

Фотоэлектрические параметры многоэлементных фотоприемников на основе 2x64 КРТ фотодиодных линеек и ПЗС-устройств считывания

А. Г. Голенков, В. П. Рева, Ф. Ф. Сизов, В. В. Забудский
Институт физики полупроводников НАН Украины, г. Киев, Украина

Проведены исследования фотоэлектрических параметров многоэлементных фотоприемников дальнего (8–10,5 мкм) ИК-диапазона на основе 2x64 фотодиодных линеек и ПЗС-устройств считывания. Проанализированы выходные сигналы ФПУ при различной фоновой нагрузке (температура фона — 10–50 °С) для различных режимов работы схем считывания. Измерение характеристик ФПУ включало в себя определение обнаружительной способности D^ , температурного эквивалента шума NETD, красной границы фотоответа и некоторых других параметров фотоприемников. Изображение, полученное с использованием ФПУ данного типа в спектральном диапазоне 8–10,5 мкм, обладает хорошим качеством.*

Многоэлементные фотоприемные устройства (ФПУ) на основе охлаждаемых КРТ матриц остаются наиболее чувствительными среди фотоприемников среднего и дальнего ИК-диапазонов, с высокой частотой кадровой развертки, малым временем накопления и малым размером фоточувствительных элементов [1]. В качестве примера можно привести фотоприемники на основе многоквантовых структур AlGaAs и напряженных сверхрешеток CaInSb, кремниевые детекторы с легированием, неохлаждаемые микроболометрические матрицы, фотодиоды InSb, детекторы на основе барьеров Шоттки и др. Ни один из упомянутых выше детекторов не может конкурировать с фотоприемниками на основе КРТ в силу фундаментальных физических ограничений. Будучи в некоторых аспектах более технологичными, они, тем не менее, не могут достичь параметров КРТ при сравнимых или даже более низких температурах функционирования, за исключением, возможно, термических микроболометров и пироэлектрических приемников. В настоящее время твердые растворы КРТ являются практически идеальным материалом для изготовления фотоприемников среднего (3–5 мкм) и дальнего (8–12 мкм) ИК-диапазонов.

Параметры фотоприемников на основе КРТ МСТ на сегодняшний день ограничиваются преимущественно электронными схемами считывания сигналов. Лучшие образцы детекторов ближнего и дальнего ИК-диапазона практически работают в режиме ограничения фоном и улучшить их чувствительность почти невозможно. В то же время схемы считывания в длинноволновых ИК-приемниках работают с относительно

небольшим, по сравнению с фоновым потоком температурой 300 К, полезным сигналом. Хотя типичное время кадра ФПУ должно составлять около 20 мс, накопительная емкость устройства считывания ПЗС из-за влияния фонового потока заполняется за 20–50 мкс. Для обеспечения высоких параметров ФПУ электрические сигналы от КРТ-диодов и ПЗС-устройства считывания должны быть путем задания различных режимов обработки в зависимости от величины фоновой нагрузки приведены к определенному диапазону амплитуд без увеличения шумов на выходе ФПУ.

В настоящей работе исследуются выходные сигналы ФПУ при различной фоновой нагрузке, кроме того, измерены такие параметры детекторов, как чувствительность, обнаружительная способность, температурный эквивалент шума и др.

Обработка сигналов ФПУ

Как правило, в ФПУ используется преобразователь заряд—напряжение с линейной передаточной характеристикой. Падающий поток, включая фоновое излучение и излучение от исследуемого объекта, преобразуется в заряд Q_0 , а затем в напряжение соответствующей амплитуды U_0 . Выходное напряжение обычно ограничено величиной 2,5–5 В. Кроме того, необходимо обеспечить динамический диапазон ФПУ, оперирующего небольшим полезным сигналом на фоне большого фонового потока. Поэтому используются различные режимы обработки сигналов ПЗС схемой считывания.

Для обработки сигналов в холодной зоне разработаны и изготовлены кремниевые устройства

считывания с прямой инжекцией заряда и ПЗС-мультиплексорами для использования с n^+p -фотоэлектрическими многоэлементными линейками [2]. На рис. 1 показаны различные режимы работы входного каскада ПЗС-схемы считывания. Устройства считывания с возможностью деления и вычитания заряда изготовлены по n -канальной МОП-технологии со скрытым или поверхностным каналом ПЗС-регистров. Анализ разработанных схем считывания показал [2], что при условии хорошо стабилизированного питания по постоянному току, уровень собственных шумов схемы считывания пренебрежимо мал по сравнению с уровнем шумов, связанных с фоновым сигналом.

