

МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Многоспектральные фоточувствительные приборы – один из важных разделов оптоэлектроники, в сферу которой входит оптическая связь, обработка информации и исследование процессов взаимодействия оптического излучения с веществом. Компания "Пульсар" разработала широкий класс фотоприборов, как одноэлементных (фотодиоды, лавинные фотодиоды), так и многоэлементных (линейки и матрицы). Их спектральный диапазон простирается от 0,3 до 14 мкм. Ниже представлен обзор их основных характеристик.

Основные определения и описание принципа действия одноэлементных и многоэлементных приборов можно найти в публикациях [1–6]. Многоэлементные фотоприборы с зарядовой связью (ФПЗС) делятся на линейные (ЛФПЗС) и матричные (МФПЗС).

Простой линейный приемник состоит из строки с фотодиодами (ФД), изолированным затвором переноса от считывающего ПЗС-регистра. Плотность упаковки ФД определяется размерами электродов в ПЗС-регистре. Когда на затвор подается высокое напряжение открывания, все заряды, накопленные в фотоэлементах (ФЭ), параллельно переносятся в считывающий регистр, где каждому ФД соответствует ячейка переноса (ПЗС-бит). Сразу после закрывания затвора в ФЭ начинает накапливаться заряд следующей строки, а предыдущая строка изображения считывается с помощью регистра переноса, который экранирован от падающего света. В этом случае режим накопления длится в течение всего цикла или более.

Матричные ФПЗС имеют два основных типа организации массива [1] – в виде матриц с кадровым или с межстрочным

переносами. Первый тип образован совокупностью вертикальных регистров ПЗС и имеет две расположенные друг под другом секции: накопления и хранения.

Рассмотрим принцип действия МФПЗС на примере режима ТВ-развертки. В период времени, равный одному полю кадровой развертки, во всех элементах секции накопления происходит синхронное накопление фотогенерируемых зарядов. Во время обратного хода кадровой развертки происходит быстрый (параллельный во всех столбцах матрицы) перенос зарядов из секции накопления в секцию хранения. В следующем поле (в секции накопления) центр накопления под действием управляющих напряжений смещается на полшага матрицы по вертикали (чем обеспечивается чересстрочная развертка). Из секции хранения заряды построчно переносятся в горизонтальный регистр, а затем заряд переносится на выходное устройство и преобразуется в видеосигнал.

Второй тип (с межстрочным переносом) можно представить как структуру, образованную из матрицы с кадровым переносом путем вставки столбцов секции хранения (экра-

нированных от света) между столбцами секции накопления. В отличие от матриц с кадровым переносом, где ПЗС-ячейка выполняет поочередно функции накопления и переноса (разделенные во времени), матрицы с межстрочным переносом пространственно разделяют эти функции. В такой структуре перенос кадра из секции накопления в области хранения (экранированные от света) происходит за один такт. Изображение следующего кадра (в виде картины зарядовых пакетов) накапливается в ФД, очищенных от заряда. В это время предыдущий кадр сдвигается (в экранированных от света вертикальных регистрах сдвига) и построчно считывается выходным регистром сдвига. Приемники с межстрочным переносом работают просто, но имеют сложную конструкцию ячейки и меньшую фоточувствительную площадь (за счет встроенных вертикальных каналов переноса, которые необходимо экранировать от света).

Матричные приемники имеют конструкцию, которая обеспечивает регистрацию движущегося изображения в режиме временной задержки и накопления заряда (ВЗН) [1]. В ней используется принцип синхронного многократного накопления информационного заряда, что увеличивает чувствительность пропорционально количеству элементов матричной секции, используемых в режиме ВЗН. Описанный принцип регистрации движущегося изображения требует стабилизации движущегося объекта в пространстве и точного совпадения вектора скорости объекта с вектором перемещения зарядовых пакетов (по абсолютной величине и углу). Основное преимущество режима ВЗН – увеличение времени экспозиции без потери геометрического разрешения. Это позволяет улучшить характеристики приемника при низких уровнях освещенности (без уменьшения разрешения или скорости поступления информации).

