

УДК 535.247.049.7 : 621.383.52

## АРХИТЕКТУРА ПЕРСПЕКТИВНЫХ МНОГОРЯДНЫХ ФОТОПРИЁМНЫХ МОДУЛЕЙ ИК-ДИАПАЗОНА

С. А. Дворецкий<sup>1</sup>, А. П. Ковчавцев<sup>1</sup>, И. И. Ли<sup>1</sup>, В. Г. Половинкин<sup>1,2</sup>,  
Г. Ю. Сидоров<sup>1</sup>, М. В. Якушев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20  
E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru*

Проведён анализ существующих конструкций линейных многорядных ИК ФПУ с режимом временной задержки и накопления. Предложены варианты перспективных конструкций линейных инфракрасных фотоприёмников, обеспечивающих повышение чувствительности и пространственного разрешения. Анализ основан на расчёте методом Монте-Карло диффузии фотогенерированных носителей заряда в фотодиодных матрицах на эпитаксиальных слоях кадмий—ртуть—теллур, учитывающем основные фотоэлектрические и конструктивные параметры фоточувствительных элементов и оптической системы.

*Ключевые слова:* многорядное ИК ФПУ, фотодиод, локальная квантовая эффективность, точечный источник, пороговая чувствительность, пространственное разрешение.

DOI: 10.15372/AUT20180605

**Введение.** В начале 1990-х годов компанией Sofradir (Франция) было разработано линейное многорядное инфракрасное фотоприёмное устройство (ИК ФПУ) PLUTON LW форматом  $4 \times 288$  — одно из первых освоенных промышленностью многоэлементных ИК ФПУ [1]. Предложенные в этом изделии технические решения, например топология фоточувствительных элементов (ФЧЭ), определялись существующими технологическими возможностями изготовления ФЧЭ и кремниевых мультиплексоров. Инфракрасное ФПУ содержит два идентичных модуля в направлении, перпендикулярном сканированию, шаг ФЧЭ 56 мкм. Для создания беззачерного ряда фоточувствительных элементов второй идентичный модуль смещён на половину шага, таким образом, шаг ФЧЭ составил 28 мкм. Сканирование в обоих направлениях позволяет формировать тепловое изображение форматом  $576 \times 768$ . Многочисленные модификации ИК ФПУ, направленные на повышение чувствительности и пространственного разрешения при сохранении топологии фоточувствительных элементов, достигались главным образом совершенствованием кремниевого мультиплексора и технологии изготовления фоточувствительных элементов, сканирующей системы и программного обеспечения для формирования видеоизображений. С учётом современных технологических возможностей принятые в этом изделии технические решения не являются оптимальными, но накопленный опыт на долгое время определил структуру линейных многорядных ИК ФПУ при разработке многорядных модулей форматами  $6 \times 576$ ,  $10 \times 1024$  [2–4]. Однако при формировании изображения многорядные ИК ФПУ, даже с режимом временной задержки и накопления (ВЗН), вследствие уменьшения времени накопления, имеют меньшую чувствительность по сравнению с матричными. Поэтому в последнее время многорядные ИК ФПУ заменяются матричными. Тем не менее линейные многорядные ИК ФПУ остаются востребованными в системах, где требуется формировать многоспектральные изображения с пространственным разрешением, недоступным для матричных ИК ФПУ [5].

Цель данного исследования — разработка архитектуры перспективных многорядных ИК ФПУ различного назначения, обеспечивающих повышение чувствительности, пространственного разрешения, снижение стоимости и весогабаритных показателей.

**Структура линейного многорядного ИК ФПУ PLUTON LW.** Линейное многорядное ИК ФПУ состоит из двух подмодулей форматом  $2 \times 4 \times 144$ , при этом расстояние между фоточувствительными элементами превышает их геометрические размеры. Подмодули смещены в перпендикулярном к сканированию направлении относительно друг друга на полшага — 28 мкм [1, 2]. Добавление в такой модуль ещё двух аналогичных субматриц, сдвинутых относительно двух первых на величину, равную четверти шага пикселей, позволяет увеличить размерность модуля до 576 пикселей. Так организован ИК ФПУ форматом  $6 \times 576$  [3].

