

# Матричные фотоприемники $128 \times 128$ на основе слоев $\text{HgCdTe}$ и многослойных гетероструктур с квантовыми ямами $\text{GaAs/AlGaAs}$

© В.Н. Овсяк, Ю.Г. Сидоров, В.В. Васильев, В.В. Шашкин<sup>¶</sup>

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 14 февраля 2001 г. Принята к печати 15 февраля 2001 г.)

Разработана технология и изготовлены фотоприемные модули для спектральных диапазонов 3–5 и 8–12 мкм на основе гетероструктур  $\text{Ga}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te/GaAs}$  и многослойных гетероструктур с квантовыми ямами  $\text{GaAs/AlGaAs}$ , выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Фоточувствительные слои  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  выращивали на подложках  $\text{GaAs}$  с промежуточным буферным слоем  $\text{CdZnTe}$ . С целью уменьшения влияния поверхности на рекомбинационные процессы выращивались варизонные слои  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  с повышенным составом к поверхности.

Разработан и изготовлен по КМОП/ПЗС технологии кремниевый мультиплексор с кадровой частотой считывания изображения 50 Гц. Гибридная микросборка матричных фотоприемников и мультиплексора проводилась методом групповой холодной сварки на индиевых столбах с контролем процесса присоединения.

Изготовленные модули на основе слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  размером  $128 \times 128$  элементов при рабочей температуре 78 К и частоте кадров 50 Гц имели температурное расширение 0.02 и 0.032 К для модулей с границей чувствительности 6 и 8.7 мкм соответственно.

Фоточувствительные многослойные структуры с квантовыми ямами  $\text{GaAs/AlGaAs}$  изготавливали методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Показано, что разработанная технология позволяет получать многоэлементные фотоприемники размером  $128 \times 128$  элементов ( $\lambda_{\text{пик}} \approx 8$  мкм) с температурным разрешением модуля 0.021 и 0.06 К при рабочей температуре 54 и 65 К соответственно.

## 1. Введение

Для разработки и изготовления фотоприемных модулей необходимо развитие следующих базовых технологий:

— технология молекулярно-лучевой эпитаксии для выращивания слоев  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  и многослойных структур  $\text{GaAs/AlGaAs}$ ;

— технология изготовления многоэлементных фоточувствительных структур;

— технология изготовления кремниевого мультиплексора;

— технология гибридной микросборки фоточувствительных структур и мультиплексора;

— разработка оборудования и методик для тестирования и оценки параметров фотоприемных модулей.

Далее рассматриваются основные особенности этих технологий и приводятся параметры изготовленных фотоприемных модулей.

## 2. Технология молекулярно-лучевой эпитаксии для выращивания слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

Важными исходными параметрами материала для получения высокочувствительных инфракрасных (ИК) фотоприемников (ФП) являются как электрофизические параметры (концентрация основных носителей заряда и их подвижность, время жизни неосновных носителей заряда), так и структурное совершенство (минимальная

плотность дислокаций). Для  $p-n$ -перехода необходимы оптимальные концентрации носителей в соответствующих областях и высокое время жизни. Последнее, как правило, лимитируется присутствием в пленке ловушек, которые обусловлены наличием дислокаций. Особенно это важно для фотоприемников, работающих в спектральном диапазоне 8–12 мкм. Плотность дислокаций в материале для таких ИК фотоприемников не должна превышать  $10^5 \text{ см}^{-2}$ . Для приемников, работающих в диапазоне 3–5 мкм, дислокации начинают влиять на их электрофизические характеристики при плотностях более  $10^6 \text{ см}^{-2}$ .

Значительного снижения стоимости получения материала  $\text{CdHgTe}$  (КРТ) для большеформатных ИК ФП позволяет достигнуть метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при использовании так называемых "альтернативных" подложек из арсенида галлия и из кремния с промежуточным слоем  $\text{CdZnTe}$ . Преимущества метода МЛЭ при создании эпитаксиальных слоев над другими методами делают его наиболее технологичным и простым [1]. Применение аналитических средств контроля, основанных на оптоэлектронных эффектах, позволяет проводить процессы эпитаксии с контролем параметров в реальном времени. Лучшими являются оптические методы. Среди них в последнее время получил развитие метод эллипсометрии. Данный метод позволяет измерить скорость роста на начальной стадии, состав растущего слоя для сложных соединений, изменение рельефа растущей поверхности, температуру роста.