Многоспектральные фотоприемники с переносом заряда (ФППЗ) предназначены для систем искусственного зрения (как части систем искусственного интеллекта). Они способны не только воспринимать черно-белые и цветные сюжеты, но и преобразовывать принятую информацию в электрические сигналы и обрабатывать ее в зависимости от области применения.

Они могут иметь различную конструкцию и функциональные особенности, например, могут различать только движущиеся объекты, воспринимать контуры предметов, различать их по цвету и температуре, рассматривать микронные структуры (состоящие из десятков тысяч элементов), то есть могут воспринимать окружающий мир подобно глазу, превосходя его в способности видеть в недоступных глазу областях спектра (УФ и ИК).

Приборы этого класса в состоянии заменить сложные оптические устройства при наблюдении планет Солнечной

системы. Они широко используются на спутниках для исследования поверхности Земли, природных ресурсов в интересах народного хозяйства и решения экологических проблем.

Отличительными особенностями технологии создания таких приборов являются:

- совместимость процессов формирования ФЭ, ПЗС-структур и электронных схем обработки сигналов на одном кристалле;
- возможность создания прибора, содержащего в одном корпусе кристалл с несколькими ПЗС-структурами и оптические фильтры, обеспечивая его чувствительность в нескольких спектральных диапазонах;
- возможность формирования гибридных сборок, позволяющих увеличить количество элементов разложения до нескольких десятков тысяч.

В бытовой аппаратуре замена видеоконвертеров на ФПЗС обеспечила значительный выигрыш в надежности, потреблении, массе и габаритах. Практически все современные разработки телекамер на ФПЗС предназначены для цветного изображения, так как именно в них наиболее полно проявляются достоинства ФПЗС по сравнению с ТВ-трубками. Так, жесткий геометрический растр позволяет осуществлять сведение цветов с точностью до 0,1 мкм для ТВ-камер на нескольких (двух или трех) матрицах. В последние годы созданы видеокамеры цветного изображения на одной матрице с нанесением цветокодирующих светофильтров непосредственно на матрицу ФЭ, что может быть осуществлено в едином технологическом цикле изготовления ФПЗС.

Габариты, масса и потребляемая мощность – параметры, имеющие особое значение в бортовой аппаратуре. Снижение их в 10–100 раз при замене видеоконвертеров на ФПЗС обеспечило широкое распространение ПЗС в бортовой аппаратуре. Появление ПЗС с жестким растром позволило создать системы наведения и ориентации космических аппаратов с характеристиками, не достижимыми ранее при использовании видеоконвертеров.

Большое значение в специальной аппаратуре имеет процедура выделения контуров и селекции подвижных объектов, которую можно реализовать на двух ПЗС. При этом используются такие свойства ПЗС, как возможность электрического ввода сигнала и хранения информации.

Высокое пространственное разрешение ФПЗС, а также возможность его дальнейшего повышения за счет объединения в гибридные сборки с числом элементов фотоприемника до 30–50 тысяч, позволяют построить на их основе многофункциональные системы экологического мониторинга, контроля за природопользованием, предупреждения и контроля опасных природных явлений, чрезвычайных ситуаций и катастроф.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНЫХ И МАТРИЧНЫХ ФПЗС

В табл.1 приведены характеристики линейных ФПЗС, разработанных в "Пульсар" и производимых совместно с "НИИМЭ" и заводом "Микрон" [1].

ЛФПЗС разработаны для различных сканирующих систем, обеспечивающих факсимильную передачу, распознавание оптических образов, что требует высоких разрешающей способности, чувствительности и скорости вывода данных.

1024 элемента прибора MPL1024B обеспечивают разрешение 4,725 линий/мм при сканировании страницы шириной 216 мм, а 2048 элементов прибора MPL2048B – 8 линий/мм при сканировании страницы шириной 256 мм.

