

Фотоэлектроника

УДК 621.383

Охлаждаемое многорядное матричное фотоприемное устройство формата 4×288 элементов на основе фотодиодов из КРТ

*A. M. Филачев, B. P. Пономаренко, L. D. Сагинов, B. N. Соляков,
I. D. Бурлаков, N. G. Мансветов, K. O. Болтарь, E. A. Климанов,
B. M. Акимов, B. V. Полунеев*

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

Разработано, исследовано и испытано охлаждаемое многорядное матричное фотоприемное устройство (МФПУ) формата 4×288 элементов на основе фотодиодов из КРТ спектрального диапазона 8–12 мкм. Охлаждаемый фотоприемный модуль МФПУ, размещенный в вакуумном криостатирующем корпусе, представляет собой гибридную сборку матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) и охлаждающей кремниевой большой интегральной схемы (БИС). Гибридизация МФЧЭ и чипа кремниевой БИС модуля осуществляется стыковкой с использованием индивидуальных столбчатых микроконтактов. МФЧЭ содержит восемь линеек по 144 фоточувствительных элементов (ФЧЭ), при этом четыре линейки свинуты на половину шага ФЧЭ в линейке относительно других четырех линеек (шахматное расположение каналов). При сканировании изображения в направлении, перпендикулярном линейкам, за один проход формируется информация о тепловом изображении по 288 каналам, состоящим из четырех ФЧЭ, при этом реализуется режим временной задержки и накопления (ВЗН) с суммированием сигналов от четырех ФЧЭ каждого канала МФПУ. Шаг ФЧЭ составляет 56 мкм вдоль линеек, шаг каналов МФПУ 28 мкм. Эффективный размер фоточувствительной площади ФЧЭ составляет (28±5)×(28±5) мкм. Кремниевая БИС обеспечивает считывание, интегрирование, усиление и мультиплексирование сигналов от ФЧЭ на восемь выходных шин. Для управления БИС используются четыре тактовых сигнала и четыре постоянных напряжения, два из которых регулируются и обеспечивают напряжения смещения ФЧЭ. Стабилизатор напряжений смещения в БИС обеспечивает меньшую чувствительность к пульсациям регулируемых напряжений. Вакуумный криостатируемый корпус МФПУ предназначен для стыковки с микрокриогенной сплит-системой, работающей по циклу Стирлинга.

В сканируемых системах тепловидения для обеспечения большей дальности и высокого разрешения наиболее перспективными являются МФПУ на основе КРТ фотодиодов, работающие в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). В фокальной плоскости МФПУ располагаются фотодиодная матрица из КРТ и охлаждаемая кремниевая БИС для накопления фототока, предварительного усиления и мультиплексирования сигналов. В настоящей работе представлены результаты разработки многорядных матричных фотоприемных модулей формата 4×288 на основе фотодиодов из КРТ с охлаждаемой схемой считывания и мультиплексирования сигналов для использования в тепловизионных, теплопеленгационных и других приборах, использующих режим ВЗН. Проработаны схемотехнические, физико-технологические, конст-

руктивные, материаловедческие и метрологические решения, обеспечивающие создание матричных ФПУ требуемого формата на основе фотодиодов из КРТ, охлаждаемой электроники предварительной обработки сигналов, а также методов гибридизации для создания охлаждаемого модуля МФПУ.

Для МФПУ форматов до 2×256 и 2×96 применялось техническое решение построения охлаждаемого модуля МФПУ посредством стыковки МФЧЭ и двух чипов кремниевой БИС предварительной обработки и мультиплексирования сигналов на сапфировый растя, на котором сформированы межсоединения в виде металлизированных токоведущих дорожек. Однако технологическая и конструктивная реализации предложенной структурной схемы для формата 4×288 значительно сложнее, чем для МФПУ

форматов 2×256 и 2×96 . Трудности обусловлены как удвоенной плотностью элементов кремниевой схемы считывания и мультиплексирования сигналов на единицу длины линейки, так и проблемами межсоединений. Так, для МФПУ форматов 2×256 и 2×96 между двумя стыковочными площадками с индиевыми микроконтактами проходит одна токоведущая дорожка, а в случае МФПУ формата 4×288 — три. Это требует существенного увеличения точности и разрешения фотолитографических и других технологических процессов. Кроме того, определенные трудности связаны с увеличением числа мультиплексируемых сигналов от элементов МФПУ. Они обусловлены существенным снижением процента выхода годных при увеличении длины сдвигового регистра и необходимостью повышения частоты мультиплексирования при сохранении числа выходов МФПУ. Это требует применения в схемах обработки сигналов МФПУ более дорогостоящих аналого-цифровых преобразователей и средств дальнейшей цифровой обработки сигналов. Поэтому для разрабатываемых МФПУ принято решение об увеличении числа выходов, по которым производится параллельный вывод сигналов МФПУ, до восьми. Гибридизация МФЧЭ и БИС проводится без промежуточного сапфирового растра путем стыковки чипа МФЧЭ непосредственно на чип кремниевой БИС.