Как показано в работах [6–8], при выборе топологии ФЧЭ линейных многоэлементных ИК ФПУ необходимо учитывать пространственное распределение квантовой эффективности фоточувствительных элементов. В [8–11] дано описание метода расчёта распределения квантовой эффективности по площади ФЧЭ размером  $20 \times 20$  мкм путём моделирования методом Монте-Карло диффузии фотогенерированных носителей заряда в фоточувствительном слое (ФС) в условиях однородной засветки всего ФПУ и локальной засветки центрального элемента, в том числе точечным источником.

На рис. 1 приведены расчётные зависимости интегральной квантовой эффективности для планарного варианта ФЧЭ размером  $56 \times 56$  мкм, близким к размерам ФЧЭ в модулях PLUTON LW (рис. 1, *a*) и ФЧЭ размером  $28 \times 28$  мкм (рис. 1, *b*) при одинаковых диаметрах  $n$ - $p$ -переходов ( $D_{p-n} = 14$  мкм) с типичными для гетероэпитаксиальных структур КРТ МЛЭ параметрами [12]. Под квантовой эффективностью (в процентах) понимается доля фотогенерированных носителей, интегрируемых фотодиодом, от количества фотонов, падающих на фоточувствительный элемент. Возможные отражения от границ фоточувствительного слоя не учитываются.

На рис. 2 приведены расчётные зависимости интегральной квантовой эффективности для планарного варианта ФЧЭ размером  $56 \times 56$  мкм при локальной засветке всей площади одного ФЧЭ.

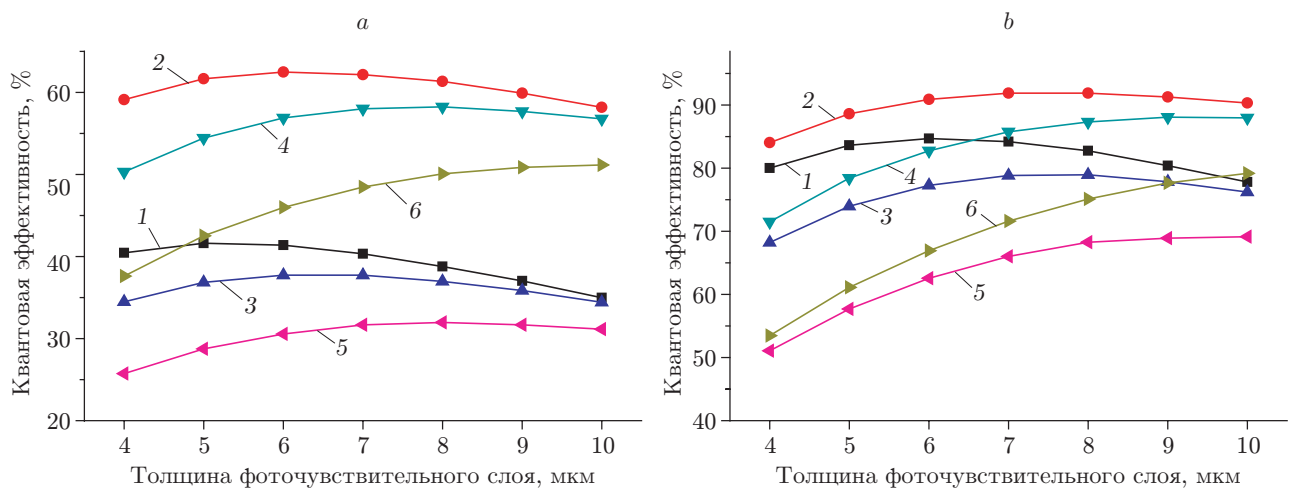


Рис. 1. Интегральная квантовая эффективность ФЧЭ при однородной засветке в зависимости от толщины фоточувствительного слоя: размерами  $56 \times 56$  мкм (*a*) и  $28 \times 28$  мкм (*b*). Длина диффузии неосновных носителей ( $L_d$ ) принята равной 15 мкм (кривые 1, 3 и 5),  $L_d = 25$  мкм (кривые 2, 4 и 6); длина оптического поглощения ( $L_{ph}$ ) — 2 мкм (кривые 1, 2),  $L_{ph} = 3$  мкм (кривые 3, 4),  $L_{ph} = 5$  мкм (кривые 5, 6)