Входной транзистор прямой инжекции R_{EF0} устанавливает рабочую точку (обратное смещение) на фотодиоде. На накопительной емкости, образованной тремя ячейками (UC1, FPS, UC2), накапливается заряд $Q = I\tau_{нак}$, где I — ток фотодиода; $\tau_{нак}$ — время накопления заряда.

Ток I в рабочей точке состоит из темновой составляющей I_T и фототока I_ϕ (рис. 2). Выбор рабочей точки на рис. 2 осуществляется с помощью подбора напряжения на входном транзисторе R_{EF0} (значение $U_{R_{EF0}} \approx 0,5$ В соответствующей величине обратного смещения на каждом фотодиоде $U_{смещ} \approx 120$ мВ), при этом целью яв-

ляется достижение максимума отношения сигнал/шум. Также принимается во внимание разброс пороговых напряжений входных транзисторов (для трех разработанных устройств считывания значение $\Delta U_{пор}$, в соответствии с которым отбраковываются схемы считывания, составляет $\leq \pm 7$ мВ). Время накопления $\tau_{нак}$ устанавливается с помощью служащей затвором емкости FPS или транзистора F_0 . Период $T_{чт}$ между открытиями транзистора F_0 также определяет период считывания информации со всех диодов многоэлементной линейки. В общем случае времена $\tau_{нак}$ и $T_{чт}$ не совпадают ($\tau_{нак} \leq T_{чт}$). При открытии транзистора F_0 входной заряд Q перетекает в 16-битный ПЗС-мультиплексор и преобразуется в напряжение на нагрузочном резисторе вне холодной зоны. Выходные сигналы, сгруппированные по 16 или 18, передаются по нескольким аналоговым выходам. Амплитуда каждого импульса U отображает информацию о входном заряде Q на накопительной емкости одного из каналов регистрации.

В зависимости от приложенного к ячейкам накопительной емкости (UC1, FPS, UC2) напряжения реализуются различные режимы работы ПЗС-схемы считывания: линейный режим; режим с делением заряда; режим с вычитанием заряда; режим с делением и вычитанием.

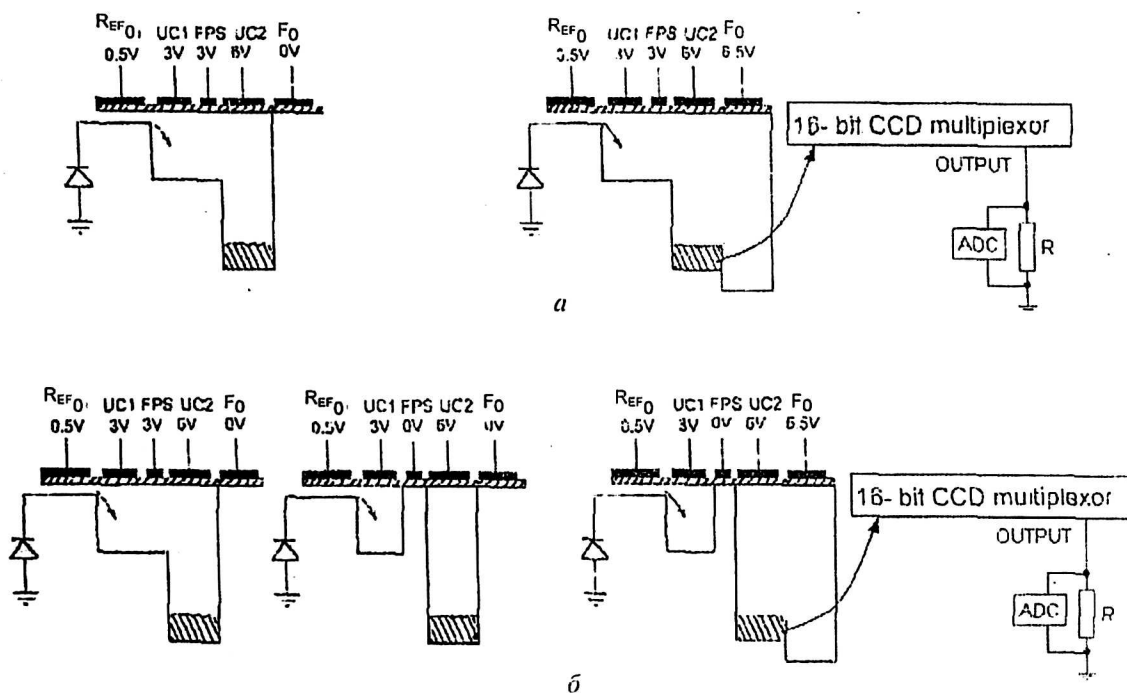


Рис. 1. Различные режимы работы (а, б) входного каскада кремниевой ПЗС-схемы считывания