Эпитаксиальные слои КРТ на подложках  $\text{CdZnTe}$ , согласованные по параметрам кристаллических решеток, имеют высокое кристаллическое совершенство, которое

<sup>¶</sup> E-mail: shashkin@thermo.isp.nsc.ru

CdHgTe with varying gap	$x = 0.22...0.3$	$d = 0.5-1 \mu\text{m}$
Homogeneous layer of GdHgTe	$x = 0.22$	$d = 6-10 \mu\text{m}$
CdHgTe with varying gap	$x = 0.22...0.3$	$d = 0.5-1 \mu\text{m}$
Buffer layer of CdZnTe		$d = 3-4 \mu\text{m}$
GaAs substrate		$d = 300-400 \mu\text{m}$

Рис. 1. Схематическое изображение гетероструктур на основе CdHgTe, выращиваемых методом МЛЭ.

определяется в основном кристаллическим совершенством подложки. В настоящее время такие слои используются для производства матричных многоэлементных ФП с высокими фотоэлектрическими параметрами. Однако увеличение размеров фотоприемников приводит к резкому возрастанию их стоимости. Применение подложек из арсенида галлия и из кремния дает возможность выращивания эпитаксиальных слоев КРТ большой площади. Структурное совершенство таких слоев оказывается ниже, чем аналогичных на подложках CdZnTe. Тем не менее такие слои используются для создания матриц фотодиодов размером до  $256 \times 256$  элементов для диапазона длин волн 8–12 мкм и матриц большего размера (до  $1024 \times 1024$ ) для среднего ИК диапазона.

Одним из важных параметров слоев КРТ для многоэлементных ФП является однородность состава по площади. Причем для ФП, работающих в диапазоне 8–12 мкм, изменение состава не должно превышать  $\Delta x = 0.0002$  на 10 мм на пластине диаметром до 76 мм. Для выращивания однородных по толщине эпитаксиальных пленок КРТ необходимо разработать молекулярные источники с практическими неизменными молекулярными потоками в течение длительного времени и знать последующие изменения при уменьшении вещества в тиглях, чтобы можно было корректировать температуры источников для поддержания стабильных молекулярных потоков [2].

Нами разработано и изготовлено оборудование для МЛЭ с автоматизированной системой управления технологическими процессами и средствами контроля качества слоев в процессе роста (*in situ*), ориентированное на промышленное производство эпитаксиального материала КРТ на различных подложках. Установка МЛЭ представляет собой технологическую линию, построен-

ную на основе проведенных физико-химических исследований процессов эпитаксии из молекулярных пучков на подложках CdTe и GaAs [3]. Технологический модуль имеет оригинальную конструкцию и предназначен для выращивания слоев методом МЛЭ, в том числе и ртутьсодержащих. Разработанная система автоматизированного управления технологическим процессом обеспечивает прецизионное поддержание условий процесса выращивания буферных слоев на подложке GaAs и пленок КРТ. Использование автоматического эллипсометра позволяет менять состав слоя по толщине по заданной программе или поддерживать его постоянным с высокой степенью точности, корректируя температуры молекулярных источников. На рис. 1 схематически показана гетероструктура на основе слоев CdHgTe для изготовления многоэлементных фотоприемников.

### 3. Фотоприемные матрицы $128 \times 128$ на основе гетероэпитаксиальных слоев CdHgTe для среднего и дальнего инфракрасных диапазонов

Молекулярно-лучевая эпитаксия, позволяя варьировать состав слоев CdHgTe в процессе роста, является универсальным методом при создании фоточувствительных структур для инфракрасных фотоприемников. Изменение состава рабочего слоя позволяет изготавливать ФП, обладающие высокой чувствительностью в широком спектральном диапазоне. Ранее нами было показано [4], что введение широкозонных слоев на границах позволяет исключить влияние поверхностей на рекомбинацию носителей заряда и получать высокие эффективные времена жизни.

При использовании моноэлементных фотоприемных устройств на основе слоев CdHgTe, полученных методом МЛЭ, существенным параметром является последовательное сопротивление растекания по подложке. Суммарный ток от отдельных *n-p*-переходов, текущий в *p*-слое CdHgTe к базовому контакту, может достигать величины, при которой падение напряжения в слое изменяет рабочую точку (напряжение смещения) фотодиодов. В работе [5] продемонстрированы возможности метода МЛЭ для изготовления одиночных фотодиодов с низким (до 10 Ом) последовательным сопротивлением путем выращивания слоев со специальным профилем. Нами разработана технология изготовления матричных фотоприемных структур размером  $128 \times 128$  элементов с низким последовательным сопротивлением, которая обеспечивает однородный рабочий режим каждого элемента матрицы.

Фоточувствительные слои CdHgTe выращивались на подложке GaAs диаметром 76 мм с ориентацией (103) с промежуточным буферным слоем CdZnTe. Температура роста слоя CdHgTe — 180–190°C, буферного слоя — 240–300°C. Неоднородность состава по площади  $1 \text{ см}^2$

составляла не более  $\Delta x = \pm 0.002$ . Непосредственно после роста пленки имеют  $n$ -тип проводимости. После отжига при  $T = 230^\circ\text{C}$  в течение 20 ч  $n$ -тип проводимости конвертировался в  $p$ -тип. Концентрация дырок  $p$  и подвижность  $\mu_p$  в объеме пленки при  $T = 77\text{K}$  составляли  $7 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$  и  $320\text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  (для образца с  $\lambda_c = 6.0\text{ мкм}$ ) и  $1.6 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$  и  $300\text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  (для образца с  $\lambda_c = 8.7\text{ мкм}$ ).