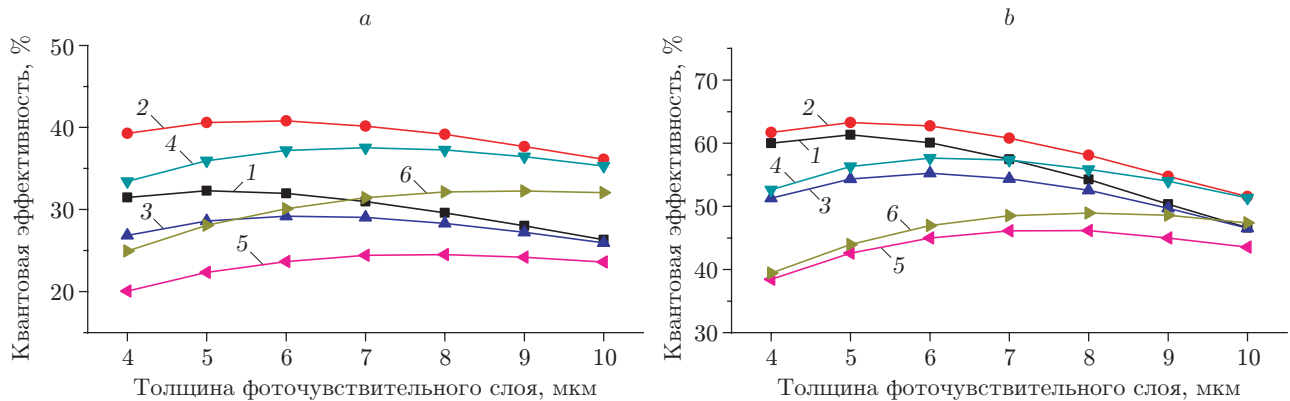


Рис. 2. Интегральная квантовая эффективность ФЧЭ при локальной засветке в зависимости от толщины фоточувствительного слоя: размерами  $56 \times 56$  мкм (а) и  $28 \times 28$  мкм (б). (Обозначения кривых см. на рис. 1)

Отметим существенные отличия зависимостей квантовой эффективности для случаев однородной и локальной засветок ФЧЭ ячеек размером  $56 \times 56$  мкм по сравнению с расчётными зависимостями для фоточувствительных элементов размерами  $28 \times 28$  мкм, приведёнными на рис. 1, 2, и  $20 \times 20$  мкм в работах [8–10]:

1. Существенно снижается квантовая эффективность для однородной и локальной засветок.

2. Возрастает влияние диффузионной длины неосновных носителей заряда даже при изменении  $L_d$  в относительно узком диапазоне от 15 до 25 мкм. Это приводит к возрастанию разброса фотоэлектрических характеристик ИК ФПУ, увеличению коэффициентов фотоэлектрической связи. Контролировать величину  $L_d$  точнее технологически практически невозможно [11].

При использовании планарной технологии для фоточувствительных элементов зазор между  $n$ - $p$ -переходами должен быть значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда. При шаге между фоточувствительными элементами 56 мкм расстояние между границами  $n$ - $p$ -переходов диаметром 14 мкм составляет 42 мкм, т. е. существенно превышает длину диффузии неосновных носителей. Это приводит к снижению квантовой эффективности вследствие рекомбинации значительной части фотогенерированных носителей заряда в ФС, росту разброса вольт-ваттных характеристик ИК ФПУ, увеличению коэффициента фотоэлектрической связи, что, в свою очередь, приводит к снижению пороговой чувствительности и ухудшению пространственного разрешения ИК ФПУ. Поэтому для многорядных линейных ИК ФПУ с конструктивом ИК ФПУ типа  $4 \times 288$  обязательным условием является разработка технологии, обеспечивающей подавление фоточувствительности вне центральных областей фоточувствительного элемента. В [1] для этой цели используется сетка охранных  $n$ - $p$ -переходов, изолирующая области сбора фоточувствительных ячеек, либо применяются более сложные технологии [7], например меза-технологии или изолирующие фоточувствительные ячейки металлических экранов. К недостаткам такого подхода относятся большие потери оптических сигналов в фокальной плоскости ИК ФПУ ( $\sim 75\%$ ), что вызывает потерю чувствительности оптоэлектронных систем на их основе.

