоторых КМ и ИК ФП скомпонованы в табл. 2. Кремниевые мультиплексоры обеспечивают создание гибридных ИК ФП для спектральных диапазонов 8–14 и 3–5 мкм с NETD (порядка 14–25 мК), со-

ответствующей характеристикам мирового уровня [1, 2, 4–9].

Для матричных ФП на основе КРТ-фотодиодов созданы два варианта КМ с ПН: 128×128 ММБП-1 с шагом ячеек 40×40 мкм и 320×256 ММБП-2 с шагом ячеек 35×35 мкм (см. табл. 2). В расширенном (8–16 мкм) длинноволновом ИК диапазоне КМ с ПН обеспечивают лучшее температурное разрешение в сравнении с хорошо известными подобными кристаллами. Кроме того, в отличие от КМ с КН меньшие значения NETD могут быть достигнуты в диапазоне больших значений λ_{\max} КРТ-фотодиодов [2, 4, 5–8].

Для линейчатых ФП на основе КРТ-фотодиодов созданы 1×576 КМ (ЛМ-1 и ЛМ-2) с шагом ячеек 30 мкм и 1×288 КМ (ЛМ-3) с шагом ячеек 28 мкм [5, 6, 8]. Кремниевый мультиплексор ЛМ-3 конструктивно совместим с фотоприемным кристаллом 4×288 фотодиодов, но только одна из четырех строк по выбору мультиплексируется на выходы. При изготовлении КМ ЛМ-3 процент выхода годных кристаллов приближается к 100%. Линейчатые КМ с большими программируемыми емкостями интеграторов обеспечивают создание недорогих длинноволновых ИК ФП гражданского назначения, работающих в условиях повышенного фонового излучения, на основе линейчатых фотоприемных кристаллов, в том числе имеющих высокие темновые токи [5].

Для матричных МСКЯ и КРТ ФП созданы 128×128 КМ с КН на основе ПЗС/КМОП-технологии (ИФП СО РАН) с предельно низкими темновыми токами и низкими шумами [1, 2, 4–6, 8]. Матричные 320×256 КМ («ММ-1») с КН, имеющие высокий процент выхода годных кристаллов (до 80% при серийном производстве), также применимы для КРТ-фотодиодов и МСКЯ-фотодетекторов [1, 4, 5, 7, 8].

Таблица 2. Сравнительные характеристики некоторых КМ и ИК ФП

Формат	Шаг, мкм	Мульти- плексор	Входная схема	Тип ФЧЭ	λ_{\max} , мкм	NETD, мК	
						оценка	эксперимент
128×128	50×50	МХV	ПИ	GaAs/AlGaAs QWIP	8,3	11–14	22*
				КРТ-фотодиоды	6	6–8	17
320×256	35×35	ММПН-2	ПИ, ВПУ		11	7–9	20
1×576	30	ЛМ-1	ПИ		10,2	13	14
		ЛМ-2	БПИ		8–16	9–19**	–
1×288	28	ЛМ-3	ПИ				5
320×256	40×40	ММ-1			GaAs/AlGaAs QWIP	9	13–19***

Примечание. ПИ — прямая инжекция, ВПУ — вычитание уровня фотосигнала индивидуально для каждой строки, БПИ — буферизованная прямая инжекция, * — значение при рабочей температуре 65 К, ** — значения при $\lambda_{\max} = 11\text{--}13$ мкм и тактовой частоте 5 МГц, *** — значения при кадровой частоте 120–400 Гц.

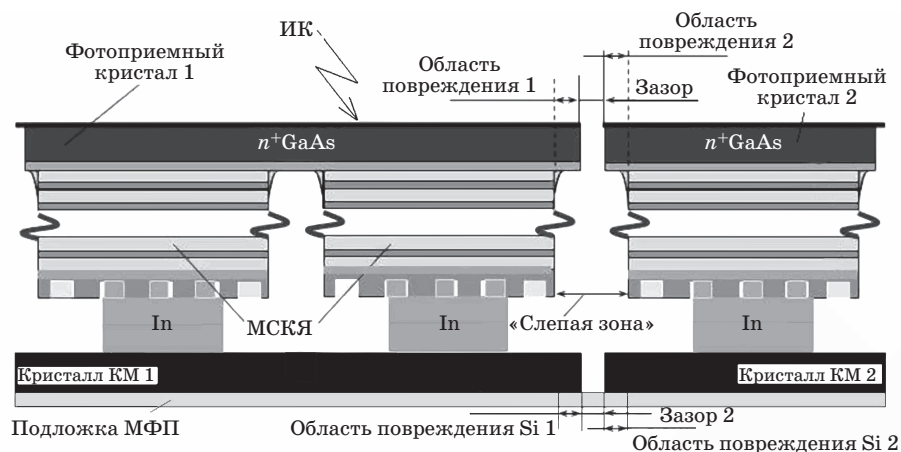


Рис. 3. Дизайн ИК МФП сверхвысокой размерности на основе МСКЯ-фотодетекторов.

