

К. т. н. В. П. РЕВА, к. ф.-м. н. А. Г. ГОЛЕНКОВ,
 к. ф.-м. н. В. В. ЗАБУДСКИЙ, к. ф.-м. н. З. Ф. ЦИБРИЙ,
 С. В. КОРИНЕЦ, к. ф.-м. н. Ж. В. ГУМЕНЮК-СЫЧЕВСКАЯ,
 С. Г. БУНЧУК, М. В. АПАТСКАЯ, И. А. ЛЫСЮК, М. И. СМОЛИЙ

Украина, г. Киев, Институт микроприборов НАНУ,
 Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ
 E-mail: tsybrii@isp.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
 30.04 2010 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
 (ЦКБ «Ритм», г. Черновцы)

ТЕПЛОВИЗОР НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ИЗ 128×128 CdHgTe-ФОТОДИОДОВ

Приемник может быть использован в системах с высокой разрешающей способностью по температуре. Среднее значение температуры излучения, эквивалентной шуму, составляет 20±4 мК.

Созданию фотоприемных устройств средневолновой части (3—5 мкм) инфракрасного (ИК) диапазона спектра посвящено значительное число публикаций (см., например, [1, 2]), а также использованные в них источники). Факторами, которые благоприятствуют использованию таких ИК-приемников излучения, являются большой контраст, более благоприятные погодные условия (при увеличении содержания водяных паров в атмосфере пропускание в области 3—

5 мкм уменьшается медленнее по сравнению с областью 8—14 мкм), большая прозрачность в условиях большей влажности, большее разрешение благодаря меньшей оптической дифракции [2].

В высокочувствительных тепловизионных системах обычно используются фотоприемные модули на основе охлаждаемых гибридных линейчатых или матричных инфракрасных фотоприемников (ФП). Одни из наиболее применяемых — это ФП на основе гибридных сборок из диодных фоточувствительных элементов, изготовленных из эпитаксиальных структур теллурида кадмия и ртути (КРТ), соединенных через индиевые столбики с кремниевыми приборами с зарядовой связью или КМОП-мультиплексорами. Такие ИК ФП для средневолновой части спектрального ИК-диапазона обеспечивают максимальную температурную чувствительность по сравнению с другими ИК-фотоприемниками [2, с. 239], поэтому разработка тепловизионного приемника на их основе является практически важной и актуальной задачей.

Авторы выражают благодарность за сотрудничество коллегам из Института физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск, Россия) Ю. Г. Сидорову, С. А. Дворецкому, Н. Н. Михайлову.

