

Фотоэлектроника: элементная база и технологии

УДК 621.383.4/5:621.315.5

Фотоприемное устройство формата 6×576 элементов на спектральный диапазон 8—12 мкм

К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, А. М. Филачев, Н. И. Яковлева

Исследованы фотоэлектрические характеристики многорядного фотоприемного устройства формата 6×576 элементов на основе гетероэпитаксиальных структур полупроводникового соединения кадмий—ртуть—теллур, выращенных методами молекулярно-лучевой эпитаксии. Для кристалла матрицы формата 6×576 элементов разработана топология с уменьшенным до 14 мкм шагом, которая является наиболее приемлемой для замены изделий формата 4×288 элементов в аппаратуре применения без изменения оптической системы, сканера и блока электронной обработки. Предложенные технические решения позволяют повысить удельную обнаружительную способность до значений более $2 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$, а также улучшить разрешающую способность и поле зрения тепловизионных средств.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Ключевые слова: КРТ, гетероэпитаксиальные структуры, матрица фоточувствительных элементов, многорядное фотоприемное устройство, МФПУ, фотоэлектрические характеристики.

Введение

Современные тепловизионные и тепlopеленгационные системы круглосуточного обнаружения, распознавания, наблюдения и разведки ориентированы на использование матричных фотоприемных устройств (МФПУ) второго и третьего поколений, которые регистрируют собственное тепловое излучение объектов, его пространственное распределение и имеют высокую информативность [1]. Наиболее высокая чувствительность систем в дальнем спектральном диапазоне 8—12 мкм достигается при использовании МФПУ с фотодиодными матрицами на основе гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия—ртути (КРТ), обеспечивающих высокую квантовую эффективность [2, 3]. Особенностью фотоприемного уст-

ройства является его крупноформатность — 6×576 элементов. Увеличение числа каналов временной задержки и накопления (ВЗН) в МФПУ до 576, что соответствует числу строк стандартного телевизионного формата, позволяет упростить конструкцию оптико-механического узла, обеспечивающего сканирование изображения.

Особенностью представленного в данной работе МФПУ является то, что выбранные топологические и архитектурные решения не только позволяют реализовать все преимущества топологии и архитектуры широко распространенного в тепловых системах изделия формата 4×288 элементов [4, 5], но по разрешающей способности и обнаружительной способности превзойти характеристики изделий данного класса. Размещение МФПУ с матрицей фоточувствительных элементов (МФЧЭ) данной топологии в ВЗН-системе обработки сигнала позволяет провести замену МФПУ формата 4×288 элементов на МФПУ более высокого класса без переработки оптической системы и сканера.

Разрабатываемое фотоприемное устройство имеет перспективы развития формата кадра до 1152 строк при использовании оптической системы телевидения высокой четкости и сканера с чересстрочной разверткой.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК.
Бурлаков Игорь Дмитриевич, и. о. зам. генерального директора.
Филачев Анатолий Михайлович, генеральный директор.
Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ.
ФГУП «НПО "Орион"».
Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. (495) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 29 октября 2011 г.

© Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М., Яковлева Н. И., 2012

Конструктивные решения

В качестве исходного материала для изготовления МФЧЭ спектрального диапазона 8—12 мкм используются эпитаксиальные слои КРТ-состава $x = 0,22$, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках GaAs. Толщина этих эпитаксиальных слоев составляет от 6 до 10 мкм. Технология получения гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) КРТ методом МЛЭ разработана в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) [6, 7].

На рис. 1 представлена топология МФЧЭ формата 6×576 элементов с шагом вдоль направления сканирования 14 мкм. Преимуществами данной топологии являются:

- уменьшенные размеры фоточувствительной линейки и уменьшенные размеры охлаждаемого узла;
- выигрыш по эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) по сравнению с МФПУ формата 4×288 элементов составляет 1,7 раза.