Методом низкотемпературной планарной технологии [6] на выращенных слоях  $\text{CdHgTe}$  были изготовлены матричные фотоприемники размером  $128 \times 128$  элементов с шагом фоточувствительных элементов  $50\text{ мкм}$ . Фотодиоды сформированы ионной имплантацией бора с энергией ионов  $120\text{ КэВ}$ . Площадь  $n$ - $p$ -переходов составляла  $17 \times 17\text{ мкм}^2$ .

Перед сборкой с мультиплексором были измерены вольт-амперные характеристики и зависимости дифференциального сопротивления от напряжения смещения произвольных элементов матричных фотоприемников. Средние величины произведения  $R_0A$  элементов матричных фотоприемников составляли  $6 \cdot 10^3$  и  $22\text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  для среднего и дальнего ИК диапазона соответственно.

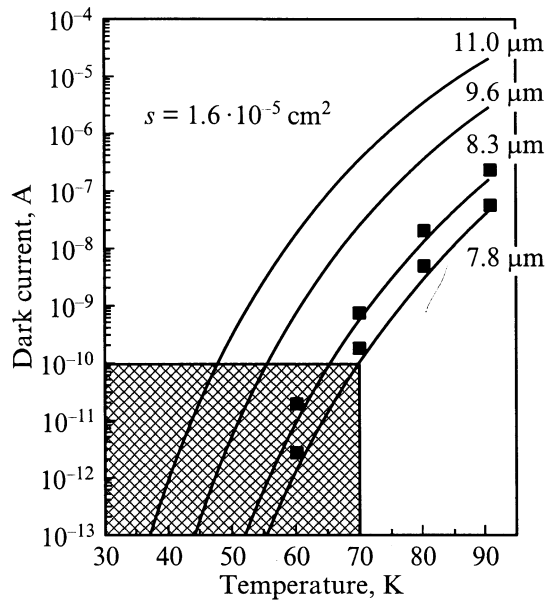
#### 4. Технология и фотоприемные матрицы $128 \times 128$ на основе многослойных структур с квантовыми ямами $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$

Фотоприемные элементы на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ)  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  представляют собой периодическую структуру из узкозонного легированного  $\text{GaAs}$  и широкозонного твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , окруженных проводящими слоями  $\text{GaAs}$ . При толщине слоев  $\text{GaAs}$  меньше или сравнимой с длиной свободного пробега электронов происходит квантование их движения в направлении оси роста и расщепление энергетических состояний в зоне проводимости  $\text{GaAs}$  на минизоны с энергией  $E_n \approx p_{\parallel}^2/2m^* + (\hbar^2\pi^2/2m^*a^2)n^2$ , где  $p$  — импульс электрона в плоскости слоев,  $m^*$  — эффективная масса,  $a$  — ширина квантовой ямы  $\text{GaAs}$ ,  $\hbar$  — постоянная Планка,  $n = 1, 2, \dots$  — целое число. Фотопроводимость в такой структуре обеспечивается оптически активными переходами, разрешенными только для поляризации света, перпендикулярной квантово-размерным слоям, между нижней заполненной минизоной и разрешенными связанными состояниями внутри ямы  $\text{GaAs}$  или несвязанными состояниями над потенциальным барьером (край зоны проводимости  $\text{AlGaAs}$ ). Параметры фотоприемника (квантовая эффективность, величина темного тока) зависят от положения уровней квантования относительно друг друга и относительно потенциального барьера, от величины тянущего электрического поля, концентрации электронов в яме  $\text{GaAs}$ , от рабочей температуры и размеров отдельного фотоприемного элемента.

Фоточувствительные структуры изготавливались молекулярно-лучевой эпитаксией (МЛЭ) на установке Riber 32P. В качестве подложек использовался полупроводящий  $\text{GaAs}$  АГЧП-10 диаметром  $2''$ . Расчетная толщина слоев  $\text{GaAs}$  и состав барьеров  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  выбирались таким образом, чтобы второй уровень в квантовой яме (КЯ)  $\text{GaAs}$  находился ниже края зоны проводимости  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на  $5$ – $15\text{ мэВ}$ . В этом случае обеспечивалось максимальное значение отношения фототока к темновому току при напряжениях смещения на структуре  $2$ – $4\text{ В}$ . Особое значение при этом имеет точность изготовления состава барьеров  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и его однородность по площади. Высокая однородность толщины слоев по площади образца в данной установке (в пределах  $(x - x_0) < 0.01$ ) достигалась за счет определения оптимального угла положения манипулятора относительно источников и оси вращения подложки во время роста. Установлено, что для оптимального углового положения оси подложки относительно молекулярных источников неоднородность толщины слоя  $\text{GaAs}$  по площади пластины не превышает  $1.5\%$ .