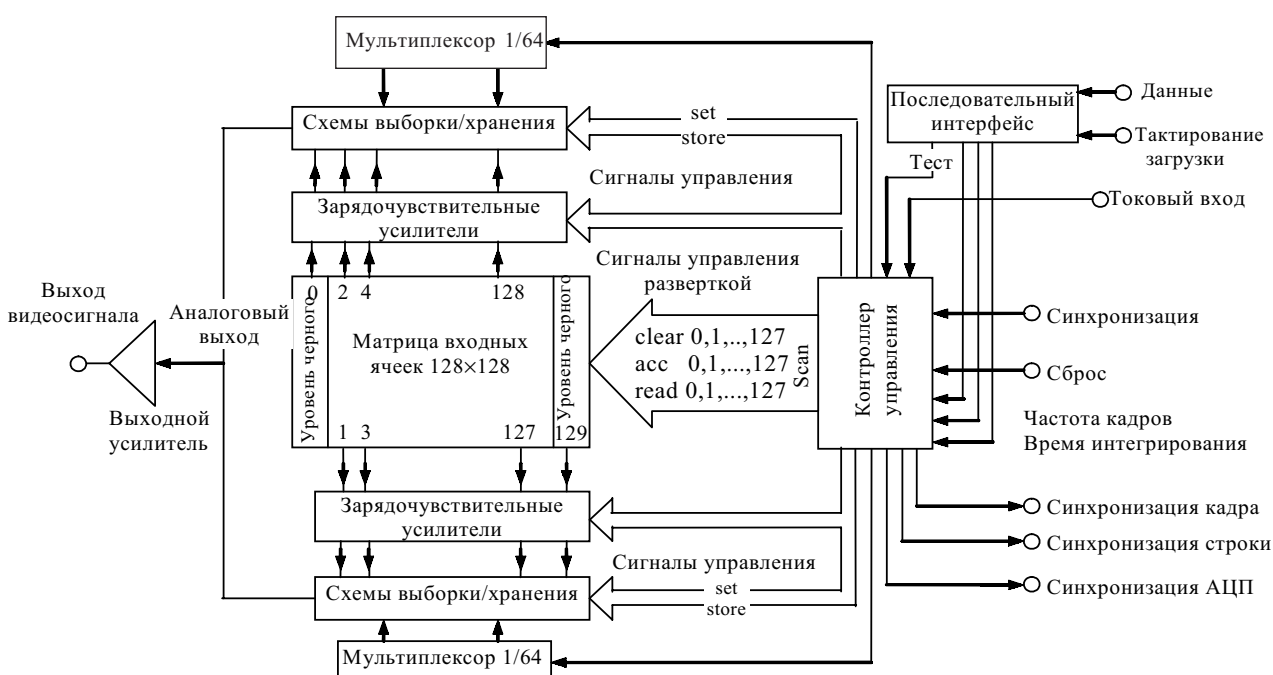


Рис. 1. Структура схемы считывания формата 128×128

Матричная схема считывания формата 128×128

Предварительная разработка такой схемы была осуществлена в [3]. Модификация ее архитектуры проводилась исходя из необходимости получения оптимальных энергетических характеристик (минимального тока потребления и минимального количества выводов из криостата) и упрощения интерфейса управления схемой считывания. Для этой цели использовались один аналоговый выход, двухпроводной асинхронный последовательный интерфейс управления ИС, а все сигналы синхронизации формировались на кристалле. Структура схемы считывания представлена на **рис. 1**, основные параметры — в **таблице**.

Накопительная емкость, пКл	1,78
Динамический диапазон, дБ	≥ 76
Максимальный выходной сигнал, В	≥ 3,0
Шум, мкВ	≤ 300
Напряжение питания, В	+5
Частота вывода информации, МГц	5
Нелинейность выходной характеристики, %	≤ 1
Потребляемая мощность, мВт	≤ 70

С помощью последовательного интерфейса можно задавать частоту кадров 200, 100, 50 или 25 Гц, время накопления (интегрирования) составляет от 11 до 1035 мкс, тип режима — рабочий/тестовый. Для тестирования микросхемы без подключения матрицы фотодиодов предусмотрен токовый вход. Для задания уровня «черного» предусмотрены два столбца темновых ячеек, к которым фотодиоды не подключают-

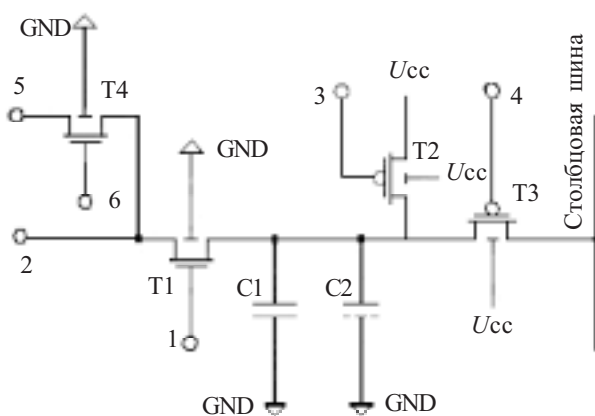


Рис. 2. Входная ячейка схемы считывания:

T1 — *n*-канальный транзистор прямой инжекции; T2 — *p*-канальный транзистор сброса; T3 — *p*-канальный транзистор выборки; T4 — *n*-канальный тестирующий транзистор; 1 — напряжение прямой инжекции; 2 — площадка подключения ИК-фотодиода; 3 — импульс сброса; 4 — импульс выборки строки; 5 — тестирующий токовый вход; 6 — импульс выборки строки в тестовом режиме

ся. Этот уровень может задаваться внешним потенциальным сигналом. В тестовом режиме предусмотрен режим опроса одной строки. В качестве входной ячейки использована схема прямой инжекции (**рис. 2**).