**Общая структура линейных фотоприёмных модулей ИК-диапазона.** Современный уровень технологий изготовления ФЧЭ, кремниевых мультиплексоров позволяет уменьшать размеры ФЧЭ вплоть до дифракционных ограничений оптической системы. Поэтому в перспективных линейных многорядных ИК ФПУ следует использовать топологические решения с плотной упаковкой фоточувствительных элементов. Это даёт воз-

Таблица 1

Параметры фоточувствительной ячейки		Уровни сигналов от точечного источника и положения центра пятна, интегрируемые центральной фоточувствительной ячейкой				
		в центре пикселя	между двумя пикселями	между четырьмя пикселями	в центре соседнего пикселя	в центре диагонального пикселя
$D_p = 20$ мкм	$L_{ph}$ , мкм	84,45	43,89	23,08	2,07	0,58
Толщина ФС = 5 мкм	2	66,71	31,66	18,56	3,24	1,02
$D_{p-n} = 10$ мкм	5	46,99	22,02	12,85	2,07	0,67
Толщина ФС = 8 мкм	2	53,38	28,61	17,86	5,52	1,83
$D_{p-n} = 10$ мкм	5	47,17	23,95	14,62	4,03	1,34
Толщина ФС = 5 мкм	2	73,78	37,63	20,49	2,41	0,69
$D_{p-n} = 16$ мкм	5	51,45	26,19	14,1	1,57	0,45
Толщина ФС = 8 мкм	2	63,13	35,05	20,64	5,06	1,26
$D_{p-n} = 16$ мкм	5	54,52	29,39	16,92	3,54	0,92
$D_p = 30$ мкм	$L_{ph}$ , мкм	79,61	41,51	22,17	2,25	0,92
Толщина ФС = 5 мкм	2	54,89	29,49	17,89	4,81	1,52
$D_{p-n} = 10$ мкм	5	38,63	20,53	12,4	3,19	1,02
Толщина ФС = 8 мкм	2	44,74	26,48	17,14	6,47	2,2
$D_{p-n} = 10$ мкм	5	39,16	22,26	14,09	4,92	1,68
Толщина ФС = 5 мкм	2	64,8	34,52	19,73	3,68	1,07
$D_{p-n} = 16$ мкм	5	45,48	24,03	13,61	2,38	0,71
Толщина ФС = 8 мкм	2	54,74	32,03	19,73	6,08	1,66
$D_{p-n} = 16$ мкм	5	47,55	26,91	16,23	4,42	1,25

возможность улучшить пороговую чувствительность, повысить пространственное разрешение линейных многорядных ИК ФПУ, упростить требования к сканирующей системе (т. е. не использовать микросканирование) и, следовательно, снизить стоимость и весогабаритные показатели оптоэлектронных систем на их основе. Проблема получения бездефектных модулей в многорядных сканируемых ИК ФПУ решается дублированием линеек ФЧЭ.

В табл. 1 приведены значения уровней сигналов в центральной фоточувствительной ячейке размером  $20 \times 20$  мкм в зависимости от фотоэлектрических и конструктивных параметров, положения центра пятна относительно центра фоточувствительной ячейки при плотной однородной конфигурации фоточувствительных элементов для двух величин (20 и 30 мкм) диаметра пятна ( $D_p$ ) от точечного источника в фокальной плоскости ИК ФПУ. Предполагаем, что пятно рассеяния от точечного источника в фокальной плоскости ИК ФПУ есть результат дифракции Фраунгофера на круглом отверстии. В этом случае распределение энергии (фотонов) в пятне описывается известной формулой Эйри [13]. В качестве характеристики размеров пятна принят диаметр первого тёмного кольца, внутри которого сконцентрировано  $\sim 84$  % полной энергии пятна.