Приборы серии S: MPL1024S, MPL2048S и MPL4096S (в отличие от приборов серии B) имеют линейную организацию, один двухфазный регистр сдвига и одно выходное устройство и представляют собой линейные твердотельные датчики изображения на 1024, 2048 и 4096 элементов соответственно.

Приборы снабжены специальным устройством, которое обеспечивает возможность их работы в режиме электронного затвора при сильной локальной освещенности, что увеличивает динамический диапазон на три порядка.

Таблица 1. Характеристики линейных ФПЗС

Параметр	Тип прибора							
	Серия B		Серия S			Серия H		
	MPL1024B	MPL2048B	MPL1024S	MPL2048S	MPL4096S	MPL4096H	MPL6144H	
Число ФЭ	1024×1	2048×1	1024×1	2048×1	4096×1	4096×1	6144×1	8192×1
Тип организации	Билинейная		Линейная					
Размер элемента	13×13 мкм		13×13 мкм (MPL1024S–MPL4096S) и 6,5×6,5 мкм (MPL4096H–MPL6144H)					
Электронный затвор	нет	нет	есть	есть	есть	есть	есть	есть
Чувствительность, В/мкДж/см ² , λ=670 нм	4,0	4,0	7,0	7,0	7,0	10,0	10,0	10,0
Неравномерность чувствительности, %	5	5	5	5	5	10	10	10
Неравномерность темнового сигнала, мВ	10	10	10	10	10	15	15	15
Напряжение насыщения, В	2,4	2,4	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7
Частота вывода информации, МГц	30 (15×2)	12 (6×2)	15	15	15	20	20	40 (20×2)

Примечание. Число фаз регистра сдвига равно 2; спектральный диапазон ФПЗС 0,35–1,1 мкм; закончена разработка приборов MPL12288H с числом элементов 12288×1.

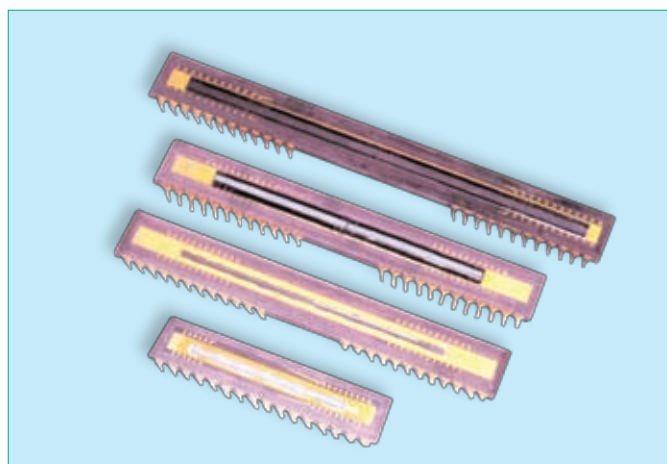


Рис. 1 Образцы линейных ПЗС (верхняя линейка содержит 12288 элементов)

ФЭ приборов серий S и B имеют квадратную форму размером 13×13 мкм и расположены без зазора с шагом 13 мкм. Поэтому фактор заполнения фотоячейки (ФЯ) составляет 100%. Заряды, генерируемые светом в ФД, могут накапливаться как под фотозатвором, так и в ФД.

ЛФПЗС серии H: MPL2048H, MPL4096H и MPL6144H – это однострочные твердотельные датчики изображения на 2048, 4096 и 6144 элементов высокого разрешения с размером ФЭ 7×7 мкм. Конструктивно они идентичны приборам серии S, но обладают существенно более высоким разрешением. ФЭ приборов серии H (также квадратной формы) имеют размер 7×7 мкм и расположены без зазора с шагом 7 мкм. Поэтому фактор заполнения ФЯ так же, как и для приборов серий S и B, составляет 100%.

Приборы серии H снабжены 3-каскадным выходным устройством, имеющим высокий коэффициент преобразования заряд/напряжение – 12 мкВ/электрон и обеспечивающим линейность преобразования во всем динамическом диапазоне при тактовых частотах до 40 МГц.