Для изготовления матричной схемы считывания была использована 1,0 мкм КМОП-технология с двумя уровнями металла и двумя уровнями поликремния. В процессе производства использовались пластины кремния толщиной 150 мм ориентации <100> с удельным сопротивлением 12 Ом·см. Толщина подзатворного и межслойного оксида составляла соответственно 400 и 900 Å при удельной емкости 8,65·10⁻⁴ и 3,8·10⁻⁴ пФ/мкм². В качестве транзистора прямой инжекции использовался *n*-канальный транзистор с подлегированием с пороговым напряжением порядка 0,7 В и увеличенной до 2,4 мкм длиной канала. Это позволяет получать разброс значений напряжения смещения на диодах не более 10 мВ. Элементная база схемы — КМОП-транзисторы и конденсаторы с обкладками из поликристаллического кремния в двух уровнях.

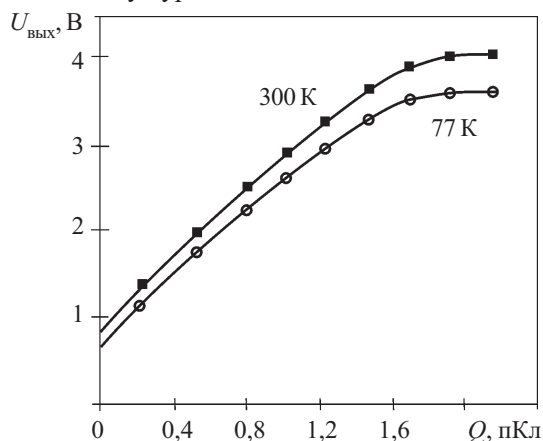


Рис. 3. Передаточная характеристика схемы считывания при различной температуре

Специально проведенные работы по оптимизации схемотехнических решений позволили увеличить величину накопительной емкости. На **рис. 3** представлена передаточная характеристика схемы считывания (зависимость выходного $U_{\text{вых}}$ напряжения от входного заряда Q), измеренная в тестовом режиме без подключения ИК-фотодиодов.

Изготовление матрицы фотодиодов

Для разработки и изготовления матриц фотодиодов среднего ИК-диапазона используются, в основном, гетероэпитаксиальные структуры теллуридов кадмия и ртути, которые выращиваются методами жидкофазной и молекулярно-лучевой эпитаксии [1, 2, 4].

Матрицы фотоприемников изготавливались с помощью микроэлектронной технологии по пяти фотошаблонам. Разработка топологии фотошаблонов проводилась постепенно, с учетом ограничений приборов для создания шаблонов и ограничений, которые накладываются особенностями исходного материала. Сформированная матрица фоточувствительных элементов представляет собой эпитаксиальную пленку CdHgTe размером 7,4×7,5 мм и состоит из 128×128

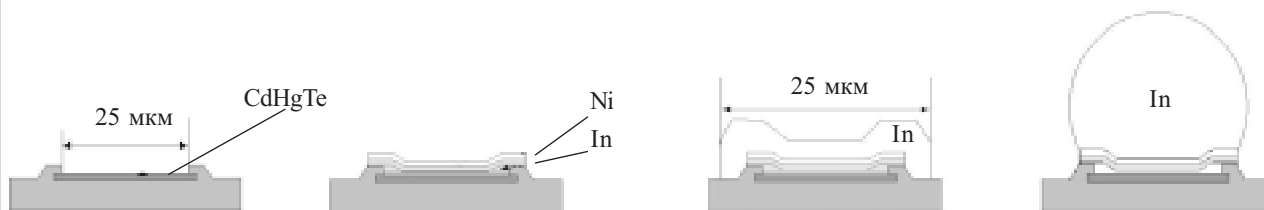


Рис. 4. Схема технологического процесса формирования индиевого контакта в виде шарика

фотодиодов. Расположение диодов и расстояние между ними согласовано с расположением соответствующих контактных площадок для In-столбиков на схеме считывания, на которой монтируется кристалл фотоприемника.

