

УДК 621.382

Мультиплексирование фотосигналов матричных ИК ФПУ второго поколения

П.А. Кузнецов, С.С. Хромов

Представлены достижения в развитии БИС считывания для ИК ФПУ 2-го поколения. Рассматриваются тенденции в разработке БИС считывания на ближайшую перспективу.

PACS 85.60 Gz

Ключевые слова: ИК ФПУ, пиксель, БИС считывания

Введение

Увеличение формата многоэлементных фоточувствительных элементов (МФЧЭ), стремление к миниатюризации фотоприемных устройств (ФПУ), повышению их надежности, а также к расширению их функциональных возможностей привело к созданию нового класса микроэлектронных устройств — больших интегральных схем считывания фотосигнала (БИС считывания или мультиплексоров). При всем многообразии фотоприемников (ФП) и схем обработки фотосигнала можно провести общую классификацию мультиплексоров (МП), приведенную на рис. 1. Под мультиплексированием фотосигнала понимается выполнение на кристалле БИС считывания как минимум следующих функций (рис. 2):

- обеспечение электрической связи МФЧЭ с входами кристалла БИС считывания;
- создание рабочего режима для элементов фотоприемника (оптимальное смещение по току или напряжению; управление температурным режимом МФЧЭ; подавление помех по питанию и т.д.);
- усиление фотосигнала до уровня, достаточного для дальнейшей его обработки за пределами кристалла БИС считывания;
- квазиоптимальная частотная фильтрация фотосигнала, обеспечивающая максимально возможное отношение сигнал/шум на выходе БИС считывания и динамический диапазон МФПУ;
- временная дискретизация фотосигнала и его коммутация на общий информационный (один или несколько) выход БИС считывания.

Кузнецов Петр Александрович, главный специалист.

Хромов Сергей Сергеевич, начальник дизайн-центра.

ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел.: (499) 374-49-38. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 2 марта 2013 г.

© Кузнецов П.А., Хромов С.С., 2013

В современных БИС считывания могут выполняться дополнительные функции, например, временная задержка и накопление, запоминание и вычитание темновых составляющих фотосигнала, управление АЧХ усилительного тракта, ослабление чувствительности к большому сигналу и т.д. К перспективным функциям можно отнести выполнение аналого-цифрового преобразования фотосигнала на кристалле БИС считывания. Таким образом, мультиплексоры для инфракрасных (ИК) МФЧЭ можно рассматривать как сложное аналого-цифровое устройство, выполняющее целый ряд функций по обработке фотосигналов на микроэлектронном уровне.

Расширение круга решаемых задач в многоэлементных ФПУ потребовало поиска новых способов считывания (мультиплексирования) фотосигналов. Анализ технических требований, предъявляемых к многоэлементным ФПУ потенциальными потребителями, позволяет выделить следующие новые направления в организации считывания:

- введение функции просмотра изображения в режиме «окна» (одного или нескольких), что позволяет выделять из полноформатного кадра только интересующие объекты;
- бинирование фотосигнала за счет его считывания не с каждого ФЧЭ, а с массивов ФЧЭ с заданными размерами: 2×1 , 2×2 , 4×4 и т.д.;
- реализация в накопительной ячейке функции высокочастотной фильтрации фотосигнала (низкочастотная фильтрация осуществляется самим процессом интегрирования фототока), что позволяет повысить отношение сигнал/шум, динамический диапазон, а также проводить селекцию динамических целей;
- введение в накопительную ячейку электронного микросканирования (ЭМС), позволяющего значительно повысить разрешение фоточувствительной матрицы.