Линейные приборы всех серий монтируются в типовые металлокерамические корпуса различных типоразмеров

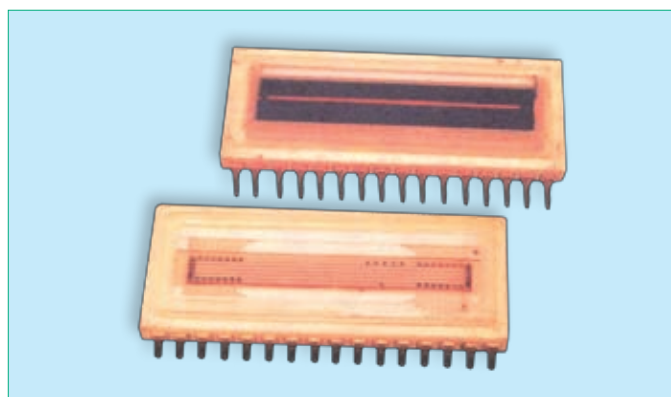


Рис.2 Образцы спектрозональных линеек

(рис.1). Входное окно герметизируется оптическим стеклом или лейкоапфиром, прозрачным в диапазоне длин волн 0,3–1,1 мкм. Рабочий диапазон температур составляет ±60°C.

Характеристики МФПЗС, разработанные в "Пульсаре" и производимые совместно с НИИМЭ и заводом "Микрон", приведены в табл.2 [1].

Многоспектральный ФППЗ типа К1200ЦЛ4 создан для сканирующих устройств космической техники (см. модификации



Рис.3 Космический снимок устья Невы и Финского залива, выполненный с использованием спектрозональных линеек (искусственный контраст подчеркивает картину загрязнения)

прибора на рис.2). Это совокупность кристалла с четырьмя ФПЗС-структурами (каждая из них имеет 2048 ФЭ) и фильтров, формирующих четыре диапазона длин волн, расположенных в одном корпусе.

Для получения качественных спектрозональных изображений, в отличие от цветных, характеристики пропускания фильтров каждого диапазона должны иметь прямоугольную форму и не пересекаться. Этим требованиям лучше всего удовлетворяют интерференционные фильтры, имеющие к тому же высокий коэффициент пропускания и точность воспроизведения спектрального диапазона.

Фрагмент псевдоцветного изображения поверхности Земли, полученный со спутника, где был установлен этот прибор, показан на рис.3.



Рис.4 Линейка и ПЗС-мультиплексоры для съемки в диапазоне 8–14 мкм

ФОТОПРИЕМНИКИ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

В "Пульсаре" разработан линейный 256-элементный фотоприемник (ФП) с ФЭ планарной конструкции (на основе кремния, легированного галлием) с интегральными ПЗС-мультиплексорами, осуществляющими в фокальной плоскости накопление, предварительную обработку, усиление и считывание информации [3]. Этот прибор относится к приборам второго поколения, особенность которых – наличие ИС считывания и предварительной обработки сигнала в холодной зоне

Таблица 2. Характеристики матричных ФПЗС

Параметр	MPM 768×128 TDI	MPM 768×128 TDI	MPM 500 IL-11	MPM 756 IL-11	MPM 752 IL-8
Число ФЭ	768×128	768×128	500×582	752×581	756×582
Тип организации	ВЗН		Межстрочный перенос		
Шаг элемента, мкм по горизонтали	7	6	17	11	8,6
по вертикали	7	6	11	11	8,3
Максимальная переэкспозиция	нет	нет	300	300	300
Электронный затвор	есть	есть	есть	есть	есть
Чувствительность, В/мкДж/см ²	4,0	4,0	10,0	10,0	10,0
Напряжение насыщения, В	2,4	2,4	1,0	1,0	1,0
Спектральный диапазон, мкм	0,4–1,1	0,4–1,1	0,35–1,1	0,35–0,7	0,35–0,7
Динамический диапазон без электронного затвора	10 ³	10 ³	2·10 ³	10 ³	10 ³
с электронным затвором	10 ³	10 ³	2·10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶
Частота вывода информации, МГц	15	15	9,6	15	15

Примечание. Тип канала переноса – объемный; полярность тактовых импульсов относительно подложки – положительная; число фаз вертикального регистра сдвига – 4, горизонтального – 2; неравномерность чувствительности – 5%; неравномерность темнового сигнала – 10 мВ.