Для создания *p-n*-переходов в узкощелевом полупроводнике CdHgTe использовалось легирование ионами В⁺ на импланторе „Везувий-5“. Использовался ионный источник с разрядом Пеннинга с холодным катодом и осевой экстракцией пучка, который часто применяется в установках имплантации малых доз. Как правило, рабочее вещество подается к такому источнику в виде газа или пара. Источник позволяет быстро заменять мишени, которые распыляются; изменение интенсивности ионного пучка осуществляется за счет мощности газового разряда и напуска газа.

Для формирования многоэлементной системы контактов была использована трехслойная металлизация на основе металлов индия и никеля с различной толщиной слоев. Промежуточный слой никеля придает контактам необходимую механическую прочность и стабильность, а слой индия обеспечивают пластичность и упругость. Слои наносились методом термического напыления в вакууме и методом магнетронного распыления. Последний слой индия толщиной 3—4 мкм обрабатывался термически без доступа воздуха. В результате были получены контакты в виде шариков высотой 8—10 мкм (рис. 4, 5), поскольку индиевые контакты должны выступать над поверхностью кристалла из-за развитого рельефа микросхемы.

С целью формирования ФП-устройств с учетом требований к получению надежной гибридной сборки было проведено прецизионное совмещение фотоди-

одной матрицы на основе CdHgTe с кремниевой схемой считывания на установке „Гибрид“. Микросборка двух кристаллов является процессом холодной сварки (без нагрева обеих чипов). Установка позволяет разместить два кристалла параллельно один над другим, сориентировать кристаллы в соответствии с топологией схемы и провести холодную сварку индиевых шариков, сформированных на обоих кристаллах, с помощью специально подобранной величины механической нагрузки.

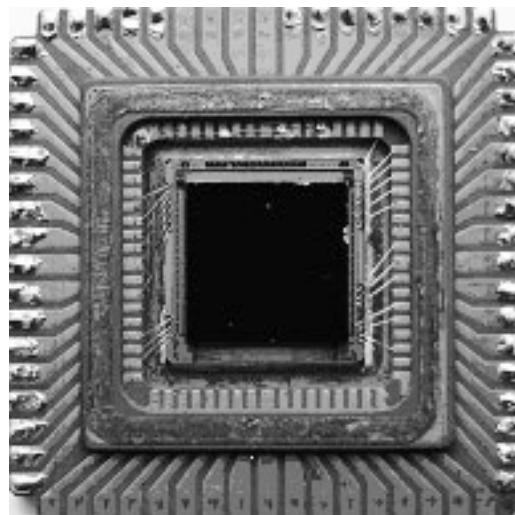


Рис. 6. Матрица, сгибридизированная со схемой считывания и вмонтированная в корпус

На рис. 6 показана фотография матрицы КРТ формата 128×128, сгибридизированной с кремниевой схемой считывания в корпус, который устанавливается в криостат.

Оптимизация токовых характеристик ИК-фотодиодов

Электрические параметры изготовленных фотодиодов контролировались с помощью вольт-амперных характеристик (ВАХ), полученных на стенде, предназначенном для автоматизированного измерения ВАХ многоэлементных фотодетекторов микрондовым методом при температуре $T=78—300$ К [5].

