

УДК 621.383.49 : 621.793.162

**В. Н. Северцев, Е. В. Сусов, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий,
Н. Н. Михайлов, Г. В. Чеканова**

(Москва – Новосибирск)

128-ЭЛЕМЕНТНЫЙ ОХЛАЖДАЕМЫЙ ФОТОПРИЕМНИК НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР CdHgTe

Разработана технология изготовления многоэлементных линейчатых (с числом элементов до 128) фоторезисторов для спектрального диапазона 8–12 мкм. В качестве материала использовались гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) CdHgTe (КРТ), полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложке из арсенида галлия. ГЭС КРТ содержат широкозонные слои на границах раздела пленка – подложка и на поверхности пленки КРТ. Разработана конструкция фоточувствительного элемента, учитывающая специфическое распределение состава ГЭС КРТ. Изготовлены образцы линеек фоторезисторов, имеющие обнаружительную способность $D_{\lambda, \max}^* = (4 - 6)10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ и вольт-ваттную чувствительность $S_{\lambda, \max}^H = (6 - 9)10^4 \text{ В/Вт}$ с максимумом чувствительности на длине волны $\lambda_{\max} \sim 10,5 \text{ мкм}$. Проведены испытания фотоприемников (ФП) на основе линеек воздействием механических и климатических факторов.

Введение. Отечественная военная тепловизионная техника, а также гражданские области применения инфракрасных фотоприемников на основе фоторезисторов спектрального диапазона 8–12 мкм находятся в настоящее время в критическом состоянии из-за резкого сокращения производства объемных монокристаллов (ОМК) материала КРТ. Действующая в настоящее время технология изготовления фоторезисторов, в том числе и многоэлементных из ОКМ КРТ, связана с потерями большей части (до 99 %) материала в процессе превращения толстой (~1 мм) пластины КРТ произвольной формы в тонкий (порядка 10–15 мкм) фоточувствительный слой. Дополнительные потери связаны с возникновением перекосов пластины при приклейке к подложке и в процессе химико-механической полировки. Высокая стоимость монокристаллов КРТ (за рубежом до 2 млн долларов США за 1 кг) и большие потери материала при изготовлении фоторезисторов делают их очень дорогими, практически сводя к нулю применение в ряде перспективных гражданских направлений (медицина, сельское хозяйство, контроль экосистем, энергетических объектов, теплотрасс и т. д.).

Необходимо отметить, что технология изготовления фоторезисторов из ОКМ КРТ ограничивает возможности разработки фоторезисторов, удовлетворяющих требованиям современной тепловизионной техники. Разработан-

ная на заводе «Альфа» (Москва) технология изготовления модулей фоторезисторов с числом элементов 16×2 ; 32×2 и 48×2 , а также однорядной линейки с числом элементов 128, с размерами фоточувствительной площадки (ФЧП) 50×50 и 35×35 мкм с шахматным или зеркальным расположением ФЧП в билинейчатых фоточувствительных элементах (ФЧЭ) практически исчерпывает возможности ОМК КРТ.

Разработка технологии получения ГЭС КРТ методом молекулярно-лучевой эпитаксии в Институте физики полупроводников СО РАН [1, 2] открывает новые возможности перед технологией изготовления фотоприемников (как фоторезисторов, так и фотодиодов).

Цель данной работы – демонстрация возможности использования материала КРТ, полученного методом МЛЭ, для изготовления 128-элементных линеек фоторезисторов с предельными фотоэлектрическими параметрами.

Технология изготовления линеек фоторезисторов. Для изготовления фоторезисторов использовались ГЭС КРТ, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. ГЭС представляет собой эпитаксиальную пленку КРТ толщиной 6–8 мкм с заданным распределением состава по толщине и буферный слой CdZnTe толщиной 3–6 мкм, выращенные на подложке GaAs. Детально процесс выращивания ГЭС КРТ описан в [1, 2].

Типичная зависимость состава пленки КРТ от толщины представлена в [3]. Состав пленки КРТ задавался в процессе роста и измерялся с помощью лазерного эллипсометра *in situ* [2]. Рабочий слой пленки КРТ состава $x_{\text{CdTe}} \sim 0,2 - 0,22$ толщиной 5–7 мкм содеэжит на границе раздела с буферным слоем и на поверхности пленки КРТ широкозонные ($x_{\text{CdTe}} \sim 0,3$) слои толщиной 0,5–1,5 мкм для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда.

Электрофизические свойства ГЭС КРТ, измеренные методами, применяемыми для аттестации ОМК КРТ, практически не уступают свойствам ОМК КРТ и составляют: концентрация электронов $n = (1,5 - 6)10^{14} \text{ см}^{-3}$, подвижность $\mu = (0,8 - 1,5)10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, время жизни неравновесных носителей $\tau = 0,6 - 1,2 \text{ мкс}$ при 77 К.

ГЭС КРТ представляют собой круглую пластину диаметром 51 или 76 мм, общей толщиной 0,5 мм, срезанную по хорде не менее чем 10 мм от центра, при этом срез ориентирован в направлении [110], что упрощает разделение ГЭС КРТ на образцы требуемых размеров.