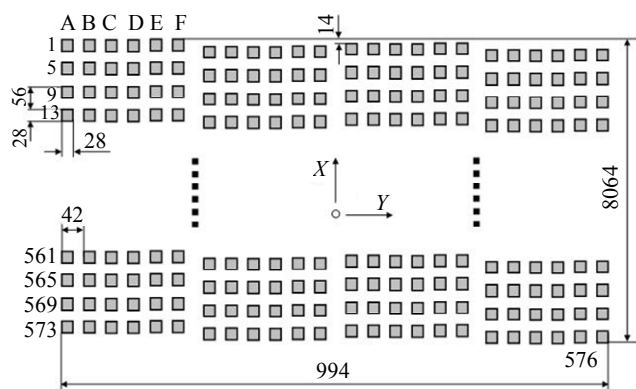


Рис. 1. Топология МФЧЭ — вариант с уменьшенным шагом

Кристалл матрицы формата 6×576 для представленной топологии с уменьшенным шагом 14 мкм имеет размеры: габаритные — 8,94×1,64 мм, фоточувствительной области — 8,064×0,994 мм. Он содержит две группы по шесть линеек, в которых расположены с шагом 0,028 мм фотодиоды. Каждый фотодиод имеет размер локальной n -области 0,02×0,02 мм. В регулярной части матрицы в центре каждой n -области вскрыты контактные окна 0,012×0,012 мм, металлизация в которых обеспечивает формирование омического контакта к каждому фотодиоду.

Кремниевая большая интегральная схема (БИС), предназначенная для считывания, предва-

рительной аналоговой обработки и вывода сигналов с матрицы фотодиодов формата 6×576 элементов располагается в фокальной плоскости МФПУ и работает при рабочей температуре охлаждения МФЧЭ ~77 К.

БИС считывания и предварительной обработки сигнала в составе МФПУ обладает всеми необходимыми функциональными возможностями и обеспечивает:

- рабочий режим КРТ фотодиодов по постоянному току;
- накопление сигналов параллельно по всем входным каналам;
- режим ВЗН в холодной зоне;
- независимое управление процессами считывания и накопления;
- усиление и параллельный вывод данных;
- локализацию и замену неработоспособных элементов в зоне криостатирования.

БИС считывания формата 6×576 элементов интегрирует фототок каждого фотодиода многоядного ИК-приемника на основе КРТ и осуществляет суммирование заряда в режиме ВЗН по шести элементам с двухнаправленным сканированием. Одной из важных функций разработанной микросхемы является деселекция дефектных элементов с коррекцией коэффициента передачи. Запись карты дефектных элементов в регистры БИС производится по шине управления БИС один раз после подачи питания через микросхемы управления, расположенные в модуле предварительной электронной обработки сигналов. Вывод выходных сигналов осуществляется с помощью восьми или четырех выходов с частотой 4 или 8 МГц, соответственно. Величина емкости интегрирования составляет 0,5; 1,0 или 1,5 пФ. Максимальное время интегрирования устанавливается равным 15 или 16,5 мкс для частоты 4 или 8 МГц, соответственно. Для ввода информации о дефектных элементах используется последовательный цифровой интерфейс. Размер ячейки считывания поперек сканирования и вдоль сканирования составляет 56 и 42 мкм, соответственно. Ячейки считывания сгруппированы в четыре блока формата 6×144 элементов со сдвигом поперек направления сканирования 14 мкм.

Основные характеристики спроектированной БИС и ее ближайшего аналога Mercury LW фирмы Sofradir приведены в таблице [5].

Основные характеристики БИС

Параметры	Разработанная БИС	Mercury LW
Формат	6×576	6×480
Шаг ФЧЭ поперек сканирования, мкм	14	25,4
Схема считывания	Прямая инжекция	Прямая инжекция
Режим интегрирования	Snapshot	Snapshot
Режим опроса	IWR	IWR
Сканирование	Двухнаправленное	Двухнаправленное
Обработка данных	ВЗН деселекция	ВЗН деселекция
Макс. зарядовая емкость, Ме	20	12,5
Макс. время интегрирования, мкс	15	20
Выходы	4, 8	4, 16
Частота считывания, МГц	8, 4	5

МФЧЭ и БИС считывания после операции гибридизации и посадки на сапфировый растр образуют охлаждаемый узел, который размещается на посадочной площадке криостатируемого корпуса. Гибридизация МФЧЭ и БИС осуществляется с помощью индиевых столбчатых контактов методом диффузионной сварки давлением, позволяющим получить надежное электрическое соединение собираемых электронных компонентов. В технологии изготовления индиевых микроконтактов малой площади используются методы проекционной фотолитографии и "сухого" травления, что позволяет получать индиевые микроконтакты малого размера 10×10 мкм и высотой 10—12 мкм.