На рис. 7 приведена типичная вольт-амперная характеристика фотодиода из матрицы формата 128×128, сформированной ионной имплантацией бора в эпитаксиальные слои $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \approx 0,3$). Нами использовались слои, выращенные методом молекуляр-

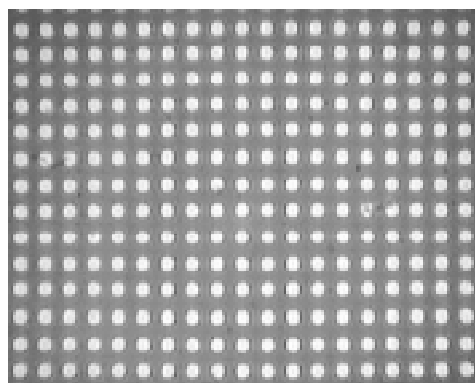


Рис. 5. Фотография фрагмента матрицы фотодиодов с индиевыми контактами

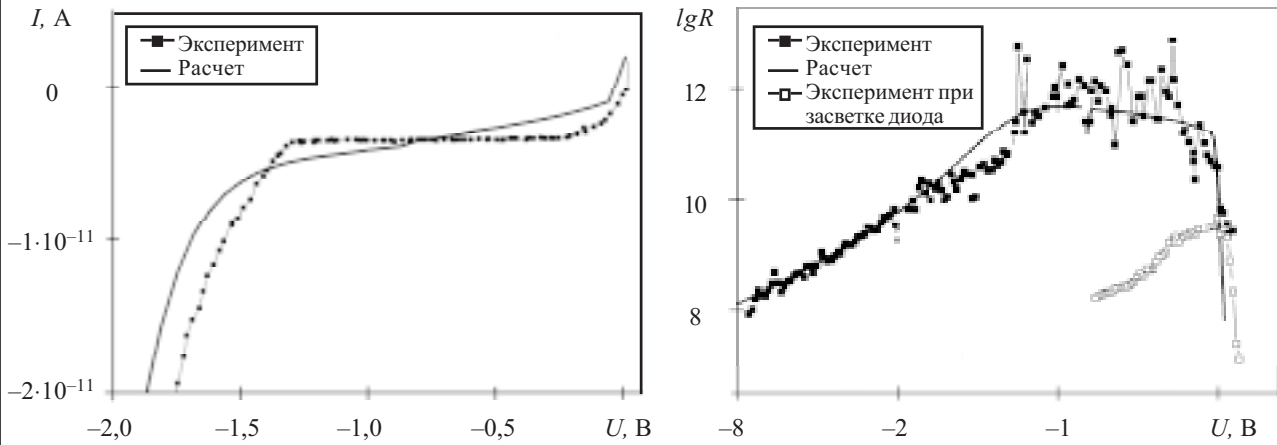


Рис. 7. Типичная темновая вольт-амперная характеристика (а) и зависимость дифференциального сопротивления R от напряжения смещения (б) для фотодиодов $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x = 0,282$, $\lambda_{co} = 5,78$ мкм при $T = 78$ К

но-лучевой эпитаксии или жидкофазной эпитаксии на монокристаллических подложках GaAs с использованием $CdZnTe$ -буфера или на монокристаллических подложках $CdZnTe$. Толщина эпитаксиальных слоев составляла 8—18 мкм, исходная концентрация дырок $N_p = (0,7—1,5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, подвижность $\mu = 400—500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Фотодиоды n^+p -типа размерами 25×25 мкм формировались методом ионной имплантации атомов бора с энергией 50—100 кэВ и дозой около $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Разработанный теоретический метод моделирования электрических параметров фотодиодов [6] позволяет проанализировать ВАХ и зависимости динамического сопротивления от напряжения на диоде с целью определения параметров структуры и дальнейшей их оптимизации. Модель тока для $Cd_xHg_{1-x}Te$ -фотодиода учитывает следующие транспортные механизмы: диффузионный ток I_{diff} , термический генерационно-рекомбинационный ток Шокли–Рида–Холла I_{SRH} и туннелирование I_{TAT} через локализованные ловушечные уровни в запрещенной зоне в $p-n$ -переходе, туннельный межзонный ток I_{BTB} , а также термический ток в квази-нейтральных областях $I_{SRHn,p}$, ток Оже I_{Au} , излучательный рекомбинационный ток I_{rad} в $p-n$ -переходе и в квазинейтральных областях. Все эти токи являются независимыми и суммируются, за исключением I_{SRH} , $I_{SRHn,p}$, I_{TAT} , поскольку их интенсивность зависит от заполнения локализованных ловушечных состояний. Токи I_{SRH} , I_{TAT} моделируются в приближении баланса носителей на ловушках [6, 7]. Предполагалось наличие локализованных ловушечных центров донорного типа в запрещенной зоне шириной E_g с энергией $E_l = (0,6—0,75)E_g$ над краем валентной зоны [8, 9].