Специфика испарения  $\text{Al}$  предполагает однородность по площади не хуже, чем для  $\text{GaAs}$ , что и было подтверждено измерениями. Кроме того, нами также использовался описанный в литературе прием прерывания роста на стадии завершения выращивания ямы  $\text{GaAs}$  для "выглаживания" поверхности. Время выглаживания варьируется в интервале  $10$ – $30\text{ с}$ . Контроль за процессом выглаживания осуществляется путем наблюдения за интенсивностью зеркального рефлекса на картине дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Исследование различных МСКЯ, выращенных в оптимизированных условиях, методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, низкотемпературной фотолюминесценции и комбинированного рассеяния света показали, что шероховатость гетерограниц не превышает  $1$  монослоя. Толщина барьерных слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  составляла  $400$ – $500\text{ \AA}$  и была выбрана с таким расчетом, чтобы туннельная составляющая тока между основными уровнями квантования в соседних ямах была пренебрежимо мала по сравнению с термоактивационным током в диапазоне температур  $60$ – $80\text{ К}$ . Фоточувствительный слой состоял из  $50$  периодов КЯ  $\text{GaAs}$  и барьеров  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . С обеих сторон фоточувствительного слоя изготавливались проводящие контакты из  $\text{GaAs}:\text{Si}$  толщиной  $1\text{ мкм}$ . Концентрация  $\text{Si}$  в проводящих контактных слоях составляла  $2 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$ . Концентрация  $\text{Si}$  в квантово-размерных слоях  $\text{GaAs}$  выбиралась в пределах  $(4$ – $5) \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$ , что близко к оптимальной концентрации для МСКЯ фоторезисторов. Во избежание накопления примесного  $\text{Si}$  на границах раздела  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  легирование квантовых ям проводилось в центральных частях  $\text{GaAs}$  на расстоянии  $2$  монослоев от гетерограниц.

Воспроизводимость ростовых параметров МЛЭ  $\text{AlGaAs}$ , однородность, структурное совершенство слоев



**Рис. 2.** Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости темного тока фоторезисторов МСКЯ GaAs/AlGaAs с различным положением максимума фоточувствительности. Заштрихованная область — рабочий диапазон температур и токов матричного фотоприемного модуля с зарядовой емкостью  $4 \cdot 10^7$  электронов.

и точность поддержания состава  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  позволяют изготавливать структуры с заранее заданными параметрами. На рис. 2 изображены расчетные и экспериментальные зависимости темного тока в МСКЯ структурах с различной спектральной фоточувствительностью. В расчетах принималось, что в AlGaAs с  $x \approx 0.3$  электронная подвижность  $\mu_e = 2 \cdot 10^3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{с}$  и скорость насыщения  $v_s = 7 \cdot 10^7 \text{ cm}/\text{с}$ . Энергия донорного состояния в КЯ  $E_D \approx 11.6 \text{ мэВ}$ .

Матрица фотоприемников изготавливалась методами фотолитографии и представляет собой периодически расположенные меза-структуры, полученные жидкостным травлением, размером  $40 \times 40 \text{ мкм}$  и периодом  $50 \text{ мкм}$ . Нижний контактный слой GaAs:Si — общий для всех элементов [7]. Омические контакты к проводящим слоям GaAs:Si получены вжиганием Ge/Au/Ni/Au. Для того чтобы обеспечить поглощение ИК излучения в МСКЯ при нормальном падении света на матрицу фотоприемников со стороны подложки, на каждом фотоприемном элементе матрицы методами электронной и оптической литографии изготавливались двумерная дифракционная решетка в виде шахматной доски с периодом  $2.8\text{--}3.0 \text{ мкм}$ . Травление решетки осуществлялось в плазме  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  на глубину  $0.7\text{--}0.8 \text{ мкм}$ . Для гибридной сборки фотоприемной матрицы с кремниевым мультиплексом на поверхности омического контакта изготавливались In-столбы высотой  $5\text{--}7 \text{ мкм}$ .

## 5. Кремниевый мультиплексор

Были разработаны два типа кремниевых мультиплексоров. Первый — с прямым доступом к произвольным элементам фотоприемной матрицы и с внешним накоплением — использовался для детального обследования таких параметров массива элементов матрицы, как вольт-амперные характеристики, спектральная чувствительность, шумовые параметры и т.п. Однако мультиплексор может использоваться и самостоятельно для получения ИК изображения при небольшой (до 10 Гц) частоте кадров. Его преимущество — в возможности работы с фотоприемниками при высоких темновых токах (для фотоприемников с границей чувствительности более  $12 \text{ мкм}$ ) и повышенных (до 200 К) температурах.