устройства фотопреобразования. Линейные и матричные ПЗС-мультиплексоры дают возможность использовать линейки формата 2×256 , 4×256 и создавать большие фоточувствительные массивы благодаря применению модулей линеек для сборки фокальных плоскостей.

Прибор выполнен в виде бескорпусной схемы, предназначенной для работы в оптическом криостате, смонтированном на фланце газовой микрокриогенной системы замкнутого типа. В этом криостате фоточувствительная линейка находится при температуре 25К, а ПЗС-мультиплексоры, связанные с ней полиимидными кабелями, – при температуре 77К. Внешний вид схемы показан на рис.4.

В "Пульсаре" также разработаны фоточувствительные модули на структурах с квантовыми ямами (СКЯ). Это многослойные эпитаксиальные структуры с чередующимися слоями (InGaAs) и барьеров (AlGaAs) для диапазона 3–5 мкм или слоями ям (GaAs) и барьеров (AlGaAs) для диапазона 8–12 мкм [5]. Свойства ФП на СКЯ похожи на свойства их аналогов на основе материалов с примесной проводимостью (по существу они являются фотоспротивлениями), однако имеют по сравнению с аналогами ряд преимуществ. Наиболее существенные из них:

- возможность управлять спектром фоточувствительности;
- более высокая рабочая температура (в диапазоне 8–12 мкм эта разница может достигать 20–30°C);
- более высокая квантовая эффективность и разрешающая способность в случае матричных ФП;
- более высокая радиационная стойкость.

Считывание сигналов с ФП осуществляется с помощью кремниевого КМОП-мультиплексора, расположенного в холодной зоне и соединенного с ФП посредством индиевых столбов. Конструкция модуля предусматривает его эксплуатацию вместе с криогенной системой.

Р-І-Н-ФОТОДИОДЫ И СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ

В "Пульсаре" разрабатывались кремниевые р-і-п-ФД большой площади: 1, 2 и 4 см², а также заказные ФД. Эти приборы имеют следующие особенности:

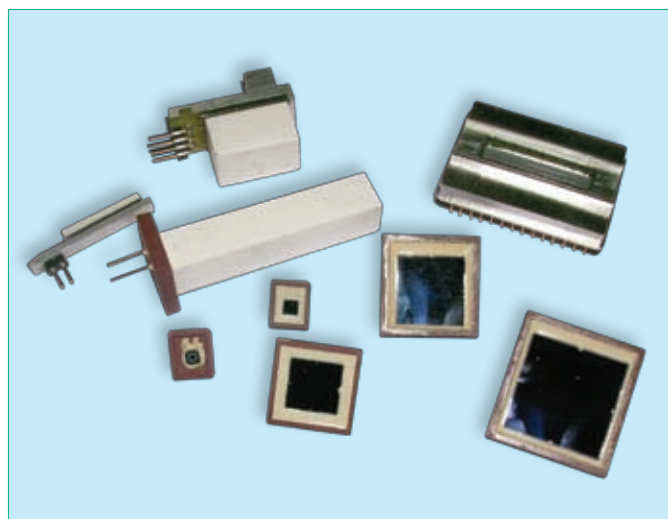


Рис.5 Образцы ФД и сцинтилляционных счетчиков

- большая активная площадь (1×1 см, $S=1,0$ см²; $1,45 \times 1,45$ см, $S=2,0$ см²; 2×2 см, $S=4,0$ см²);
- возможность работы в фотовольтаическом или в фотопроводящем режиме;
- низкие темновые токи – 1,5–5 нА/см²;
- высокая спектральная чувствительность ФД в диапазоне 380–1100 нм;
- возможность сборки детекторов рентгеновского и гамма-излучений со сцинтилляторами CsI, CdWO₄, PbWO₄, ZnWO₄, BGO (может быть изготовлен закрытый от света детектор ионизирующих излучений).