Коротко суть метода уравнений баланса можно выразить следующим образом. Свободный носитель может быть захвачен локализованной ловушкой или эмитировать с нее термическим забросом или туннелированием. Вероятность этих процессов определяется заселенностью ловушки, ее положением в $p-n$ -переходе и приложенным напряжением. Плотность такого генерационно-рекомбинационного тока получается путем ин-

тегрирования темпов рекомбинации по координате внутри $p-n$ -перехода. Возникающие интегралы аналитически не вычисляются, поэтому делается это численно. Таким образом, учитывая известные электрофизические параметры подложки и слоев и подбирая неизвестные, можно вычислить вольт-амперные характеристики фотодиодов для различной температуры и стехиометрического состава. Основные электрофизические параметры фотодиода $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x = 0,282$), при которых рассчитывались приведенные на рис. 7 зависимости, следующие: энергия уровня ловушек $E_l = 0,73E_g$, концентрация доноров в n -слое $N_d = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация акцепторов в p -слое $N_a = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, концентрация ловушек в области $p-n$ -перехода $N_l = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, время жизни носителей $\tau_{n,p} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$.

Для полученных фотодиодов доминирующими составляющими тока являются туннелирование через ловушки I_{TAT} и термическая генерация-рекомбинация типа Шокли–Рида. При рабочих напряжениях смещения суммарная их величина составляет $(1—2) \cdot 10^{-12} \text{ А}$. Диффузионный ток вместе с остальными (Оже, радиационный, межзонного туннелирования и др.) при таких смещениях значительно меньше — $(1—1,5) \cdot 10^{-13} \text{ А}$. При увеличении напряжения смещения сумма $I_{TAT} + I_{SRH}$ возрастает сначала медленно, почти линейно, а при обратных смещениях, больших 2 В — экспоненциально за счет быстрого опустошения ловушек путем туннелирования электронов с них. При еще больших обратных смещениях (2,5 В) ток межзонного туннелирования становится доминирующим и происходит электрический пробой диодов.

Измеренные темновые токи при рабочих обратных смещениях имеют значения порядка 10 пА, а $R_0A \approx 1 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ (R_0 — сопротивление фотодиода при нулевом смещении, A — площадь фотодиода), что свидетельствует о высоком качестве исследуемых структур. Моделирование токов позволило определить микропараметры структуры и указать пути к дальнейшему улучшению технологии изготовления крупноформатных массивов фотодиодов средневолнового инфракрасного спектрального диапазона (3—5 мкм).

Характеристики тепловизионного приемника

Фотоэлектрические свойства опытного образца фотоприемного устройства измерялись с помощью регистрации шумов каждого из пикселей матрицы 128×128 и измерения фотоответа от разных потоков эталонного излучателя — абсолютно черного тела HGN DCN1000 с размером выходного отверстия 180 мм и точностью установления температуры $0,005$ К. Это позволяет определить параметр NEDT — температурную разницу, эквивалентную шуму. Для исследованного образца эта величина составляла 20 ± 10 мК, что является достаточно высоким результатом. Гистограмма распределения измеренной величины NEDT по элементам матрицы приведена на **рис. 8**.

