

МФПУ смотрящего типа с накоплением в ячейке на основе ЭС КРТ для спектрального диапазона 3—5 мкм

К. О. Болтарь, Н. И. Яковлева, И. Д. Бурлаков, Е. А. Климанов, Л. Д. Сагинов,
В. М. Юнгерман, В. С. Рудневский, В. В. Акимов

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — Государственный научный центр РФ,
Москва, Россия

Исследовано матричное фотоприемное устройство (МФПУ) формата 128×128 элементов для спектрального диапазона 3—5 мкм на основе фотодиодов в эпитаксиальных слоях соединения кадмий—ртуть—теллур (КРТ) с накоплением сигнала в ячейке каждого элемента. Шаг фоточувствительных элементов составляет 50 мкм. МФПУ работает с кадровой частотой 50 Гц как в режиме накопления сигнала в нескольких строках МФПУ (от 2 до 128 строк) со считыванием сигнала, так и в режиме snap-shot с накоплением в течение времени кадрового синхроимпульса длительностью до 4 мс. Для МФПУ с граничной длиной волны 5,7 мкм максимальное время накопления без переполнения накопительных конденсаторов составляет 400 мкс и 2 мс — для МФПУ с граничной длиной волны 4,4 мкм.

Высокие фотоэлектрические параметры делают МФПУ на основе фотодиодов в эпитаксиальных слоях (ЭС) КРТ спектрального диапазона 3—5 мкм приемлемой альтернативой МФПУ, изготовленных на основе InSb. Накопление фототоков и мультиплексирование сигналов чувствительных элементов в два выходных канала осуществляются в холодной зоне МФПУ при помощи кремниевой ИС с кадровым накоплением.

Схемы, интегрирующие входные токи, располагаются в каждой входной ячейке матрицы фотодиодов МФПУ. Помимо накопительного конденсатора, в каждой ячейке содержатся элементы, обеспечивающие контроль рабочей точки соответствующего ФЧЭ, а также элементы коммутации для последующего мультиплексирования накопленных сигналов.

Режимы работы МФПУ

МФПУ работает с кадровой частотой 50 Гц как в режиме накопления сигнала в нескольких строках МФПУ (от 2 до 128 строк) со считыванием сигнала, так и в режиме snap-shot с накоплением в течение времени кадрового синхроимпульса длительностью до 4 мс.

Рассмотрим возможность реализации накопления в ячейке кремниевой БИС для МФПУ спектрального диапазона 3—5 мкм. При шаге МФПУ 35 мкм, граничной длине волны по уровню 0,5 $\lambda_{0,5} = 5$ мкм, угловой апертуре охлаждаемой диафрагмы 60° и температуре фона 300 К величина тока фотодиода составит $I_0 = 2$ нА. Накопительная емкость в ячейке размером 35 мкм при коэффициенте заполнения 60 % и толщине диэлектрика 0,04 мкм составит $C_{ac} =$

= 1 пФ. Максимальное время накопления T_{ac} определяется выражением $T_{ac} = \frac{UC_{ac}}{I_0}$ и при напряжении заряда $U = 5$ В составит $T_{ac} = 2,5$ мс. Это значение T_{ac} существенно больше времени одной строки 64 мкс и сравнимо со временем кадровой частоты МФПУ (время полукадра стандартного телевизионного сигнала 20 мс), поэтому накопление в ячейке для диапазона 3—5 мкм целесообразно.

Возможны следующие режимы работы МФПУ.

- Кадровая частота МФПУ больше частоты вывода на экран. Дополнительные кадры суммируются и усредняются в цифровой электронике обработки изображения.

- Время накопления составляет часть кадра. Режим одновременного включения/выключения накопления фотодиодов (snap-shot).

- Время накопления составляет часть кадра. Режим последовательного включения/выключения накопления фотодиодов с регулируемым временем накопления 2, 4, 6 ... N строк.

В спектральном диапазоне 8—12 мкм ток фотодиодов увеличивается до 100—300 нА, максимально возможное время накопления становится сравнимым с временем телевизионной строки 64 мкс и преимущество покадрового накопления перед построчным пропадает. Ряд передовых зарубежных фирм выпускает МФПУ с покадровым накоплением с граничной длиной волны 9—10 мкм [1—3] для работы с повышенной кадровой частотой или уменьшенным углом апертурной диафрагмы. В ИФП СО РАН [4] разработаны МФПУ с граничной длиной волны до 7—8 мкм с покадровым накоплением.