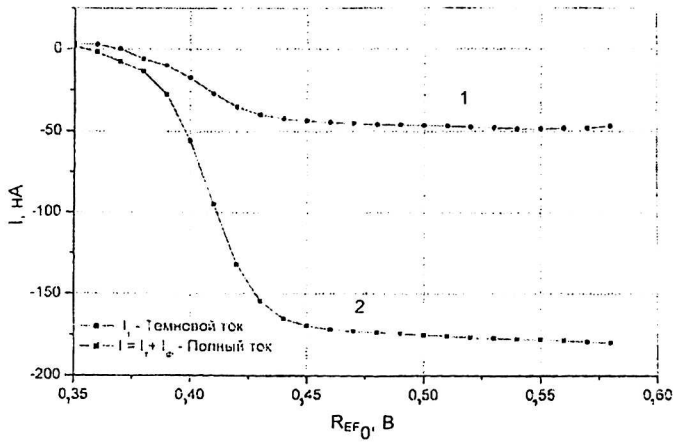


Рис. 2. Зависимость темнового тока фотодиода (кривая 1) и тока, связанного с фоновой засветкой (кривая 2), от обратного смещения (связанного с напряжением R_{EF0}) для линеек с красной границей фотоответа $\lambda_{co} = 12,2$ мкм

Использование режима деления позволяет заданным образом разделить входной заряд; в режиме вычитания удаляется постоянная компонента входного заряда. Эти режимы могут использоваться в случае слишком большого фонового сигнала или сигнала от объекта, помогая достичь расширения диапазона регистрируемых температур и температурного контраста. Кроме того, путем подбора оптимального режима можно уменьшить значения шумов ФПУ. Исследования, проведенные с помощью климатической камеры, показали, что диапазон регистрируемых температур для данного ФПУ составил как минимум $-10 \div +50$ °С без каких-либо дополнительных мер по контролю входного заряда.

На рис. 3 показана зависимость выходного напряжения от времени накопления заряда для различных режимов работы ПЗС схемы считывания (для температуры фонового излучения $T_{фон} = 335$ К).

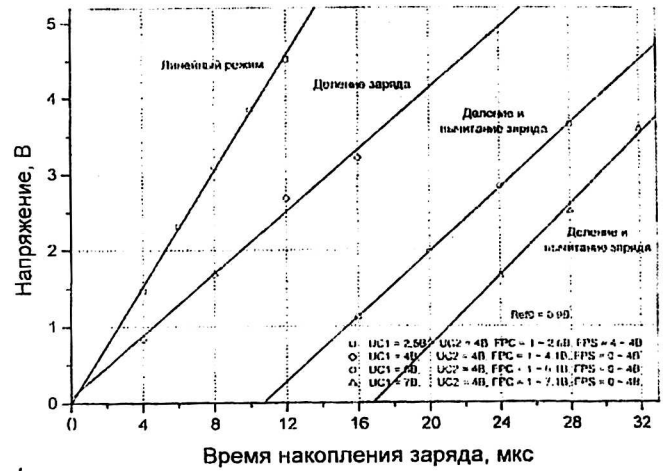


Рис. 3. Зависимость выходного напряжения от времени накопления заряда для различных режимов работы схемы считывания ($T_{фон} = 335$ К)

Для данной температуры фонового излучения можно использовать все перечисленные режимы работы схемы считывания, в том числе регистрировать излучение с большей фоновой нагрузкой.

На рис. 4 для линейного режима и режима с делением заряда показана зависимость коэффициента время накопления — выходное напряжение от температуры фонового излучения. С помощью данного графика можно легко оценить уровень выходного сигнала ФПУ для различных фоновых температур и времен накопления заряда.