Второй тип мультиплексора разработан и изготовлен по КМОП/ПЗС технологии с *n*-карманом. Мультиплексор используется для считывания фотосигналов с матрицы фотодиодов на CdHgTe и с матрицы фоторезисторов на МСКЯ GaAs/AlGaAs. Схема считывания позволяет регулировать время накопления при фиксированном времени кадра, что обеспечивает увеличение динамического диапазона ИК фотоприемного устройства при высоком уровне входных токов.

На рис. 3 представлена его схема. Мультиплексор состоит из матрицы  $128 \times 128$  ячеек считывания, горизонтального и вертикального регистров, схемы управления временем накопления и выходного узла. Каждая ячейка считывания мультиплексора непосредственно соединена с фотодиодом через индиевый столб и содержит входной транзистор, емкость накопления и два ключа T1 и T2, затворы которых присоединены к адресным шинам. С помощью входного транзистора устанавливается напряжение смещения на фотоприемнике ФП и считывается фототок. Фототок интегрируется на емкости ПЗС под затвором накопления. Емкость накопления составляет  $1 \text{ пФ}$ .

Минимальное время накопления равно времени считывания двух строк, максимальное — времени кадра. Режим "электронной заслонки", предусмотренный в мультиплексоре, позволяет расширить динамический диапазон входных сигналов в 64 раза по сравнению со случаем интегрирования фототока в течение всего времени кадра. Максимальный входной ток мультиплексора составляет от 0.3 до 20 нА для максимального и минимального времени накопления соответственно.

## 6. Гибридная микросборка матричных фотоприемных модулей

Сборка матричных фотоприемных модулей на основе КРТ осуществлялась методом холодной сварки под давлением индиевых микростолбов [6,7]. Кристаллы мультиплексора и фотоприемной матрицы ориентировали друг относительно друга по осям соединяемых матриц так, что отклонение от идеального совпадения краевых

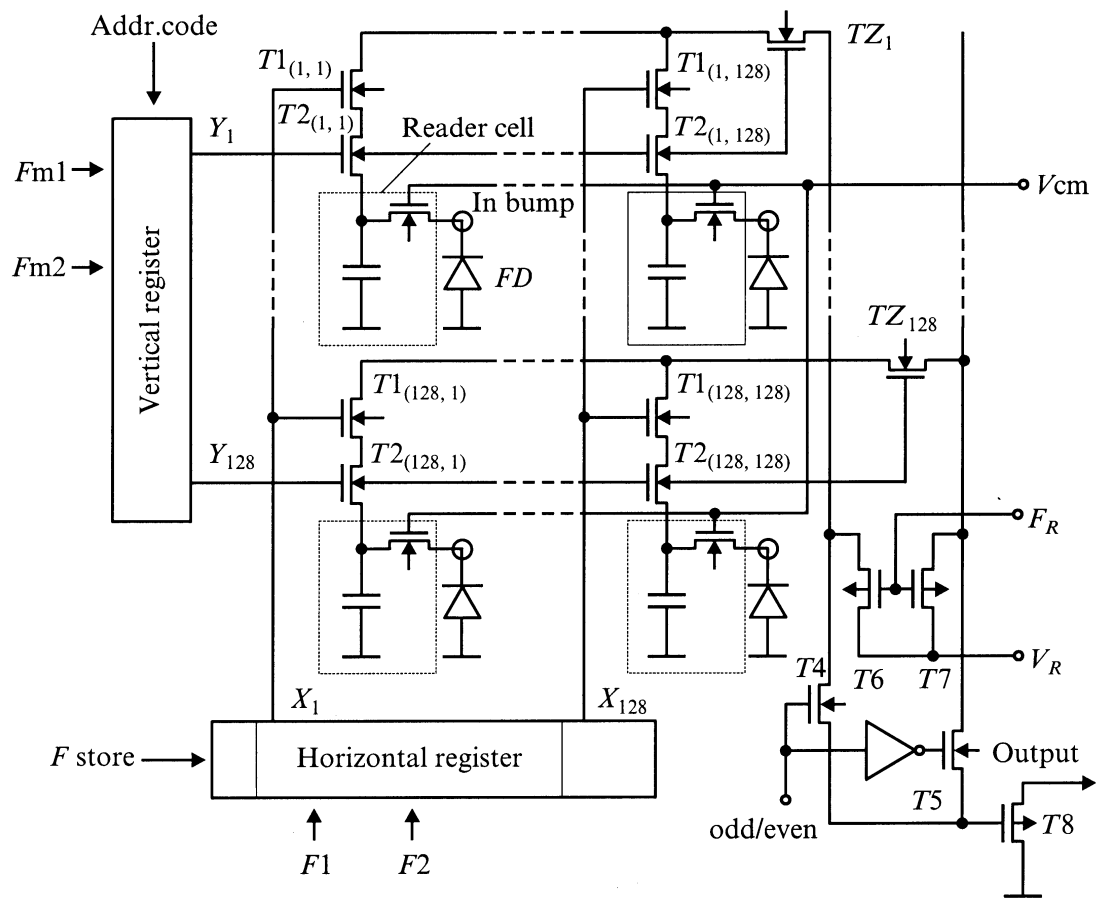
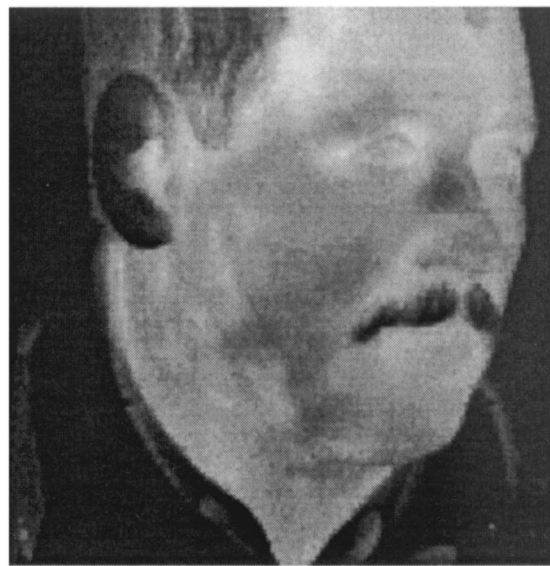