Структурная схема и принцип работы охлаждаемого фотоприемного модуля МФПУ

Охлаждаемый фотоприемный узел разработанного МФПУ формата 4×288 представляет собой гибридную сборку МФЧЭ на основе фотодиодов из КРТ и кремниевой охлаждаемой БИС считывания и предварительной обработки сигналов. Сборка размещается в фокальной плоскости криостатируемого корпуса.

Структурная схема МФПУ, отражающая связь матрицы фоточувствительных элементов с чипами кремниевой схемы предварительной обработки сигналов (кремниевыми БИС считывания), приведена на рис. 1.

По каждой из восьми выходных шин матричного фотоприемника выводится параллельно информация от восьми строк по 144 элемента в каждой. В цикле опроса линейки имеются дополнительные такты, в течение которых выполняются операции переноса накопленной информации из секции накопления в секцию хранения и предварительной установки схем интегрирования фототока. Функционирование матричного фотоприемника обеспечивается внешними сигналами управления (четыре им-

пульсные последовательности, задающие режим работы сдвиговых регистров кремниевых БИС). Для питания БИС используются четыре источника постоянных напряжений, два из них служат для установки оптимальных режимов работы фотодиодов матрицы. Количество управляющих и информационных шин модуля матричного фотоприемника формата 4×288 , выводимых из холодной зоны, не превышает 30, что дает возможность разместить многоэлементный фотоприемник в малогабаритной конструкции с малыми теплопротоками.

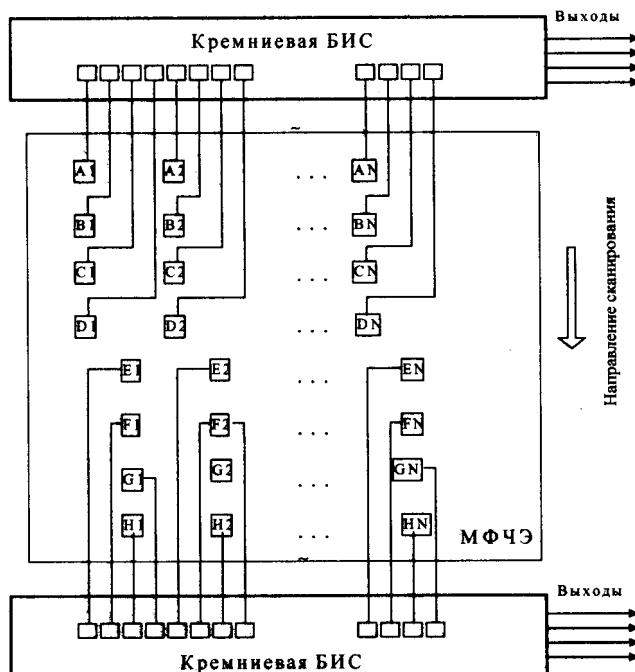


Рис. 1. Структурная схема МФПУ формата 4×288 с шахматным расположением элементов

Основные параметры МФЧЭ для МФПУ формата 4×288

Матрицы фоточувствительных элементов выполнены на основе эпитаксиальных слоев КРТ, в которых сформированы фотодиоды. Топология расположения ФЧЭ представляет собой восемь линеек по 144 отдельных ФЧЭ, при этом четыре линейки сдвинуты на половину шага относительно других четырех линеек (шахматное расположение). При сканировании изображения в перпендикулярном линейкам направлении формируются 288 строк изображения, при этом реализуется режим ВЗН с суммированием сигналов от четырех ФЧЭ. Шаг ФЧЭ составляет 56 мкм вдоль линеек и 42 мкм — поперек их. Эффективный размер отдельных ФЧЭ составляет $(28 \pm 5) \times (28 \pm 5)$ мкм.

Матричный фоточувствительный элемент представляет собой кристалл p -типа КРТ, в ко-

тором сформированы области *n*-типа, обеспечивающие создание ФЧЭ. Топология расположения фоточувствительных площадок представлена на рис. 2. По топологическим размерам разработанный МФЧЭ совместим с МФПУ формата 4×288 разработки фирмы Sofradir (Франция). Уменьшенный зазор между группами по четыре линейки снижает требование на линейность сканирования изображения в тепловизионных приборах.