Приведены расчётные значения для двух толщин ФС 6 и 10 мкм, двух длин оптического поглощения 2 и 5 мкм, двух диаметров  $n$ - $p$ -переходов 10 и 16 мкм, длины диффузии носителей заряда 20 мкм.

Таблица 2

Параметры фоточувствительной ячейки		Уровни сигналов в пятне от точечного источника и положения центра пятна, интегрируемые центральной фоточувствительной ячейкой и нормированные на количество носителей в пятне			
		в центре пикселя	минимальный уровень (в точке $\otimes$ )	в центре соседнего пикселя (по горизонтали)	в центре диагонального пикселя
$D_p = 20$ мкм	$L_{ph}$ , мкм	84,45	$\sim 34,85$	2,07	1,44
Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм	2	66,85	23,14 (7,402)	3,23	2,4
	5	46,94	15,97 (7,394)	2,09	1,55
Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм	2	53,7	21,85 (7,393)	5,55	4,13
	5	47,33	17,97 (7,383)	3,99	3,01
Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм	2	73,99	26,57 (7,315)	2,36	1,71
	5	51,7	18,4 (7,299)	1,55	1,11
Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм	2	63,54	25,94 (7,315)	4,89	3,52
	5	54,98	21,47 (7,328)	3,53	2,48
$D_p = 30$ мкм	$L_{ph}$ , мкм	79,61	$\sim 30,4$	2,25	1,81
Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм	2	55,03	22,09 (7,393)	4,77	3,57
	5	38,6	17,13 (7,398)	3,18	2,38
Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 10$ мкм	2	45,11	20,71 (7,404)	6,44	4,86
	5	39,36	17,13 (7,398)	4,88	3,71
Толщина ФС = 5 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм	2	65,25	25,18 (7,297)	3,57	2,57
	5	45,82	17,46 (7,285)	2,34	1,68
Толщина ФС = 8 мкм $D_{p-n} = 16$ мкм	2	55,2	24,41 (7,32)	5,94	4,31
	5	48,05	20,28 (7,321)	4,38	3,14

Чувствительность и соответственно вероятность обнаружения точечных источников определяется уровнем минимального сигнала [14], когда центр пятна находится между четырьмя пикселями (третий столбец в табл. 1). В четвертом столбце центр оптического пятна проецируется в центре соседнего элемента и характеризует коэффициент фотоэлектрической связи. Отметим, что с увеличением диаметра  $n$ - $p$ -переходов наряду с увеличением квантовой эффективности снижается коэффициент фотоэлектрической связи.

В табл. 2 приведены значения уровней сигналов в центральной фоточувствительной ячейке в зависимости от фотоэлектрических и конструктивных параметров, положения центра пятна относительно центра фоточувствительной ячейки для «сотовой» топологии фоточувствительных ячеек, в которой каждая вторая строка смещена на полшага, и для диаметров пятна 20 и 30 мкм от точечного источника в фокальной плоскости ИК ФПУ. Значения толщин ФС, длин оптического поглощения, диаметров  $n$ - $p$ -переходов, длины диффузии носителей заряда аналогичны принятым в табл. 1.

Минимальный уровень сигналов для «сотовой» топологии достигается в точке  $\otimes$  (см. табл. 2, третий столбец). Из сравнения значений уровней сигналов для однородной и «сотовой» топологий видно, что минимальный уровень сигналов для точечных источников при прочих равных условиях в «сотовой» топологии фоточувствительных элементов существенно (на 20–30 %) выше однородной, и поэтому «сотовая» топология фоточувствительных элементов обеспечит лучшую пороговую чувствительность ИК ФПУ для точечных