Рис. 3. Принципиальная схема кремниевого мультиплексора.



*a*



*b*

Рис. 4. Примеры теплового изображения с модулями  $128 \times 128$  на основе CdHgTe с границей чувствительности, мкм: *a* — 6, *b* — 8.7.

индиевых микростолбов было не более 2 мкм в плоскости планара ( $XY$ ), а перекося по оси  $Z$  не превосходил  $\pm 1$  мкм. В процессе сжатия кристаллов предусмотрена автопланаризация их поверхностей. К моменту завершения процесса холодной сварки планарные поверхности останавливаются на заданном расстоянии друг от друга. Боковой дрейф кристаллов в процессе сварки составляет не более 2 мкм. Максимальная предельная механическая нагрузка определяется из измеренных кривых пластического течения индиевых столбов [8], их высоты и площади. Давление, необходимое для пластического течения индиевых столбов, находится в интервале 0.3–0.9 кг/мм<sup>2</sup>. Проведенные исследования влияния вертикального давления на параметры  $n$ – $p$ -переходов в слоях CdHgTe показали, что их деградация начинается при давлении более 1.5 кг/мм<sup>2</sup> [9]. Поэтому для надежной сварки индиевых столбов при сборке модулей на основе КРТ нами используется давление не более 1.0 кг/мм<sup>2</sup>, при этом количество соединенных ячеек достигает 99.9%. Сборка модулей на МСКЯ GaAs/AlGaAs осуществлялась по аналогичной технологии, но в отличие от КРТ не наблюдалось деградации электрофизических характеристик фотоматриц при увеличении давления до 5–6 кг/мм<sup>2</sup>.

## 7. Параметры фотоприемных модулей на основе CdHgTe

Определение фотоэлектрических параметров фотоприемных модулей проводилось при рабочей температуре 78–80 К и температуре фона 293 К. Фоновый поток ограничивался охлаждаемой диафрагмой и составлял в диапазоне fotocувствительности  $4.43 \cdot 10^{15}$  и  $2.97 \cdot 10^{16}$  фот/см<sup>2</sup> · с для первого ( $\lambda_c = 6.0$  мкм) и второго ( $\lambda_c = 8.7$  мкм) модулей соответственно. Время интегрирования сигнала для первого модуля составляло около 900 мкс (накопление в течение строк при кадровой частоте 50 Гц), а для второго модуля 130 мкс. В этом случае для получения времени интегрирования менее длительности одной строки подача смещения на фотодиоды осуществлялась импульсом, длительность которого и определяла время накопления. Измерение электрического сигнала производилось быстродействующим АЦП (14 бит) с достаточно малым собственным шумом (менее 0.5 младшего разряда), что позволило свести к минимуму погрешность в определении шумов.

Основные параметры фотоприемных модулей

	6	8.7
Длинноволновая граница чувствительности, мкм		
Формат	128 × 128	128 × 128
Шаг в матрице, мкм	50	50
Частота кадров, Гц	50	50
Рабочая температура, К	78	78
Температурное разрешение, К	0.02	0.027

В таблице приведены основные параметры фотоприемных модулей на основе CdHgTe для среднего и дальнего ИК диапазона.