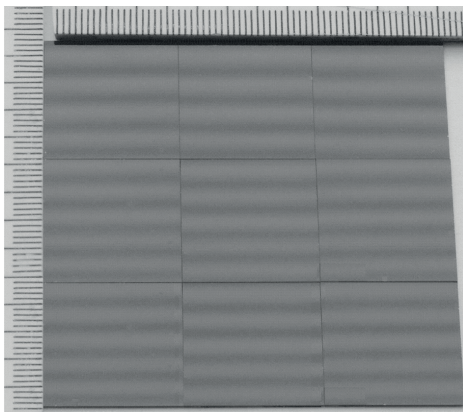


Рис. 4. Вид микросборки в форме матрицы кремниевых кристаллов, моделирующих субмодули в варианте дизайна МФП.

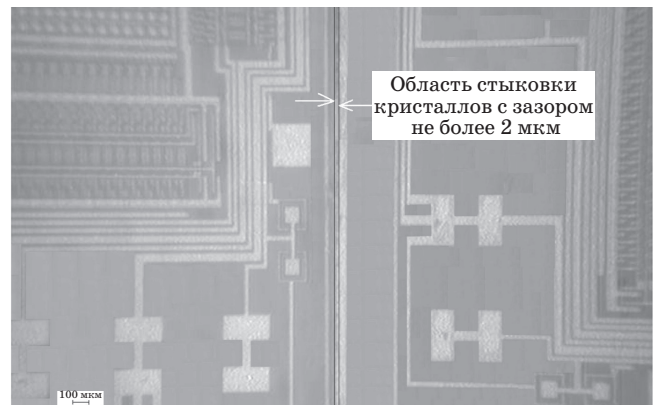


Рис. 5. Прецизионная микростыковка кристаллов субмодулей в МФП с минимальными зазорами или без зазоров между смежными кристаллами.

Отличие экспериментально полученных значений NETD от теоретических вызвано пониженной чувствительностью МСКЯ-фотодетекторов, применяемых в созданных ИК ФП, и определенной остаточной неоднородностью параметров ФЧЭ по полю фотоприемных матриц [1–9].

Мозаичный принцип создания ИК ФП сверхвысокой размерности на основе МСКЯ-фотодетекторов демонстрирует рис. 3, на котором представлены «слепые зоны», области повреждения материалов и зазоров между кристаллами субмодулей. Прототип МФП в виде матрицы из 9-ти кристаллов, моделирующих субмодули, приведен на рис. 4. Достигнутый технологический уровень прецизионной микросборки кристаллов субмодулей в МФП демонстрирует рис. 5: зазоры между смежными кристаллами составляют не более 2 мкм или отсутствуют [13–17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы принципы создания унифицированной серии КМ для предварительной обработки и считывания фотосигналов ИК ФП сверхвысокой размерности преимущественно на основе МСКЯ-фотодетекторов. Рассмотрены линейчатые (1×288, 1×576) и матричные (128×128, 320×256) КМ, разработанные на основе промышленных технологий. Структурные и технологические ограничения для КМ в составе ИК ФП на основе МСКЯ-фотодетекторов анализируются в сравнении. Оценки достижимых параметров системы, состоящей из ИК ФЧЭ и канала считывания КМ, получены при уменьшении размеров ФЧЭ и соответственно при понижении входных токов и уменьшении площади кристалла КМ, доступной для размещения емкостей интеграторов. Экспериментальные значения NETD созданных образцов ИК ФП на основе разработанных КМ и спроектированных фотодетекторов находятся в диапазоне (порядка 14–25 мК) типичных значений NETD систем формирования изображений, производимых ведущими компаниями.

Приведен анализ архитектуры, изготовления и применения КМ с КН и КМ с ПН для КРТ-фото-

диодов и МСКЯ-фотодетекторов. Создание матричных ИК ФП осуществляют, по большей части, на основе КМ с КН, характеризующегося одновременным накоплением фотосигналов ФЧЭ в матрицах. Однако применение КМ с ПН позволяет получить лучшее температурное разрешение матричных ФП в длинноволновом ИК диапазоне и исключить необходимость сканирования в отличие от линейчатых КМ.

Усовершенствован технологический дизайн ИК МФП сверхвысокой размерности с предельной эффективностью преобразования изображений. Рассмотрены методы формирования мультиспектральной характеристики фоточувствительности МФП.

Технологический уровень прецизионной микросборки кристаллов субмодулей в МФП обсуждается: области повреждения материалов на краях кристаллов составляют не менее 5 мкм для МСКЯ-фотодетекторов и не менее 8 мкм для КРТ-фотодиодов, зазоры между смежными кристаллами составляют не более 2 мкм для МСКЯ или не более 3 мкм для КРТ — зазоры могут отсутствовать. Выполнен анализ размеров «слепых зон» для различных определяющих материалов. Исследованы зависимости основных характеристик ИК МФП сверхвысокой размерности от шага МСКЯ-фотодетекторов и форматов субмодулей.