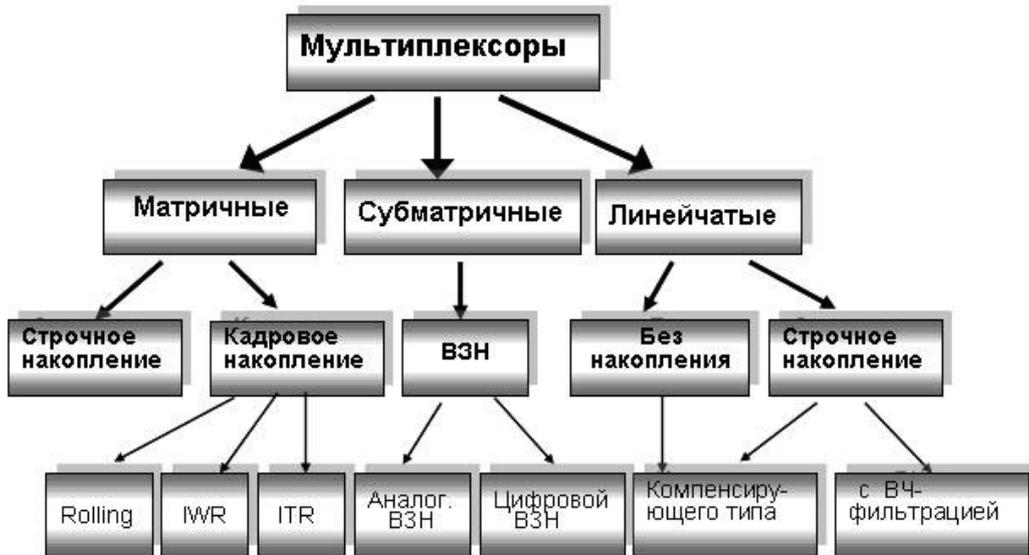


Рис. 1. Классификация БИС считывания (мультиплексоров) для ИК ФПУ.

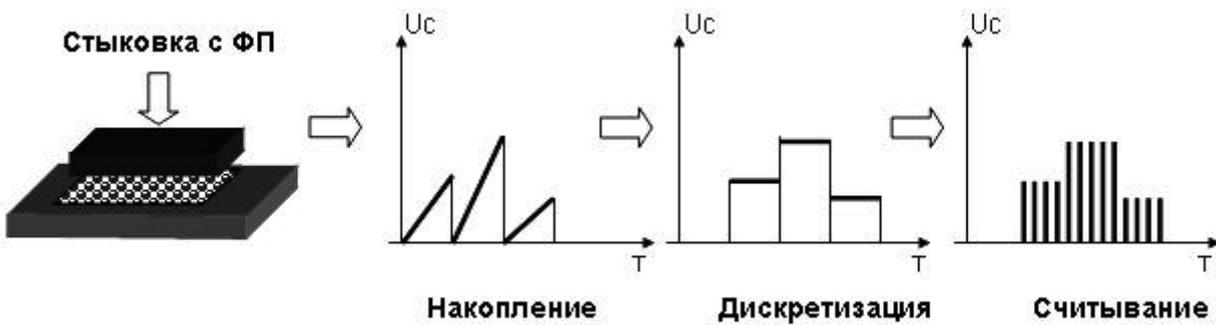


Рис. 2. Функции, реализуемые в БИС считывания.