Примеры тепловых изображений, полученных с объективом  $F/1.6$  при частоте кадров 50 Гц, показаны на рис. 4.

## 8. Параметры фотоприемных модулей на основе многослойных структур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs

В отличие от КРТ в МСКЯ GaAs/AlGaAs основным источником избыточных токов и шумов является термоактивационный ток, что заставляет снижать рабочую температуру модуля до 45–65 К в зависимости от спектрального диапазона фотоматрицы (рис. 2). В нашем случае исследовались модули с максимумом fotocувствительности вблизи 8 мкм. Рабочая температура модуля в составе кремниевого мультиплексора, описанного выше, составляла 60–65 К. На рис. 5 представлены гистограммы распределения фототока фотоматрицы и темнового тока модуля с максимумом fotocувствительности при 8 мкм. Гистограмма темнового тока снималась в жидком азоте, чтобы минимизировать нагрев модуля управляющими токами коммутатора и обеспечить точный контроль температуры.

Неоднородность величины темновых токов по элементам матрицы мы связываем с ростовыми дефектами, природа которых и внутренняя структура пока еще недо-

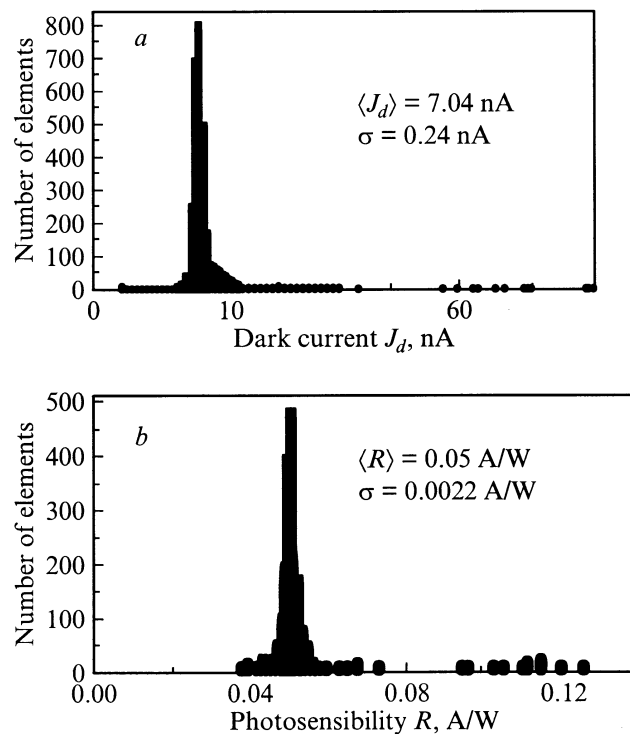
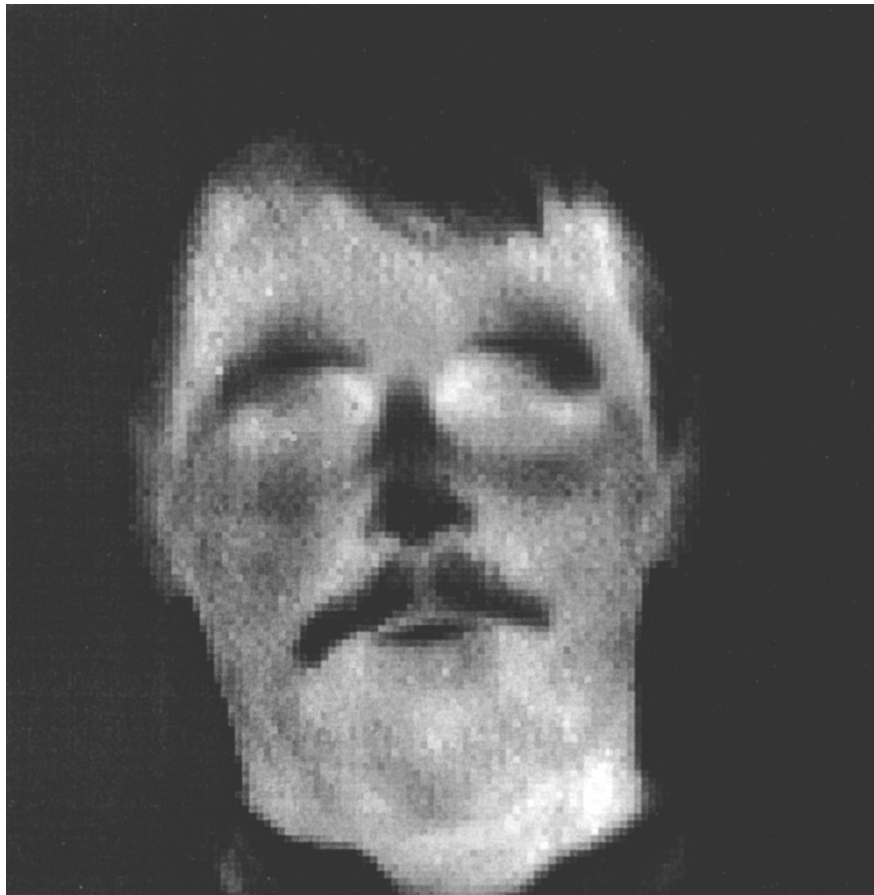


Рис. 5. Гистограммы распределения темнового тока фотоприемного модуля (а) и fotocувствительности (б) элементов матрицы на основе МСКЯ GaAs/AlGaAs форматом 128 × 128.