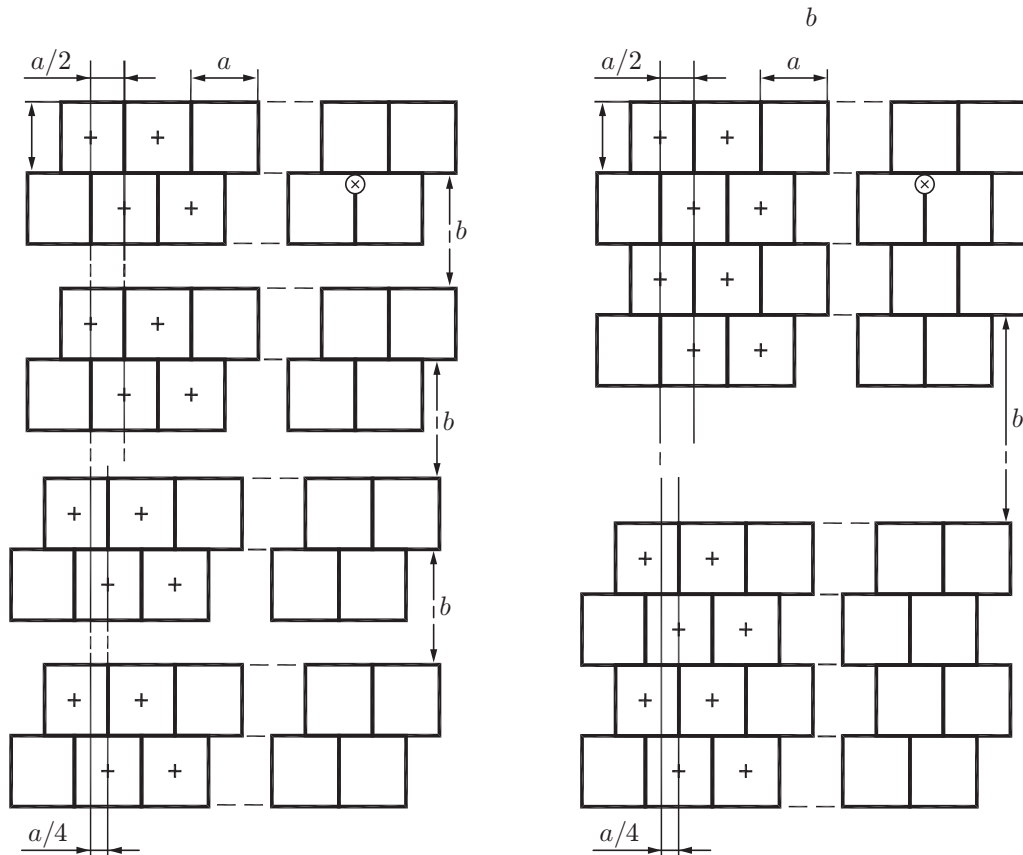


Рис. 3. Варианты топологии фоточувствительных элементов

источников изображения.

В варианте топологии ФЧЭ, приведённом на рис. 3, *a*, в каждом спектральном диапазоне ИК ФПУ содержатся четыре линейки фоточувствительных элементов, причём каждая из четырёх линеек состоит из двух смещённых относительно друг друга на половину шага ( $a/2$ ), третья и четвёртая линейки смещены относительно первой и второй на четверть шага ( $a/4$ ). Фоточувствительные элементы располагаются без зазоров.

Возможен вариант топологии фоточувствительных элементов, показанный на рис. 3, *b*. В этом случае каждый спектральный диапазон включает в себя две счетверённые линейки фоточувствительных элементов, в которых каждая вторая строка смещена на половину шага ( $a/2$ ). Вторая счетверённая линейка смещена относительно первой на четверть шага ( $a/4$ ). Многорядность и дублирование элементов оставляют возможность повышения чувствительности за счёт режима ВЗН, но главным является обеспечение бездефектности линейных ИК ФПУ.

В этих вариантах можно использовать фоточувствительные ячейки размерами в пределах от  $20 \times 20$  до  $28 \times 28$  мкм, применять хорошо отработанную планарную технологию изготовления фоточувствительных элементов и снизить требования к оптической системе.