Схема накопления и считывания сигнала

В ФГУП «НПО "Орион"» разработаны и изготовлены кремниевые интегральные схемы считывания с электроникой накопления в ячейке и мультилиплицирования сигналов формата 128×128 элементов с шагом ФЧЭ 50 мкм представлена на рис. 1.



Рис. 1. Кристалл БИС считывания 128×128 с накоплением в ячейке (структурная схема)

Кремниевая БИС может быть структурно разделена на несколько взаимосвязанных узлов: матрица ячеек накопления формата 128×128 ; секция считывания 64×2 ; регистр управления 128; регистр считывания 128.

Для уменьшения тактовой частоты выходных сигналов выходной мультилиплицированный сигнал разбит на два выхода А и В.

В многочисленных публикациях [1–3] имеется большое количество вариантов схем накопления заряда в ячейке кремниевой БИС.

Простейшая схема содержит один конденсатор накопления C_{ac} , два МОП-транзистора, один из которых (T1) усилительный, другой (T2) подключает/отключает выход ячейки накопления к шине считывания, и три шины: считывания, управления и напряжения смещения усилительного транзистора (рис. 2). Эта схема имеет ряд недостатков:

при считывании заряд конденсатора накопления суммируется с зарядом шины считывания. Поскольку емкость шины считывания, как правило, больше емкости конденсатора накопления, то коэффициент передачи накопленного напряжения на выход БИС существенно меньше единицы, и имеется дополнительный шум за счет зарядов шины считывания;

зарядка конденсаторов накопления осуществляется не одновременно, а построчно с циклическим сдвигом номера заряжаемой строки, что не позволяет осуществить режим одновременного накопления всеми ячейками МФПУ (snapshot).

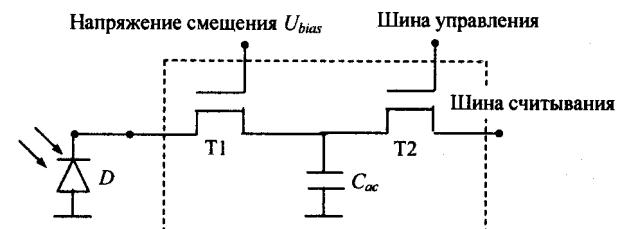


Рис. 2. Электрическая схема ячейки накопления кремниевой БИС считывания

Существенно увеличить время накопления позволяет схема с вычитанием части тока фотодиода. Эта схема содержит на один комплементарный МОП-транзистор и на одну шину больше в каждой ячейке. Для компенсации части фототока требуются повышенная однородность токов фотодиодов и внешняя цепь измерения величины компенсационного тока. Также представляют интерес ввод в ячейку цепи контроля дефектности элементов ячейки на этапе тестирования БИС (требуются один дополнительный МОП-транзистор и шина) [5].

В нашем случае реализована простейшая надежная схема накопления в ячейке. Схема может работать в двух режимах, обеспечивающих регулировку длительности времени накопления.

В первом из них входные транзисторы ячеек постоянно открыты, постоянное напряжение на их затворах задает рабочую точку фотодиодов, а время накопления определяется временным сдвигом между импульсами запуска регистров запуска и считывания. При этом область матрицы, в которой производится обработка входных сигналов, представляет собой полосу, ограниченную строками, в которых действуют импульсы запуска и считывания. Эта область смещается в направлении сканирования подобно экспонируемой области фотопленки в аппаратах с щелевым затвором.

Во втором режиме затворы входных транзисторов управляются еще одним внешним импульсным сигналом, его длительность и определяет время накопления, при этом сдвиг импульса считывания по отношению к импульсу выборки устанавливается максимальным, и всю эту часть времени между этими импульсами, в течение которого входной транзистор закрыт, ячейка находится в состоянии хранения. Здесь обработка фотосигнала происходит одновременно во всех ячейках матрицы, т. е. в ФПУ осуществляется "моментальный" снимок изображения (snapshot).

Изготовление и исследование МФПУ

МФПУ формата 128×128 элементов спектрального диапазона 3–5 мкм на основе КРТ с накоплением в ячейке изготавлялось по стандартной технологии, разработанной в ФГУП «НПО «Орион». Фоточувствительные элементы МФПУ изготавливались на основе фотодиодов в эпитаксиальных слоях соединения кадмий–рутуть–теллур (КРТ), выращенных методом жидкокристаллической эпитаксии (ЖКЭ) на подложках CdZnTe. Шаг фоточувствительных элементов составлял 50 мкм. Приведенная на рис. 3 ВАХ фотодиода МФПУ с граничной длиной волны $\lambda_{0,5} = 4,7$ мкм и угловой апертурой охлаждаемой диафрагмы 60° показывает высокое качество $p-n$ -перехода, что позволяет работать при больших обратных смещениях. Ток в рабочей точке составляет $\sim 2,0$ нА. Накопительные конденсаторы в каждой ячейке МФПУ имеют емкость ~ 1 пФ.