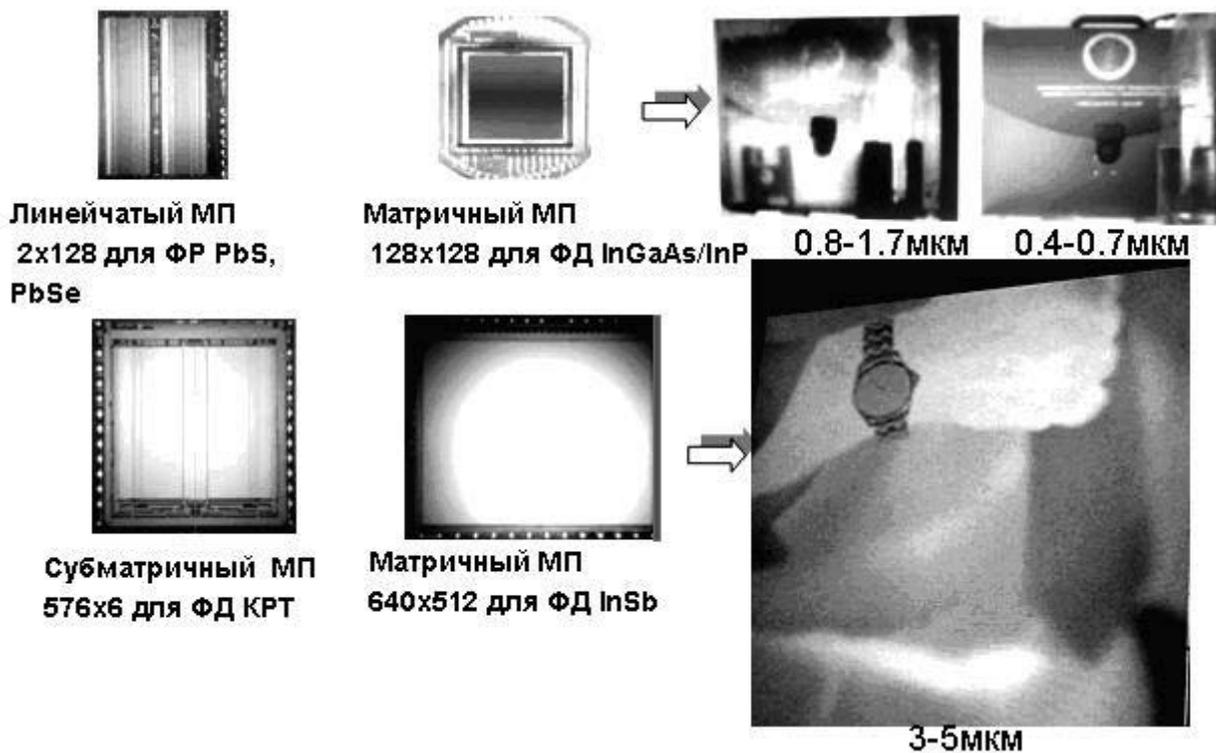


Рис. 3. Современные БИС считывания, разработанные в ФГУП «НПО»Орион»

Целью данной работы является определение тенденций в разработке БИС считывания на ближайшую перспективу на основе анализа достижений в развитии БИС считывания для ИК ФПУ 2-го поколения.

Современное состояние, основные тенденции и закономерности развития БИС считывания

За последние 10–12 лет в ФГУП «НПО «Орион» накоплен большой опыт по разработке БИС считывания для ФПУ 2-го поколения, имеющих информационную емкость до 1 мегапиксела (рис. 3). Несомненным является тот факт, что в дальнейшем сохранится деление многоэлементных ИК ФПУ на два типа: сканирующие и «смотрящие». Достоинства каждого из типов ФПУ хорошо известны и применяются на практике в оптико-электронной аппаратуре. Например, в сканирующих ФПУ можно получить более высокую обнаружительную способность в режиме временной задержки и накопления (режим ВЗН), большее пространственное разрешение за счет возможности топологического перекрытия фоточувствительных элементов в направлении поперек сканирования, гораздо более широкие области обзора исследуемого пространства. ФПУ «смотрящего» типа позволяют реализовать преимущества, связанные с отсутствием оптико-механического сканирования: снижение габаритов, веса и потребляемой мощности. Кроме того, в таких ФПУ имеются широкие возможности по обработке фотосигнала непосредственно в фокальной плоскости: режим «окна», фильтрация, коррекция неоднородностей, двойная коррелированная выборка, аналогово-цифровое преобразование, электронное микросканирование и т.д. БИС считывания, применяемые в указанных многоэлементных ИК ФПУ, соответственно, делятся на линейчатые и матричные.