Вакуумный криостатируемый корпус объединен в единую конструкцию с современной микрокриогенной системой охлаждения интегрального типа, обладающей необходимой холодопроизводительностью (до 0,7 Вт при +60 °С), малой потребляемой мощностью (≤ 15 Вт при низковольтном питании) и минимальными массогабаритными показателями.

Для согласования уровней сигналов и управлением МФПУ используется электронный модуль предварительной обработки (МПО) сигналов, который является составной частью устройства. Модуль предварительной электронной обработки сигналов построен на современной схмотехнической электронной элементной базе и решает задачу управления и высокоточной обработки информации.

В штатном режиме МПО обеспечивает:

формирование импульсов управления и напряжений питания МФПУ, включая управление МКС, интегрированной с МФПУ;

обработку сигналов от МФПУ;

прием аналоговых сигналов на 14-разрядные АЦП с защитой от переполнения разрядной сетки и преобразованием сигналов в цифровой код;

управление режимами работы от аппаратуры применения;

передачу в БИС считывания импульсов управления режимом замещения и локализации неработоспособных фоточувствительных элементов, номера которых определяются при настройке аппаратуры применения МФПУ.

Изготовление и исследование параметров

Матрица фоточувствительных элементов на основе КРТ формата 6×576 элементов была изготовлена по базовому технологическому маршруту ФГУП «НПО "Орион"». Базовая технология изготовления МФЧЭ на основе эпитаксиальных слоев КРТ *p*-типа проводимости, разработанная в ФГУП «НПО "Орион"», включала следующие основные операции:

контроль параметров исходных слоев;

подготовка поверхности (обезжиривание, плазмохимическая обработка, химико-динамическое травление);

нанесение диэлектрического пассивирующего покрытия;

вскрытие окон в диэлектрике в местах расположения чувствительных элементов при помощи фотолитографии и химического травления;

формирование *p-n*-переходов ионной обработкой;

вскрытие окон под общий контакт к *p*-области;

напыление на всю поверхность структуры слоя индия толщиной около 10 мкм;

изготовление при помощи фотолитографии и химического травления столбчатых контактов — индивидуальных к *n*-областям *p-n*-переходов ФЧЭ и общих к *p*-области;

нанесение антиотражающего покрытия на МФЧЭ из КРТ;

резка на отдельные МФЧЭ.

Для гибридизации с МФЧЭ была изготовлена БИС считывания формата 6×576 элементов с шагом 14 мкм. БИС считывания изготавливалась по базовому КМОП технологическому маршруту с технологией изготовления индиевых микроконтактов ионным травлением.

Фотография охлаждаемого узла, включающего МФЧЭ и БИС, приведена на рис. 2.

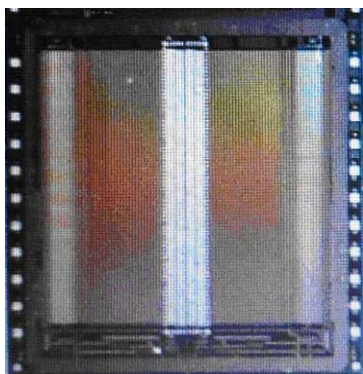


Рис. 2. Фотография охлаждаемого узла МФЧЭ и БИС

Проверка функционирования БИС формата 6×576 элементов с шагом 14 мкм проводилась на кремниевой пластине с помощью зондовой установки EM-6040A при $t = +25 \text{ }^\circ\text{C}$. Критериями годности кристалла БИС являлись:

осуществление режима двунаправленного ВЗН; возможность программирования через последовательный порт данных следующих режимов БИС: деселекция (отключение) накопительных ячеек с дефектными ФЧЭ в адресуемых каналах; компенсация разброса чувствительности каналов с коэффициентами 1,2; 1,5;

режим тестирования отдельных ФЧЭ (BYPASS); фиксация накопительных емкостей с номиналами 1,5; 1 и $0,5 \text{ пФ}$;

переключение количества информационных выходов с 8 на 4;

работа БИС на максимальной тактовой частоте $f_m = 8 \text{ МГц}$;

измерение потребляемой мощности;

проверка нагрузочной способности: C_n не более 10 пФ , R_n не менее 20 кОм при $f_m = 8 \text{ МГц}$;

Измерена спектральная характеристика фоточувствительности МФПУ. Соответствующий график зависимости T от волнового числа представлен на рис. 3.