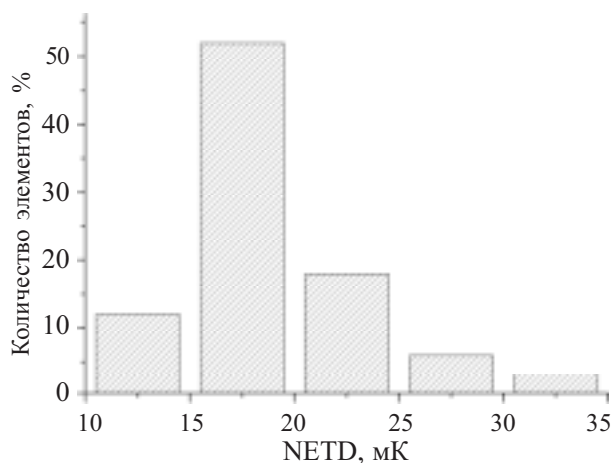


Рис. 8. Распределение величины NEDT по элементам матрицы 128×128

На **рис. 9** представлено изображение фрагмента микросхемы в спектральном диапазоне $3 - 5$ мкм, полученное с помощью разработанного макета тепловизионной камеры.

Отличительными особенностями данного тепловизионного приемника являются: низкая потребляемая мощность (менее 50 мВт), небольшое количество управляющих (5, включая питание и землю) и информационных сигналов (один видеовыход и 3 выходных импульса синхронизации), высокая частота кадров (до 200 Гц), управление режимами работы фотоприемника интегрированным в схему считывания последовательным портом, динамический диапазон более 80 дБ при максимальном уровне выходного сигнала 3 В.

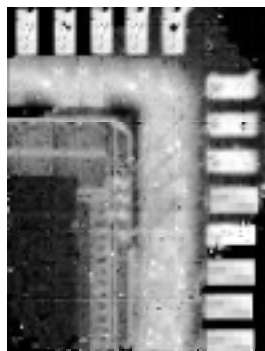


Рис. 9. Изображение фрагмента микросхемы в ИК-диапазоне (пространственное разрешение системы — 50 мкм)

Таким образом, разработанное тепловизионное устройство для средней части ($3 - 5$ мкм) спектрального ИК-диапазона на основе фотоприемного модуля, состоящего из 128×128 CdHgTe-элементов, может быть использовано в системах с высокой разрешающей способностью по температуре.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kinch. M. A. Fundamentals of infrared detector materials.— SPIE Press, Bellingham, 2007.
2. Сизов. Ф. Ф. Фотоэлектроника для систем видения в невидимых участках спектра.— Киев: Академперіодика, 2008.
3. Рева В. В., Сизов Ф. Ф. Проектирование схемы считывания для матриц ИК-фотодиодов среднего диапазона длин волн // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 6.— С. 56—60.
4. Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д. и др. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего диапазонов спектра на основе фотодиодов из $Cd_xHg_{1-x}Te$ // ФТП.— 2005.— Т.39, вып. 10.— С. 1257—1265.
5. Сизов Ф.Ф., Забудский В.В., Голенков А.Г. и др. Методика измерения темновых токов полупроводниковых многоэлементных структур при криогенных температурах // Контрольно-измерительные приборы и автоматика.— 2007.— № 1.— С. 4—7.
6. Anderson W. W., Hoffman H. J. Field ionization of deep levels in semiconductors with applications to $Hg_{1-x}Cd_xTe$ p-n junctions // J. Appl. Physics.— 1982.— V. 53, N.12.— P. 9130—9145.
7. Gumenjuk-Sichevska J. V., Sizov F. F. Currents in narrow-gap photodiodes // Semicond. Sci. Techn.— 1999.— V. 14.— P. 1124—1133.
8. Yoshino J., Morimoto J., Wada H. et al. Studies of relationship between deep levels and RA product in mesa type HgCdTe devices // Opto-Electronics Review.— 1999.— V. 7.— P. 361—367.
9. Krishnamurthy S., Berding M.A., Robinson H., Sher A. Tunneling in long-wavelength infrared HgCdTe photodiodes // Journal of Electronic Materials.— 2006.— V. 35(6)— P. 1399—1402.