Основными тенденциями современного и будущего развития БИС считывания являются следующие:

- использование самых современных достижений КМОП-технологии;
- постоянный рост формата БИС считывания, ведущий к увеличению количества информационных пикселей на выходе БИС и стремительный рост удельного веса цифровой части БИС считывания, особенно в части потребляемой мощности (рис. 1);
- уменьшение шага следования ячеек первичной обработки фотосигнала до уровня,

определяемого теоретическим (дифракционным) пределом: $\Delta = 1,22 \cdot \lambda \cdot (F/D)$;

- схемотехническое совершенствование БИС считывания, расширяющее количество выполняемых функций на кристалле БИС, включая аналого-цифровое преобразование фотосигнала.

Анализ приведенных тенденций позволяет выделить следующие закономерности в развитии БИС считывания:

- постоянный рост информационной емкости выходного сигнала БИС считывания;
- идеология построения БИС считывания направлена на достижение предельной чувствительности фотоэлектронного модуля (устройства) при минимальной потребляемой мощности и габаритах кристалла БИС.

Обзор публикаций по микрофотоэлектронике позволяет коротко представить современное состояние зарубежных матричных и линейчатых БИС считывания в виде табл. 1 и 2, соответственно.

Современное состояние отечественных БИС считывания, разработанных в ФГУП «НПО «Орион» в 2010–2012 г.г., приведено в табл. 3.

Из сравнения приведенных данных в табл. 1–3 следует, что по линейчатым БИС считывания степень отечественных разработок (576×6, 1024×10) находится на современном уровне. Но по матричным БИС считывания наблюдается существенное отставание, связанное, в первую очередь, с отсутствием аналого-цифрового преобразования выходного сигнала БИС считывания.

Прогноз развития БИС считывания

Прогнозируя дальнейшее развитие БИС считывания, надо отметить, что фактор технологического прогресса в кремниевой КМОП электронике делает гораздо более конкурентоспособными БИС считывания с цифровым представлением выходного сигнала. Дело в том, что цифровой сигнал позволяет преодолеть некоторые негативные тенденции, существующие в крупноформатных (не менее мегапиксела) БИС считывания. Например, увеличение формата матричного ФЧЭ в 2 раза приводит к 4-кратному росту частоты считывания информации (при сохранении частоты кадров), и, соответственно, росту полосы пропускания устройств мультиплексирования: коммутаторов и выходных буферов напряжения. При этом шум считывания на выходе БИС растет пропорционально квадратному корню из по-

Таблица 1

Производитель, материал ФЧЭ	Формат ФЧЭ, ИК-диапазон	Шаг ФЧЭ, мкм	Формат сигнала	NETD, мК при $T_{\text{раб}} = 80 \text{ К}$
SCD InSb	1280×1024 СВ	15×15	15 bit (в столбце)	20–25
Sofradir KPT	1280×1024 СВ	15×15	аналоговый	20–25
CEA-Leti KPT	320×256 ДВ	25×25	15 bit (в ячейке)	2–3
Sensor Unlimited InGaAs/InP	1280×1024 КВ	15×15	аналоговый	—

Таблица 2

Производитель, материал ФЧЭ	Формат ФЧЭ, ИК-диапазон	Шаг ФЧЭ, мкм	Шаг каналов БИС	Формат сигнала
Sofradir KPT	480×6 ДВ	28×38	25	аналоговый
AIM KPT	576×7 ДВ	20×30	20	аналоговый
BAE System KPT	768×8 СВ	30×30	15	аналоговый
SCD InSb	512×16 СВ	25×25	25	аналоговый