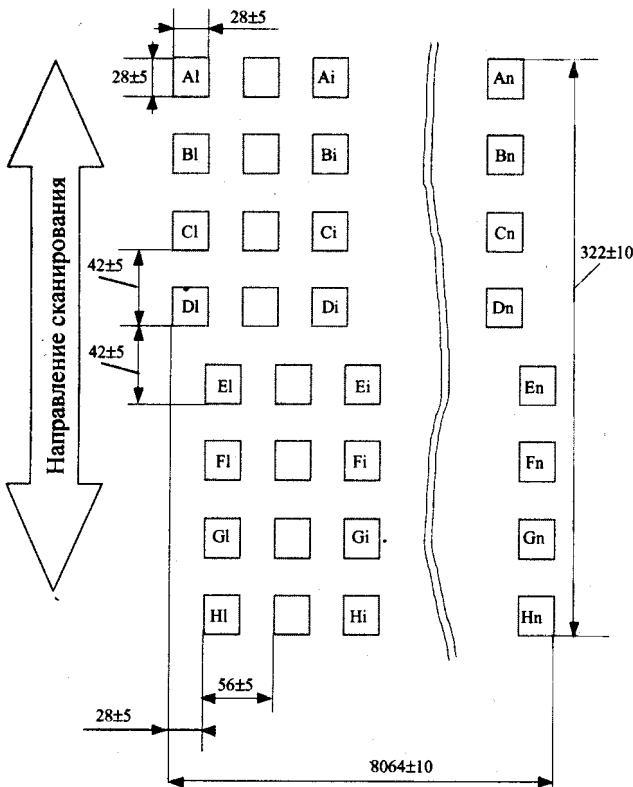


Рис. 2. Топология МФПУ формата 4×288
(размеры в мкм, $n = 144$)

Вольт-амперные характеристики

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) — один из наиболее важных и информативных параметров фотодиодов, так как из нее определяются важнейшие свойства, характеризующие качество образцов: дифференциальное сопротивление при нулевом смещении R_0 и отрицательном напряжении смещения $R_d(-U_{dis})$, величина фототока I_f и напряжение холостого хода U_{im} .

Поскольку на матрице КРТ-фотодиодов, соединенной с кремниевой БИС, измерения провести невозможно, то были предложены и реализованы два способа решения этой проблемы.

Первый способ применялся на стадии предварительного технологического отбора. С этой целью матрица фотодиодов до операциистыковки помещалась в вакуумную камеру криоген-

ной зондовой измерительной установки. Камера откачивалась до давления $\sim 10^{-2}$ мм рт. ст., после чего образец охлаждался жидким азотом до температуры 80 К. Для измерения ВАХ общий контакт припаивался к подложке КРТ, а контакт к отдельному фотодиоду матрицы осуществлялся специально разработанным зондом, изготовленным из вольфрамовой проволоки диаметром 200 мкм. Острье зонда с помощью электрохимического травления доводилось до радиуса кривизны менее 10 мкм, что позволяло осуществлять электрический контакт с элементами матрицы, имеющими размер 20 мкм.

Второй способ заключался в том, что на пластине КРТ, помимо самой матрицы, выделялась линейка тестовых элементов, которая после окончания технологических операций состыковывалась со специальным растром. Полученную структуру помещали в измерительный криостат типа "зонд", на ножки которого распайвались выводы от тестовых элементов.

Типичные параметры ВАХ тестовых фотодиодов, измеренных при температуре 77 К, следующие:

значения $R_0 \geq 300$ кОм, что обеспечивает режим работы с ограничением шума флукутациями фона (BLIP-режим);

величина дифференциального сопротивления R_d при обратном смещении 40—50 мВ составляет свыше 10 МОм. Этим обеспечивается незначительное влияние шумов схемы считывания фототока на величину шума МФПУ;

обратный ток, равный сумме темнового и фототоков, при оптимальном смещении составляет 0,2 мкА, при этом величина фототока существенно превышала величину темнового тока.