Примером заказного прибора может служить двухканальный ФД с активной частью каждого канала $0,05 \times 57,0$ мм и защитой от света пространства между каналами с помощью полиимида с покрытием.

Одна из основных областей применения р-і-п-ФД – регистрация ионизирующих излучений (альфа-частиц, рентгеновского и гамма-излучений). Кремниевый р-і-п-ФД – удобный датчик излучений для систем промышленной томографии, дефектоскопии, неразрушающего контроля, таможенного контроля различных контейнеров, научных экспериментов в физике и для систем радиационного контроля окружающей среды.

Так, модуль "р-і-п-ФД–сцинтиллятор" – пример прибора, в котором р-і-п-ФД (площадью $3,0 \times 20,0$ мм) с тонким входным окном и высокой квантовой эффективностью объединен со сцинтиллятором на основе CdWO₄ с хорошей интенсивностью свечения, регистрирующим кванты до 8 МэВ. Максимум спектра излучения лежит в области 480–540 нм. В этом диапазоне р-і-п-ФД хорошо регистрирует свет.

В табл.3 приведены конструктивные параметры и области применения разработанных приборов – детекторов для визуализации рентгеновских и гамма-излучений.

Конструкция линеек и одиночных приборов позволяет проводить их сборку в модули требуемой длины без потери пространственной точности. На рис.5 показаны некоторые образцы разработанных ФД и сцинтилляционных счетчиков.

Таблица 3. Параметры и области применения детекторов-визуализаторов рентгеновских и гамма-излучений

Размеры элемента, мм	Число элементов, шт.	Диапазон	Область применения
1,57×3,2 (1,43×3,0)	16 (линейка)	80–200 кэВ	Контроль багажа
0,84×0,98 (0,65×0,78)	32 (линейка)	50 кэВ	Промышленный контроль
0,2×0,31 (0,16×0,27)	2×32 (билинейка)	80–200 кэВ	Контроль кабелей
3,0×20,7 (2,5×20,0)	1	5 МэВ	Таможенный контроль
2,2×20,7 (1,92×20,0)	1 или 8	8 МэВ	Промышленный контроль
1,0×23,0 (0,765×22,25)	1 или 8	500 кэВ	Томография
1,9×21,0 (1,46×20,0)	1	500 кэВ	Промышленный контроль
1,5×21,0 (1,0×20,0)	1	500 кэВ	Промышленный контроль
1,0×7,0 (0,72×6,0)	8	500 кэВ	Промышленный контроль
1,13×1,13 (1,0×1,0)	4×4 (матрица)	80–200 кэВ	Промышленный контроль
1,1×1,1 (0,84×0,84)	5×5 (матрица)	80–200 кэВ	Промышленный контроль
1,1×1,1 (0,84×0,84)	8×8 (матрица)	80–200 кэВ	Промышленный контроль

ЛИТЕРАТУРА

1. **Воронов В.В.** и др. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью – современная элементная база фотонных систем. – Электронная промышленность, 2003, №2, с.155–168.
2. **Костюков Е.** и др. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – Электронные компоненты, 2003, №4, с.83–88.
3. **Белоконов В.М.** и др. Кремниевые фотоприемники длинноволнового ИК-диапазона. – Электронная промышленность, 2003, №2, с.169–175.

4. **Василевская Л.М.** и др. Спектрозональные телевизионные камеры для космической системы "Ресурс". – Электронная промышленность, №6-7, 1993, с.147–149.
5. **Аветисян Г.Х.** и др. Фоточувствительность структур с квантовыми ямами, выращенными методом МОС-гидридной эпитаксии при нормальном падении излучения. – Электронная промышленность, 2003, №2, с.143–150.
6. **Клемин С.Н., Кузнецов Ю.А., Филатов Л.А.** Приемники ионизирующих излучений и твердотельный электронный умножитель на основе кремния. – Электронная промышленность, 2003, №2, с.117–120.