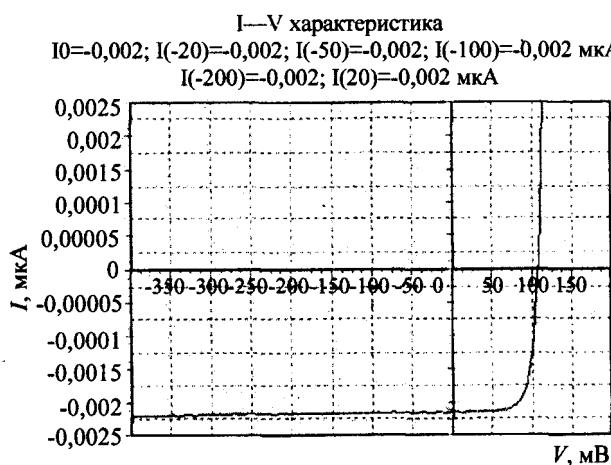


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика фотодиода

МФПУ формата 128×128 помещалось в охлаждаемый криостат. Охлаждение осуществлялось при помощи заливки жидким азотом.

Реализована работа МФПУ с кадровой частотой 50 Гц как в режиме накопления сигнала в нескольких строках МФПУ (от 4 до 32 строк) длительностью 64 мкс, так и в режиме snap-shot с накоплением в течение времени кадрового синхроимпульса длительностью до 4 мс. Синхронизация периода накопления осуществляется либо от схемы управления МФПУ, либо от внешнего синхросигнала. Для МФПУ с граничной длиной волны 5,7 мкм максимальное время накопления без переполнения накопительных конденсаторов составляет 400 мкс, а для МФПУ с граничной длиной волны 4,4 мкм — 2 мс.

Проведены исследования МФПУ формата 128×128 элементов на основе КРТ при температуре $T = 80$ К, которые включали измерения распределения тока в рабочем спектральном диапазоне и исследование обнаружительной

способности D^* каждого фотодиода МФПУ, относительной спектральной чувствительности МФПУ. На рис. 4 представлена характеристика относительной спектральной чувствительности МФПУ. Граничная длина волны по уровню 0,5 составляет 4,4 мкм, длина волны максимума спектральной чувствительности — 4,0 мкм.

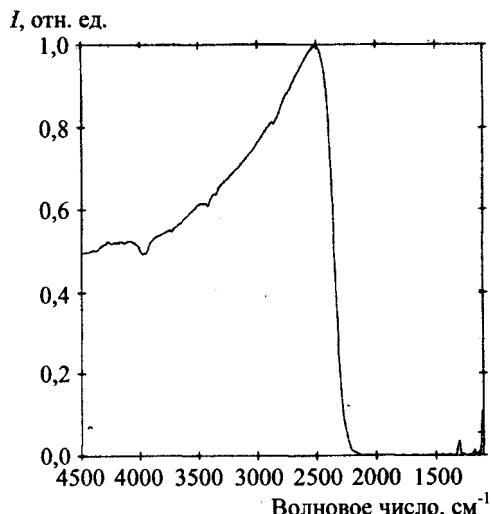


Рис. 4. Относительная спектральная чувствительность МФПУ N07

Исследования МФПУ проводились в реальном режиме времени с кадровой частотой 50 Гц, получено тепловое изображение тестового объекта (рис. 5) при времени накопления $T_{ac} = 2$ мс.

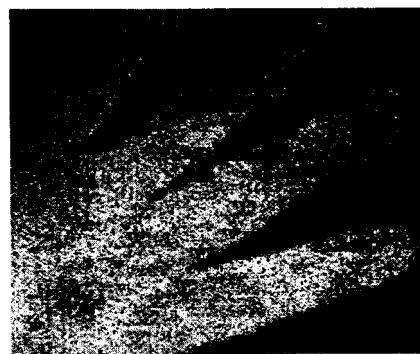


Рис. 5. Тепловое изображение тестового объекта ($T_{ac} = 2$ мс, $T = 77$ К)

При разнице температур объекта и фона 10 К, угловой апертуре ИК-объектива 60° среднее значение сигнала от объектива составляет 152 единиц счета АЦП. Среднее значение напряжения шума по МФПУ составляет 0,52 единицы счета АЦП. Из этих данных можно оценить минимально обнаружимую разницу температур $\Delta T \sim 30$ мК.