Исследование спектрального распределения фоточувствительности

Исследование спектрального распределения фоточувствительности проводится на специально разработанной для этой цели установке, выполненной на базе инфракрасного Фурье-спектрометра ИФС-113. Для ЭВМ "Аспект", входящей в состав измерительного комплекса, разработана программа, которая обеспечивает выполнение следующих функций:

регистрация фотосигнала исследуемого образца на излучение глобара спектрометра в области длин волн 1,6—20 мкм;

нахождение отношения сигналов исследуемого и эталонного фотоприемников для определения относительной спектральной характеристики фоточувствительности;

расчет методами численного интегрирования коэффициента пересчета в максимуме спек-

тральной чувствительности для АЧТ с К 300, К 500 и К 800;

вывод на экран дисплея и графопостроитель ЭВМ относительной спектральной характеристики фоточувствительности исследуемого образца, длины волны максимальной чувствительности λ_{\max} , граничной длины волны λ_b , коэффициентов пересчета К 300, К 500 и К 800.

Спектральная характеристика фоточувствительности характеризуется следующими параметрами: длинноволновая граница фоточувствительности — 10,5—11,3 мкм; коротковолновая — 6,3—7,5 мкм.

Особенность спектральной характеристики изготовленных образцов МФЧЭ — достаточно высокое значение коротковолновой границы, близкой к границе окна прозрачности атмосферы. При использовании таких ФЧЭ в тепловизионных приборах нет необходимости применения дополнительных фильтров, отрезающих коротковолновое излучение.

Размер фоточувствительной площади ФЧЭ

Измерения эффективного размера фоточувствительной площадки и фотоэлектрической взаимосвязи проводятся на специально разработанной установке с использованием тестового фотодиода, входящего в состав фотодиодной матрицы фоточувствительных элементов МФПУ. Размер светового зонда составляет около 20 мкм, при этом для повышения разрешения используется метод обратной свертки регистрируемого сигнала.

Полученные значения эффективного размера фоточувствительной площадки ФЧЭ с учетом поправок на размер светового зонда не превышали 30 мкм.

Кремниевые схемы считывания и предварительной обработки сигналов в фокальной плоскости

Кремниевая схема считывания и предварительной обработки сигналов осуществляет функцию накопления фототока одновременно от всех фоточувствительных элементов матрицы и мультиплексирование сигналов, полученных за предыдущий цикл накопления, параллельно на восемь выходных шин. БИС управляется четырьмя тактовыми сигналами, использует четыре напряжения питания, два из которых регулируются и обеспечивают подачу напряжений смещения на ФЧЭ. Стабилизатор напряжений смещения в БИС позволяет снизить требования на допустимые уровни пульсаций по регулируемым напряжениям.

Конструктивное исполнение МФПУ

Охлаждаемый фотоприемный модуль размещается в вакуумном криостатируемом корпусе, рассчитанном на стыковку с микрокриогенными системами охлаждения, работающими по циклу Стирлинга. Рабочая температура модуля 80^{-5} К. Охлаждаемая диафрагма с апертурным углом поля зрения около 30° уменьшает фоновый ток более чем в пять раз. Возможна установка диафрагм с размерами, оптимальными для различных вариантов оптических систем.

Конструкция МФПУ предусматривает выполнение в едином конструктиве электронного блока для формирования прецизионных напряжений питания МФПУ и согласования его входов и выходов с модулями аналого-цифровой обработки. В конструкции корпуса использованы элементы, экранирующие влияние внешних электромагнитных наводок на охлаждаемый узел МФПУ, тем самым достигнуто существенное снижение его чувствительности к электромагнитным наводкам.

Внешний вид МФПУ в корпусе представлен на рис. 3.