Отметим влияние  $L_{ph}$  на квантовую эффективность. Использование узкополосного фильтра позволит ограничить диапазон изменения длины оптического поглощения. При этом необходимо выбирать стехиометрический состав фоточувствительного слоя таким образом, чтобы длинноволновая граница фоточувствительного слоя на  $0,3-0,4$  мкм превышала длинноволновую границу фильтра, что обеспечит  $L_{ph}$  на уровне не более  $2-3$  мкм [15]. Дополнительным преимуществом применения узкополосных фильтров является по-

давление влияния неоднородности стехиометрического состава фоточувствительного слоя КРТ на разброс чувствительности ФЧЭ.

Для многорядных ИК ФПУ при освещении со стороны подложки особую важность имеет её просветление. Введение этой операции в технологический маршрут обеспечит не только повышение квантовой эффективности фоточувствительных элементов, но и снизит вероятность появления паразитных сигналов, обусловленных переотражением сигналов в зазоре между кремниевой подложкой и внутренней границей узкополосного фильтра.

Приведённые в табл. 1, 2 величины уровней сигналов позволяют оптимизировать конструкцию фоточувствительного элемента. Оптимальная структура фоточувствительного элемента зависит от технического задания, например формирования тепловизионного изображения с максимальным температурным разрешением либо получения максимального пространственного разрешения и обеспечения максимальной вероятности обнаружения точечных источников.

**Кремниевый мультиплексор.** Принципиальным вопросом для ИК ФПУ является тип устройства считывания сигналов. В коротковолновом спектральном диапазоне применяются устройства считывания на базе трансимпедансного усилителя с интегрирующей ёмкостью в цепи обратной связи.

В большинстве ИК ФПУ среднего и дальнего спектральных диапазонов традиционно используются прямоинжекционные устройства считывания. Преимущество этого типа устройств считывания — возможность реализации устройств ввода с максимальной зарядовой ёмкостью при минимальных требованиях к топологическим нормам, что имело принципиальное значение вплоть до 2000-х годов. Однако устройствам считывания с прямой инжекцией заряда присущи также известные недостатки, главным образом, обусловленные режимом работы входного затвора в подпороговом режиме, что приводит к повышенным требованиям к динамическому сопротивлению фотоприёмных элементов, необходимости увеличивать напряжение смещения на фотодиоды до 100–300 мВ.

Устройства ввода фотосигналов на основе трансимпедансного усилителя имеют следующие преимущества:

1. Позволяют устанавливать минимальное напряжение смещения на фотодиодах в пределах 30–50 мВ независимо от динамического сопротивления фотодиодов. Формирование фотосигналов в цифровом виде на пиксельном уровне снимает ограничения по зарядовой ёмкости устройств считывания. Это даёт возможность существенно снизить количество дефектных фотоприёмных каналов, повысить температуру работы ИК ФПУ, что имеет принципиальное значение, особенно для длинноволнового спектрального диапазона.

2. Передаточные и шумовые характеристики устройства на основе трансимпедансного усилителя в отличие от прямоинжекционных устройств считывания практически не зависят от динамического сопротивления фотодиодов и обеспечивают качественное улучшение всех основных параметров перспективных ИК ФПУ. Формирование фотосигналов в цифровой форме на пиксельном уровне снимает ограничения по зарядовой ёмкости устройств считывания путём увеличения разрядности счётчика, входящего в состав цифрового устройства.

3. Современный уровень кремниевой технологии с топологическими нормами 90–130 нм позволяет разместить в ячейке размером  $20 \times 20$  мкм приблизительно 250–300 транзисторов, что даёт возможность реализовать сложные цифровые блоки на пиксельном уровне (такие как АЦП, ЦАП, компараторы, ОЗУ и т. п.), поэтому дополнительное размещение в ячейке ввода трансимпедансного усилителя из 7–8 транзисторов не играет принципиальной роли. Кроме того, для многорядного ИК ФПУ в вертикальном направлении для ячеек устройств ввода доступна большая площадь.