**Рис. 6.** Темновое изображение с матричного фотоприемного модуля на основе МСКЯ  $\text{GaAs/AlGaAs}$  форматом  $128 \times 128$ . Спектральный диапазон 7.5–8.5 мкм, частота кадров 50 Гц. Рабочая температура 65 К.

статочны, но корреляцию между числом дефектов на отдельных элементах и темновыми токами мы наблюдали на некоторых образцах. Прямой расчет показывает, что при приведенных значениях фоточувствительности температурное разрешение составляет 0.06 К при температуре 65 К.

Пример теплового изображения, полученного с объективом  $F/1.6$  при частоте кадров 50 Гц, показан на рис. 6.

## 9. Заключение

Показано, что разработанные технологии выращивания гетероструктур  $\text{CdHgTe/CdZnTe/GaAs}$  и многослойных структур с квантовыми ямами  $\text{GaAs/AlGaAs}$  методом молекулярно-лучевой эпитаксии, изготовление многоэлементных фотоприемников, изготовление кремниевого мультиплексора и гибридной микросборки позволяют изготавливать фотоприемные модули для среднего и дальнего инфракрасного диапазона с высокими фотоэлектрическими параметрами.

## Список литературы

- [1] J.M. Arias, M. Zandian, S.H. Shin. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **9** (3), 1646 (1991).
- [2] V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, V.I. Liberman. *Thin Sol. Films*, **267**, 121 (1995).
- [3] V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, V.I. Liberman. *J. Cryst. Growth*, **159**, 1161 (1996).
- [4] В.М. Осадчий, А.О. Сусяков, В.В. Васильев, С.А. Дворецкий. *ФТП*, **33** (3), 293 (1999).
- [5] В.С. Варавин, В.В. Васильев, Т.И. Захарьяш. *Опт. журн.*, **66** (2), 69 (1999).
- [6] V.V. Vasilyev, D.G. Esaev, A.G. Klimenko. *Proc. SPIE*, **3061**, 956 (1997).
- [7] М.А. Демьяненко, О.Р. Копп, Г.Л. Курышев, В.Н. Овсяк, В.В. Шашкин. *Автометрия*, № 4, 35 (1998).
- [8] А.Г. Клименко, В.Г. Войнов, А.Р. Новоселов. *Автометрия*, № 4, 105 (1998).
- [9] L.N. Romashko, A.G. Klimenko, A.P. Kravchenko. *Proc. SPIE*, **3437**, 446 (1998).

Редактор Н.М. Колчанова

## IR photodetectors arrays based on HgCdTe films and GaAs/AlGaAs multiquantum wells

V.N. Ovsyuk, Yu.G. Sidorov, V.V. Vasilyev,  
V.V. Shashkin

Institute of Semiconductor Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Science,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** A technology had been worked out and photodetector modules were manufactured for the 3–5 and 8–12  $\mu\text{m}$  spectral ranges based on  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{GaAs}$  heterostructures and GaAs/AlGaAs multiquantum well structures grown by the molecular beam epitaxy method.

The photosensitive HgCdTe layers were grown on the GaAs substrates with the intermediate buffer layer of CdZnTe. To decrease the surface influence on the recombination processes graded gap HgCdTe layers with the increased towards the surface composition were grown.

A silicon multiplexer was designed and manufactured using the CMOS/CCD technology with the frame rate 50 Hz. Hybrid assembly of the photodetectors array and the multiplexer was produced by the group cold welding on the indium rods with control of the connection process.

The manufactured  $128 \times 128$  FPAs on the HgCdTe with the cut-off wavelength 6  $\mu\text{m}$  and 8.7  $\mu\text{m}$  had the NEDT value 0.02 K and 0.032 K respectively, at temperature 78 K and frame rate 50 Hz.

The photosensitive GaAs/AlGaAs multiquantum well structures were manufactured by the MBE method. It is shown that the designed technology allows to produce  $128 \times 128$  photodetector arrays ( $\lambda_{\text{max}} = 8 \mu\text{m}$ ) with the NEDT value 0.021 K and 0.06 K at temperatures 54 K and 65 K, respectively.