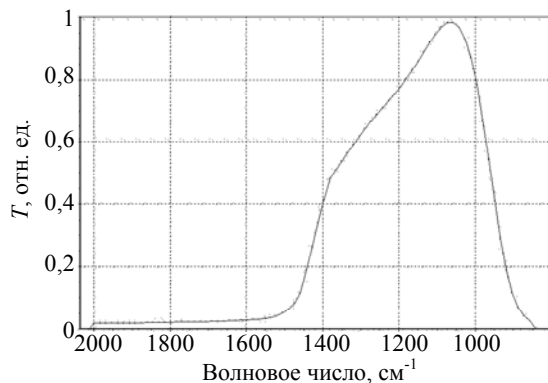


Рис. 3. Спектральная характеристика фоточувствительности МФПУ в относительных единицах

Правая граница спектральной характеристики фоточувствительности $10,54 \text{ мкм}$ была формиро-

вана выбором состава x соединения $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а левая граница $7,32 \text{ мкм}$ формировалась с помощью оптического фильтра.

Исследования МФПУ включали также измерения основных фотоэлектрических параметров.

Среднее значение D^* по недефектным каналам составило $2,36 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$. Разброс D^* относительно среднего значения составил $9,82 \%$. Среднее значение S_u по недефектным каналам составило $2 \cdot 10^8 \text{ В/Вт}$. Разброс S_u относительно среднего значения по недефектным каналам (средне-квадратичное значение) составил $3,7 \%$. Число дефектных и неработоспособных каналов — 3, годных — $99,5 \%$.

Результаты исследований МФПУ свидетельствуют о том, что выбранные конструктивные и технологические решения обеспечивают изготовление МФПУ с техническими характеристиками на уровне лучших мировых аналогов.

Заключение

В данной работе предложена и реализована концепция построения МФПУ формата 6×576 элементов с шагом 14 мкм , в которой для реализации режима ВЗН суммирование сигналов происходит в фокальной плоскости тепловизионной системы.

Отличительными особенностями данного МФПУ формата 6×576 элементов являются высокое быстродействие, уменьшение габаритов и весовых характеристик, формирование выходного сигнала в стандартном телевизионном формате, что является необходимым для использования в оптико-электронных системах формирования и обработки инфракрасных изображений со сканирующими многорядными матричными фотоприемными устройствами. Предложенные технические решения позволяют повысить удельную обнаружительную способность МФПУ до значений более $2 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$, а также улучшить разрешающую способность и поле зрения тепловизионных средств.

Литература

1. Булаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М., Дегтярев Е. В. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43.
2. Boltar K. O., Burlakov I. D., Filachev A. M., Klimanov E. A., Ponomarenko V. P., Solyakov V. N., Stafeyev V. I. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2007. V. 16. No. 4. P. 234.
3. Boltar K. O., Burlakov I. D., Ponomarenko V. P., Yakovleva N. I., Klimanov E. A., Akimov V. M. // Ibid. 2008. V. 17. No. 1. P. 9.
4. TDI 288x4 MCT LWIR IDCA, Semiconductor Devices, сайт фирмы — www.scd.co.il.

5. PLUTON LW, 288×4 HgCdTe LWIR, THE WORLDWIDE REFERENCE FOR 2-nd GEN. SCANNING SYSTEMS, data sheet, сайт фирмы Sofradir — www.sofradir.com.

6. Krishnamurthy M., Petroff P. M., Arias J. M. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 73. P. 7952.

7. Овсянко В. Н., Васильев В. В., Талинов Н. Х., Ромашко Л. Н., Козлов А. И., Марчишин И. В. Фотоприемники на основе слоев HgCdTe, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией: Сб. "Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона"/ Под ред. С. П. Сеницы. — Новосибирск: Наука, 2001.

MCT LWIR 6×576 FPA

K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, N. I. Yakovleva
Orion Research-and-Production Association,
9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Performances of MCT LWIR 6×576 FPA on the basis of molecular beam heteroepitaxial structures have been investigated. A heteroepitaxial structure for the FPA is realized in such manner that the photodiodes of 8—12 μm spectral range are formed with the pitch of 14 μm that it is fully acceptable for replacement of 4×288 FPA in infrared applications without an amendment to the constitution. Design solutions allow to increase detectivity D^ up to $2 \cdot 10^{11} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ and enhance resolution and field of view of the thermal imagers.*

Keywords: MCT, heteroepitaxial structures, FPA, photoelectrical properties.

Bibliography — 7 references.

Received October 29, 2011