Таблица 3

Спектральный диапазон, мкм	Формат	Способ накопления	Шаг ФЧЭ, мкм	Материал ФЧЭ	Рабочая температура, К
ДВ 8 – 10,5	384×288	строчное	25×25	KPT	80
ДВ 8 – 10,5	576×6	строчное	14×42	KPT	80
СВ 3 – 5	640×512	кадровое, IWR	15×15	InSb	80
КВ 2-3	1024×10	ВЗН	15×45	KPT	165–200
КВ 0.8 – 1,7	320×256	кадровое, IWR	30×30	InGaAs/InP	250–300
УФ 0,26 – 0,28 мкм	320×256	кадровое, IWR	30×30	AlGaIn/GaN	270–300

лосы, что может существенно ухудшить отношение сигнал–шум накопительной ячейки. Цифровое считывание сигнала БИС устраняет это препятствие на пути достижения предельной чувствительности и сводит к минимуму уровень NETD. Как следует из табл. 1, именно в БИС считывания с цифровой накопительной ячейкой достигнуто минимальное значение NETD величиной 2–3 мК.

Вторая крупная проблема, решаемая в БИС считывания с цифровым выходом, состоит в многократном снижении потребляемой мощности всего ФПУ. Например, БИС считывания для СВ ИК диапазона формата 1280×1024 (Hercules, SCD), имеющая цифровой выход при потребляемой мощности 120 мВт, позволяет заменить аналоговую БИС считывания этого формата (с 16 аналоговыми выходами и 16 внешними АЦП) при общей мощности потребления 8 Вт.

Разработанные ФГУП «НПО «Орион» БИС считывания (табл. 3) позволяют существенно сократить отставание от зарубежных аналогов (до уровня 5–7 лет) и являются основой для перспективных разработок на период до 2025 г. По отечественным БИС считывания для матричных ФПУ (0,5–4 мегапикселя) можно прогнозировать сохранение аналоговой

формы представления выходного сигнала, но при значительном расширении выполняемых функций на кристалле БИС. Для матричных ФПУ (0,1–0,5 мегапикселя) БИС считывания будут иметь АЦП в ячейке при проектных нормах 90–180 нм или в каждом столбце при проектных нормах 180–350 нм.

По линейчатым БИС считывания можно прогнозировать разработки в основном с аналоговым выходом или, по крайней мере, с АЦП в каждом столбце по причине следующих особенностей таких БИС:

- малые времена накопления (0,01–0,5 мс), обусловленные необходимостью сканирования изображения;

- значительный объем обработки фотосигнала происходит за пределами накопительной ячейки (режим временной задержки и накопления, компенсация дефектных ФЧЭ, программирование памяти цифровых кодов деселекции и т.д.);

- построчное считывание информации вместо кадрового.

Увеличение формата линейчатых БИС считывания выше, чем 1000–1500 каналов, не целесообразно, т.к. более оптимальным способом является каскадирование БИС (с перекрытием каналов) и цифровой компенсацией времен-

ных задержек в составе широкоформатного ФПУ.

Заключение

Основным стимулом для развития линейчатых БИС считывания будут новые разработки оптико-электронной аппаратуры для авиационных систем нижнего обзора, космических систем тепlopеленгации околоземных целей и для многоспектрального дистанционного зондирования поверхности Земли.

В целом, следует отметить, что развитие БИС считывания будет находиться под влия-

нием не только поставленных задач, но и определяться конструктивно-технологическими свойствами фоточувствительных матриц.

Литература

1. Rogalski A. Infrared detectors for Future // Acta Physica Polonica A. 2009. № 3
2. Michel Zecri, Patrick Maillart. Advanced ROICs design for cooled IR detectors // SOFRADIR, France
3. Еремчук А.И., Хромов С.С., Зайцев А.А. // Прикладная физика. 2010. № 1

Multiplexing of photosignals for the second generation of IR FPAs

P.A. Kuznetsov and S.S. Khromov

Orion R&P Association
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

The paper presents progress in ROIC for the second generation of FPAs . The outlook for near-future trends in ROIC design is described.

PACS: 85.60 Gz

Keywords: IR FPA, pixel, ROIC

Bibliography – 8 references

Received February 12, 2013