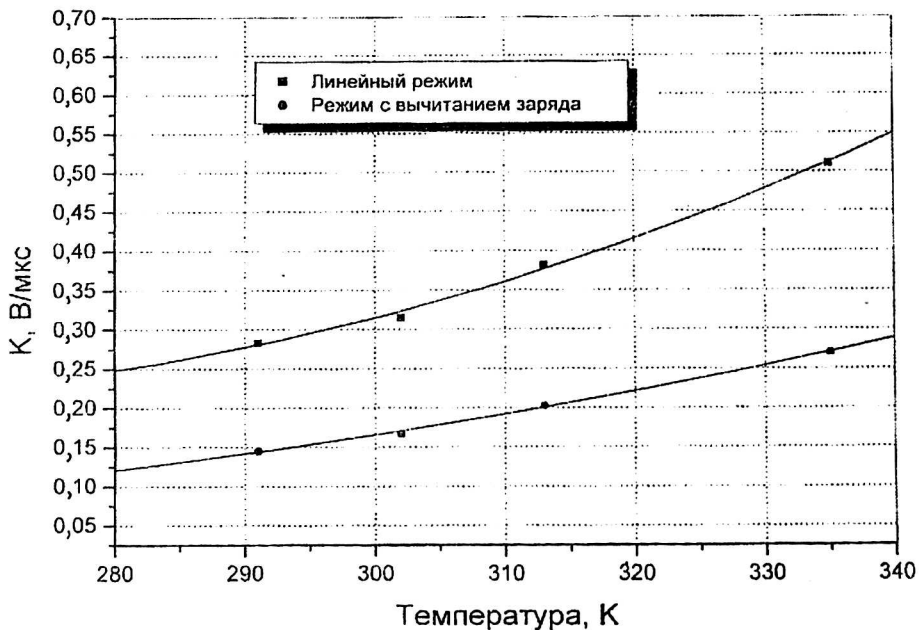


Рис. 4. Зависимость коэффициента время накопления — выходное напряжение от температуры фонового излучения (квадратичная аппроксимация)

Параметры ФПУ

Гибридизация кремниевой схемы считывания и выращенных с помощью метода МЛЭ [3—7] КРТ фотодиодов осуществлялась с помощью технологии In-микроконтактов. Изготовлены 2x64-элементные ФПУ с красной границей фотоответа $\lambda_{со} = 10,5$ мкм и площадью одиночного фотодиода 50×50 мкм. Гибридная сборка помещалась в криостат, охлаждаемый до температуры жидкого азота с помощью холодильной машины, работающей по циклу Джоуля-Томпсона.

Основные параметры ФПУ, измеренные при температуре ~80 К

Рабочая температура, К	80
Угол зрения, град	52
Режим работы ПЗС	линейный
Время накопления заряда, мкс	8
Площадь одиночного фотодиода, мкм ²	50x50
Динамический диапазон, дБ	67
Число нерабочих элементов, %	< 5
Красная граница фотоответа $\lambda_{со}$, мкм	10,5
Тактовая частота, МГц	2
Интегральная чувствительность S_I , А/Вт	$2.9 \pm 13 \%$
Обнаружительная способность D^* , см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	$4,5 \cdot 10^{10} \pm 24 \%$
Температурный эквивалент шума	40 мК $\pm 20 \%$

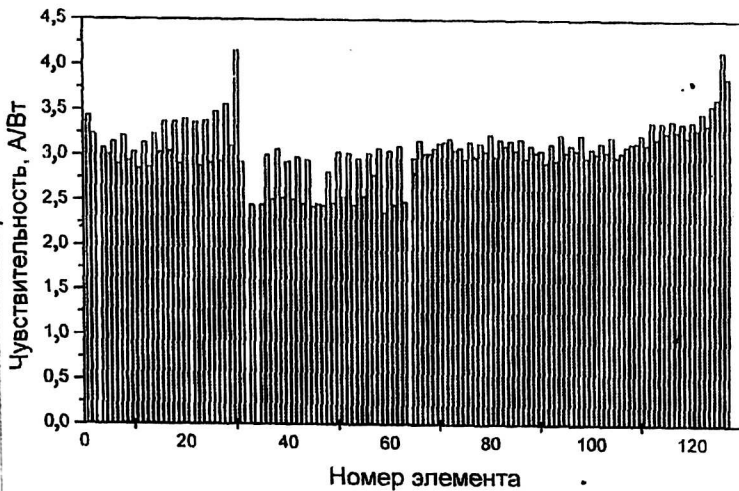


Рис. 5. Интегральная ампер-ваттная чувствительность 128 элементов ФПУ

На рис. 5 показана интегральная ампер-ваттная чувствительность для всех 128 элементов ФПУ. Можно отметить хорошую равномерность от чувствительности элементов. Измеренный температурный эквивалент шума в спектральном диапазоне (NETD) 8—10,5 мкм с углом зрения для центральных элементов фотоприемника $FOV = 52^\circ$ при температуре фонового излучения 20 °С и времени накопления заряда 8 мкс не превышал 40 мК. Неравномерность значения NETD по элементам не превышала 20 %. Число нерабочих элементов ФПУ было не более 5 %, а динамический диапазон — не хуже 67 дБ.