Авторы выражают благодарность академикам РАН А.В. Латышеву и А.Л. Асееву за поддержку и обсуждение представленных исследований, канд. техн. наук В.Н. Федорину за обсуждения реализации и применения МФП, канд. техн. наук Б.И. Фомину за изготовление КМ на базе ИФП СО РАН, докторам физ.-мат. наук Ю.Г. Сидорову и М.В. Якушеву, канд. физ.-мат. наук В.В. Васильеву за обсуждение свойств КРТ, А.П. Савченко за обсуждение параметров МСКЯ и СР, П.Р. Машевичу и А.А. Романову за действенную помощь при изготовлении КМ на базе АО «Ангстрем», В.Н. Гаштольду и Н.В. Суцовой за поддержку и помощь при изготовлении КМ на базе «АО НПО “Восток”».

ЛИТЕРАТУРА

1. Демьяненко М.А., Козлов А.И., Овсяк В.Н. Оптимизация параметров системы «инфракрасный фоточувствительный элемент на основе многослойных структур с квантовыми ямами — кремниевый мультиплексор фотосигналов» // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 9. С. 59–65.
2. Васильев В.В., Козлов А.И., Марчишин И.В., Сидоров Ю.Г., Якушев М.В. Анализ структурно-технологических ограничений в кремниевых схемах считывания сигналов фотодиодов инфракрасного диапазона // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 7. С. 39–45.
3. Kozlowski L.J., Bailey R.B., Cabelli S.C., Cooper D.E., McComas G.D., Vural K., Tennant W.E. 640×480 PACE HgCdTe FPA // Proc. SPIE. Infrared Detectors: State of the Art. 1992. V. 1735. P. 163–174.
4. Демьяненко М.А., Козлов А.И., Овсяк В.Н. Аналитическое сравнение характеристик фотоприемников инфракрасного диапазона на основе фотодиодов HgCdTe и фотодетекторов GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 9. С. 64–71.

5. Демьяненко М.А., Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н. Создание аналого-цифровых кремниевых мультиплексоров сигналов фотоприемников инфракрасного диапазона // Автометрия. 2016. Т. 52. № 6. С. 120–127.
6. Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Асеев А.Л. Серия кремниевых мультиплексоров для КРТ-фотодиодов спектрального диапазона 8–16 мкм // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 3. С. 60–67.
7. Козлов А.И., Марчишин И.В., Овсяк В.Н. Кремниевые мультиплексоры 320×256 для инфракрасных фотоприемных устройств на основе КРТ-диодов // Автометрия. 2007. Т. 43. № 4. С. 74–82.
8. Козлов А.И. Особенности проектирования и некоторые реализации кремниевых мультиплексоров для инфракрасных фотоприемников // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 7. С. 19–29.
9. Есаев Д.Г., Марчишин И.В., Овсяк В.Н., Савченко А.П., Фатеев В.А., Шашкин В.В., Сухарев А.В., Падалица А.А., Будкин И.В., Мармалюк А.А. Инфракрасное фотоприемное устройство на основе многослойных структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами // Автометрия. 2007. Т. 43. № 4. С. 112–118.
10. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
11. Козлов А.И. Особенности влияния ΔN и $\Delta \mu$ моделей $1/f$ -шумов на эквивалентную шуму разность температур инфракрасных фотоприемников // Тез. докл. XIV Российской конф. по физике полупроводников «Полупроводники-2019». 9–13 сентября 2019 г., Новосибирск. С. 446. DOI: 10.34077/Semicond2019-446.
12. Rogalski A. Progress in focal plane array technologies // Progress in Quant. Electron. 2012. № 36. P. 342–473.
13. Новоселов А.Р. Способ формирования граней чипа для мозаичных фотоприемных модулей // Патент России № 2509391. 2014.
14. Новоселов А.Р. Способ уменьшения зазора между чипами в мозаичных фотоприемных модулях // Автометрия. 2016. Т. 52. № 1. С. 116–121.
15. Демьяненко М.А., Козлов А.И., Новоселов А.Р., Овсяк В.Н. Повышение эффективности преобразования изображений в мозаичных микроболометрических приемниках // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 2. С. 60–66.
16. Козлов А.И., Новоселов А.Р., Демьяненко М.А., Овсяк В.Н. О мозаичных инфракрасных фотоприемниках сверхвысокой размерности на основе многослойных структур с квантовыми ямами // Тез. докл. Российской конф. по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2019». 27–31 мая 2019 г., Новосибирск. С. 140. DOI: 10.34077/RCS2019-140.
17. Козлов А.И., Новоселов А.Р., Демьяненко М.А., Овсяк В.Н. Фундаментальные основы создания мозаичных фотоприемников сверхвысокой размерности с предельной эффективностью преобразования изображений // Тез. докл. XIV Российской конф. по физике полупроводников «Полупроводники-2019». 9–13 сентября 2019 г., Новосибирск. Ч.2. С. 447. DOI: 10.34077/Semicond2019-447.