**Заключение.** Проведён анализ фотоэлектрических характеристик с традиционной для многорядных ИК ФПУ структурой, содержащих несколько смещённых относительно друг друга идентичных подмодулей с разрежённой топологией фоточувствительных элементов. Показано, что принятая в этих ИК ФПУ топология требует применять более сложные технологии изготовления фоточувствительных элементов, например меза-технология, или оптически изолировать их дополнительными металлическими масками, или использовать изолирующие  $n$ - $p$ -переходы. Необходимость оптической изоляции фоточувствительных элементов приводит к большим потерям оптических сигналов в фокальной плоскости ИК ФПУ ( $\sim 75\%$ ) и соответственно к потере чувствительности и пространственного разрешения.

Современный уровень технологии даёт возможность использовать плотную упаковку фоточувствительных элементов линейных ИК ФПУ. Даны рекомендации по архитектуре перспективных ИК ФПУ, обеспечивающей улучшение их чувствительности и пространственного разрешения при применении простейшей планарной технологии и позволяющей упростить требования к сканирующей системе. Предложен вариант плотной упаковки с «сотовой» топологией фоточувствительных ячеек для снижения зависимости чувствительности ИК ФПУ от положения центра пятна относительно центра ФЧЭ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Date Sheet.** PLUTON LW 288 × 4-MCT. The worldwide reference for 2nd gen. scanning systems. URL: <http://www.sofradir.com/product/pluton-lw> (дата обращения: 27.07.2018).
2. **Sisov F. F., Reva V. P., Colenkov A. G. et al.** 4 × 288 readouts and FPAs properties // Opto-Electron. Rev. 2006. **14**, N 1. P. 76–83.
3. **Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М., Яковлева Н. И.** Фотоприёмное устройство формата 6 × 576 элементов на спектральный диапазон 8–12 мкм // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 61–65.
4. **Козлов К. В., Соляков В. Н., Стрельцов В. А. и др.** Анализ и классификация топологий матриц фоточувствительных элементов многорядных фотоприёмных устройств // Успехи прикладной физики. 2017. **5**, № 6. С. 574–584.
5. **Козлов К. В., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д. и др.** Современные инфракрасные фотоприёмные устройства для сканирующей аппаратуры дистанционного зондирования Земли (обзор) // Успехи прикладной физики. 2017. **5**, № 1. С. 63–78.
6. **Fastow R. M., Strum A.** Monte Carlo simulations of the cross talk in InSb matrices // Proc. SPIE. 1994. **2274**. P. 136–146.
7. **Juravel Y., Strum A., Fenigstein A. et al.** The transition to second-generation HgCdTe FPA // Proc. SPIE. 1997. **3061**. P. 652–661.
8. **Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И.** Моделирование фотоэлектрических характеристик матричных ИК фотоприёмников методом Монте-Карло // ДАН ВШ РФ. 2017. **4**, № 37. С. 79–90.
9. **Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И.** Моделирование пространственного распределения квантовой эффективности фотодиодных матриц и фотоэлектрических характеристик многоэлементных ИК ФПУ на их основе // Автометрия. 2018. **54**, № 6. С. 114–121.
10. **Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И.** Фотоэлектрические характеристики многоэлементных ИК ФПУ с сотовой топологией фоточувствительной матрицы при регистрации точечных источников излучения // Тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф. и шк. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: ГИЦ РФ АО «НПО «Орион», 2018. Т. 1. С. 111–114.



11. **Половинкин В. Г., Стучинский В. А., Вишняков А. В., Ли И. И.** Фотоэлектрические характеристики многоэлементных ИК ФПУ при регистрации точечных источников излучения // Тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф. и шк. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: ГНЦ РФ АО «НПО "Орион"», 2018. Т. 1. С. 115–118.
12. **Фотоприёмные** устройства на основе эпитаксиальной системы кадмий—ртуть—теллур / Отв. ред. А. Л. Асеев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 258 с.
13. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
14. **Иванов В. А., Киричук В. С., Косых В. П., Синельщиков В. В.** Особенности обнаружения точечных объектов в изображениях, формируемых матричным приёмником // Автометрия. 2016. **52**, № 2. С. 10–19.
15. **Schacham S., Finkman E.** Recombination mechanisms in p-type HgCdTe: Freezeout and background flux effects // Journ. Appl. Phys. 1985. **57**, N 6. P. 2001–2009.

*Поступила в редакцию 27 июля 2018 г.*

---