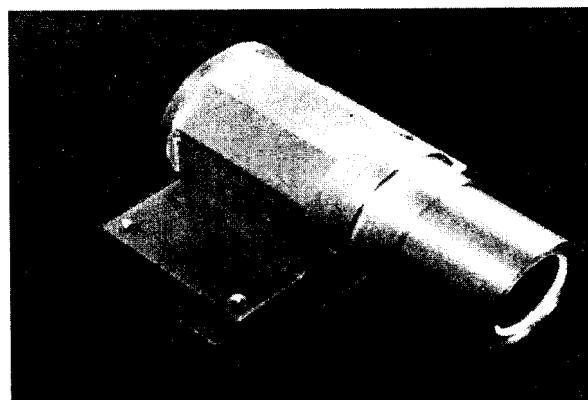
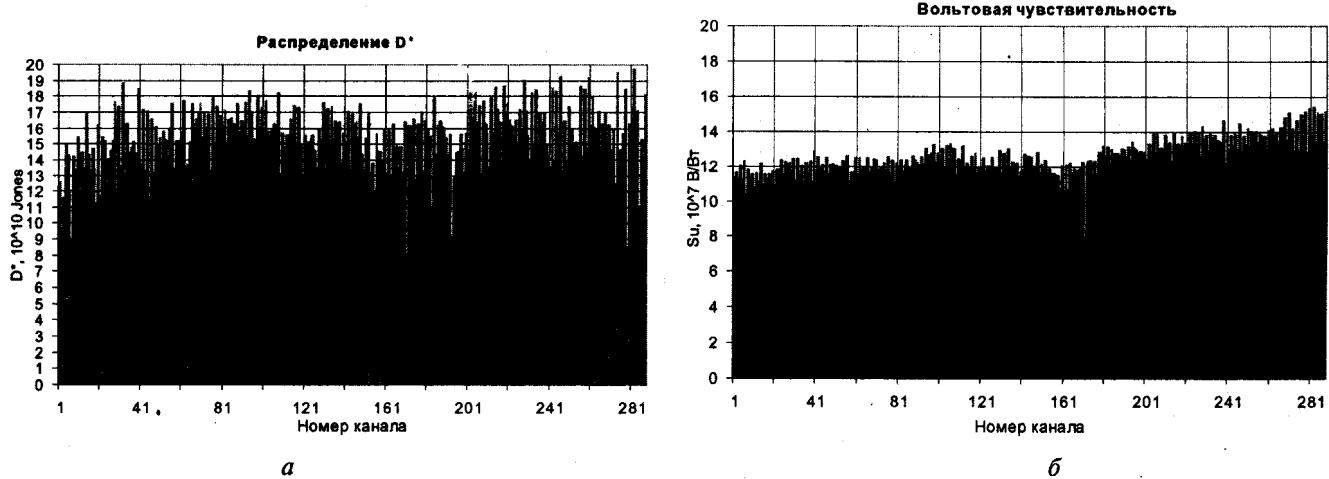


Рис. 3. Внешний вид МФПУ формата 4×288

Фотоэлектрические параметры МФПУ формата 4×288

Фотоэлектрические параметры измерялись на специализированном стенде, позволяющем формировать последовательность управляющих импульсов, обеспечивать и регулировать требуемые напряжения питания, проводить регистрацию выходных сигналов и обрабатывать их для вычисления фотоэлектрических параметров.

Основные фотоэлектрические параметры МФПУ формата 4×288 в режиме ВЗН представлены на рис. 4, а, б. Среднее значение удельной обнаружительной способности превышает 10^{11} см·Вт $^{-1}$ ·Гц $^{1/2}$, среднее значение вольтовой чувствительности — свыше 10^8 В/Вт.



Выводы

В рамках настоящей работы создан промышленный образец МФПУ формата 4×288 с параметрами на уровне лучших мировых образцов. МФПУ может применяться для создания тепло-

визионной и теплопеленгационной аппаратуры нового поколения с улучшенными техническими характеристиками по чувствительности и пространственному разрешению.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Linear LWIR 4×288 TDI FPA based on MCT photodiodes

A. M. Filachev, V. P. Ponomarenko, L. D. Saginov, V. N. Solyakov,
I. D. Burlakov, N. G. Mansvetov, K. O. Boltar, E. A. Klimanov,
V. M. Akimov, V. V. Poluneev

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The results of development, researches and tests of the 4×288 focal plane array (FPA) for a spectral range 8–12 microns are given. The cooled photosensitive module of the FPA represents hybrid assembly of a matrix photosensitive element based on mercury-cadmium-telluride (MCT) photodiodes and cooled silicon readout integrated circuit (ROIC). Connection of the MCT and ROIC is carried out by means of In bumps. Photosensitive array is based on a MCT photo diodes and composed of 288 lines (or channels) of 4 pixels. The effective sizes of each pixel is 28 per 28 μm, the pitch is 56 μm in cross scan directions and 42 μm in scan directions. Full dimensions of photosensitive area are 8064 per 322 μm. At scanning the image in a direction, perpendicular rulers for one pass 288 lines of the image are formed, thus the TDI mode with summation of signals from four photosensitive elements is realized. The chip of silicon readout circuit (ROIC) provides reading, integration, amplification and multiplexing of signals from separate photosensitive elements on eight output buses. For ROIC operation four clock signals and four voltages are needed. The stabilizer of bias voltages for photodiodes is used in the ROIC, thus the requirements for allowable levels of pulsations on adjustable voltages are low. The cooled FPA module is mounted and sealed hermetically in a specially developed dewar. Cooling is produced by using of Split-Stirling engine.