Результаты исследований МФПУ на основе фотодиодов из КРТ формата 128×128 элементов спектрального диапазона 3–5 мкм показали возможность достижения значений минимально обнаружимой разницы температур ΔT менее 30 мК.

Л и т е р а т у р а

1. 320×256 MWIR/LWIR Detector in LN₂ Pour & Fill Dewar// Проспект фирмы Sofradir, Франция, BD MM018/ BD ML018 (Preliminary).

2. Dereniak Eustace L. Infrared Arrays, SPIE's 12th Annual International Symposium on Aerosense/ Defense Sensing, Simulation, & Controls, Orlando, Florida, USA. 1998. — 67 с.

3. Breiter R., Cabanski W., Mauk K. H., Rode W., Ziegler J., Eberhardt K., Oelmaier R. Recent developments for high-performance staring modules at AIM// Part of the SPIE Conference on Infrared Detectors and Focal Plane Array V, Orlando, Florida, April, 1998. SPIE. V. 3379. P. 344—353.

4. Овсяк В. Н., Сидоров Ю. Г., Васильев В. В., Шашкин В. В. Матричные фотоприемники 128×128 на основе слоев HgCdTe и многослойных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs// Физика и техника полупроводников, 2001. Т. 35. Вып. 9. С. 1159—1165.

5. Audebert P., Giotta D., Mottin E., Rambaud P., Marion F. 640×480 MCT 3—5 μm snap-shot focal plane array// Part of the SPIE Conference on Infrared Detectors and Focal Plane Array Orlando, Florida, April, 1998. SPIE. V. 3379. P. 577—585.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

128×128 snap-shot MWIR MCT FPA

*K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, I. D. Burlakov, E. A. Klimanov, L. D. Saginov,
V. M. Youngerman, V. S. Rudnevsky, V. V. Akimov
ORION Research and Production Association, Moscow, Russia*

128×128 MWIR MCT FPA with frame integration has been developed and investigated. Photosensitive detectors were formed on the base of MCT photodiodes in epitaxial layers grown by Liquid Phase Epitaxy (LPE) on CdZnTe substrate. A pitch of photodiode structure was of 50 microns. The output circuit operates with the frame frequency of 50 Hz. The integration time synchronization is realized from external pulse. The maximum integration time in snapshot mode without storing capacitors overflow is of 400 μs for MWIR FPA with 5.7 μm cutoff and 2 ms for MWIR FPA with 4.4 μm cutoff.

УДК 621.383

Кремниевые КМОП-мультиплексоры формата 1×128 для многоэлементных фоторезисторов на основе PbS и PbSe

*И. Д. Бурлаков, А. В. Заславский, П. А. Кузнецов, Е. А. Климанов,
С. С. Хромов, С. В. Щукин*

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — Государственный научный центр РФ
Москва, Россия

Приведены результаты разработки двух вариантов кремниевых охлаждаемых КМОП-мультиплексоров формата 1×128, предназначенных для усиления и коммутации сигналов с многоэлементных фоторезисторов (ФР) на основе PbS и PbSe. Обсуждены схемотехнические особенности мультиплексоров. Приведены результаты компьютерного моделирования в программе Micro-Cap6.

В последнее время существенно расширилась область применения фотоприемных устройств (ФПУ) на основе халькогенидов свинца для ближнего и среднего ИК-диапазонов. Это объясняется целым рядом причин:

разработка новых типов оптико-электронных приборов (ОЭП), работающих в указанных диапазонах;

разработка технологических процессов, позволяющих получать многоэлементные фотоприемники (ФП) с высокой обнаружительной способностью и высоким выходом годных элементов;

развитие микроэлектронных устройств обработки фотосигнала, прежде всего твердотельных многоканальных мультиплексоров (МП или БИС считывания), расположенных в фокальной плоскости ФП.

Рассмотрим основные схемотехнические принципы построения многоканальных мультиплексоров для ФП на основе PbS и PbSe.

Выбор варианта МП определяется прежде всего исходными требованиями, предъявляемыми к ФПУ. В данной работе было необходимо реализовать два типа 128-канальных МП с основными требованиями, приведенными в таблице.