ФПУ позволяет регистрировать инфракрасное излучение со строчной частотой 100 кГц (128 элементов в строке). Для сканера с коэффициентом использования 0,2 это позволяет получить изображение разрешением 128×128 с частотой кадров не менее 150 Гц. На рис. 6 приведено изображение лица человека, полученное с использованием данного ФПУ, в спектральном диапазоне 8—10,5 мкм. Можно отметить удовлетворительное качество изображения без применения какой-либо коррекции.



Рис. 6. Изображение лица человека, полученное с помощью данного ФПУ, в спектральном диапазоне 8—10,5 мкм

Заключение

Разработаны, изготовлены и протестированы многоэлементные ФПУ на основе 2x64 КРТ фотодиодной линейки и кремниевой ПЗС-схемы считывания. Используя различные режимы работы ПЗС (линейный, с делением, с вычитанием заряда), ФПУ без дополнительных средств управления зарядом может работать при температуре окружающей среды как минимум $-10 \pm +50$ °С. При этом измеренное значение обнаружительной способности в угле зрения $FOV = 52^\circ$ для центральных элементов составило $4,5 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ с хорошей однородностью по элементам. ИК-изображение, полученное с помощью данного ФПУ и простой сканирующей системы, обладает хорошим качеством.

Коллектив авторов выражает глубокую благодарность Ю. Г. Сидорову и В. В. Васильеву (Институт физики полупроводников, г. Новосибирск, Россия) за предоставленные образцы фотодиодов.

Литература

1. *Reine M. B.* HgCdTe photodiodes for IR detection: A Review: Proc. SPIE, 2001. № 4288, P. 266—277.
2. *Sizov F. F., Derkach Yu. P., Kononenko Yu. G., Reva V. P.* Readout device processing electronics for linear and focal plane arrays: Ibid, 1999. № 3436. P. 942—948.
3. *Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I., Mikhailov N. N., Sidorov Yu. G.* The controlled growth of high-quality mercury cadmium telluride//Thin solid films. 1995. № 267. P. 121—124.
4. *Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I., Mikhailov N. N., Sidorov Yu. G.* Molecular beam epitaxy quality HgCdTe films control of the composition distribution//J. Cryst. Growth, 1996. № 159. P. 1161—1167.
5. *Sizov F. F., Vasil'ev V. V., Esaev D. G. et al.*//Properties of 2x64 linear HgCdTe MBE grown LWIR arrays with CCD silicon readouts: Proc. SPIE, 2001. № 4288. P. 345—353.
6. *Vasil'ev V. V., Esaev D. G., Klimenko A. G. et al.*//Focal plane arrays based on HgCdTe epitaxial layers MBE-grown on GaAs substrates: Proc. SPIE, 1997, № 3061, P. 956—962.
7. *Sizov F. F., Vasil'ev V. V., Esaev D. G. et al.*//Properties of 2x64 linear HgCdTe molecular beam epitaxy grown long wavelength infra-red arrays with charged coupled devices silicon readouts: Sensors and Materials, 2000. № 12. P. 435—444.

Photoelectric parameters for multielement photodetector based on 2x64 MCT photodiode array with CCD readouts

A. G. Golenkov, V. P. Reva, F. F. Sizov, V. V. Zabudsky
Institute of Semiconductor Physics, Kiev, Ukraine

Photoelectric parameters of long infrared (8—10.5 μm) region multielement photodetector based on 2x64 MCT photodiode array and CCD silicon readout devices have been tested. The FPA output signals in different CCD operating mode under different temperatures (−10±+50 °C) of background radiation have been analyzed. Tested performance characteristics includes the measurements of detectivity D^ , noise equivalent temperature difference NETD, cut-off wavelength and some other parameters of the arrays. Photo obtained with this FPA in the spectral region of 8—10.5 μm demonstrate a good picture quality.*