В технологии изготовления фоточувствительных элементов из ГЭС КРТ исключен ряд трудоемких процессов, характерных для ОМК КРТ, что ускоряет и упрощает процесс изготовления ФЧЭ. Технология изготовления ФЧЭ проводится следующим образом. Поверхность пластины подвергается отмывке и освежается в слабом полирующем травителе. Проводится фотолитография для выделения зоны контактных дорожек. Широкозонный слой под контактами стравливается, и подконтактная поверхность подвергается ионно-плазменной обработке для создания материала n^+ -проводимости (запирающие контакты). Контакты из индия получают методом электролитического осаждения на контактные дорожки. Пластина с контактными дорожками подвергается второй фотолитографии для выделения ФЧП и зон разделения ФЧЭ. После фотолитографии проводится направленное ионное травление слоя КРТ с незначительным углублением в буферный слой CdZnTe [3]. Разделенные таким образом ФЧП и ФЧЭ поступают на механическую резку тонким диском с внешней алмазной кромкой. После разбра-

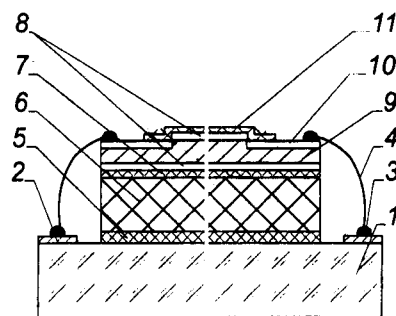


Рис. 1. Конструкция фотоувствительного элемента:

1 – подложка растра; 2 – контактная дорожка растра; 3 – In-припой; 4 – Au-проволока; 5 – клей; 6 – подложка GaAs; 7 – буферный слой CdZnTe; 8, 9 – широкозонный и рабочий слой КРТ соответственно; 10 – контакт; 11 – защитное покрытие

ковки под микроскопом ФЧЭ подвергаются операции нанесения защитного покрытия. Процесс изготовления ФЧЭ завершается приклеивкой линейки к контактному растру на сапфировом диске с числом дорожек, соответствующим количеству выводов фоторезистора, и последующей распайкой и разводкой индиевых контактов на золотые дорожки растра золотой проволокой диаметром 30 мкм. Конструкция ФЧЭ представлена на рис. 1. Линейка ФЧЭ монтировалась в корпус фотоприемника, который представляет собой металлостеклянный вакуумный сосуд с двойными стенками, рассчитанный на охлаждение криогенной газовой машиной. Излучение к ФЧЭ подводится через два германиевых окна. Конструкция ФП является типовым вариантом, освоенным в серийном производстве и прошедшим многократные испытания на полное соответствие требованиям промышленного производства.

Фотоэлектрические характеристики. Спектральные характеристики фотоувствительности элементов линейки, смонтированной в корпусе фотоприемника, приведены на рис. 2. Как видно из рисунка (кривая 1),

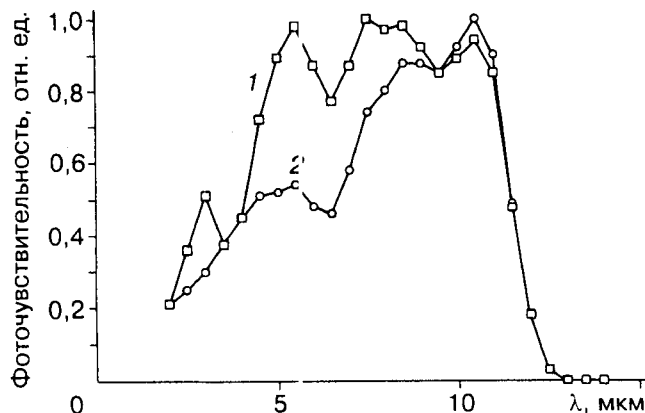


Рис. 2. Типичные спектральные характеристики фотоувствительности элементов линейки: 1 – с учетом германиевого фильтра; 2 – без учета германиевого фильтра

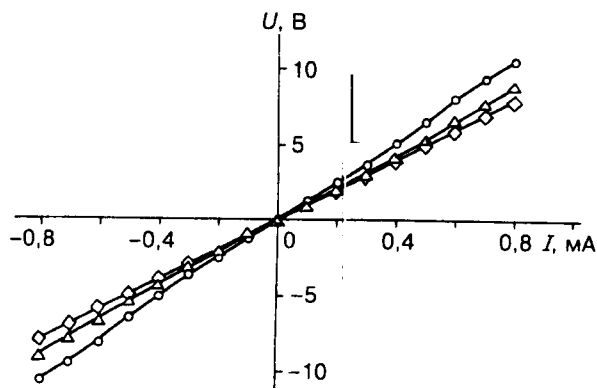


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики трех ФЧЭ 128-элементного фоторезистора

максимум спектральной характеристики лежит на длине волны 10,5 мкм. Спектральная характеристика элемента, восстановленная путем исключения влияния двух просветленных окон теплоизолирующего сосуда (кривая 2), имеет особенность, заключающуюся в наличии обширной зоны высокой чувствительности. Такую зависимость фоточувствительности от длины волны можно объяснить влиянием широкозонных слоев, главным образом верхнего. Регулируя пропускание двух фильтров (входных окон), можно в известных пределах оптимизировать спектральную характеристику.

Вольт-амперные характеристики ФЧЭ являются омическими при смещениях до 0,8 В (рис. 3), что указывает на хорошее качество контактов. Об этом же свидетельствуют характеристики спектрального распределения плотности шума (рис. 4). На частотах выше 2000–3000 Гц наблюдается генерационно-рекомбинационный шум, а при меньших частотах – $1/f$ -шум.

На рис. 5 приведена температурная зависимость сигнала ФЧЭ. Видно, что рабочая температура ФЧЭ не должна превышать 85–90 К.

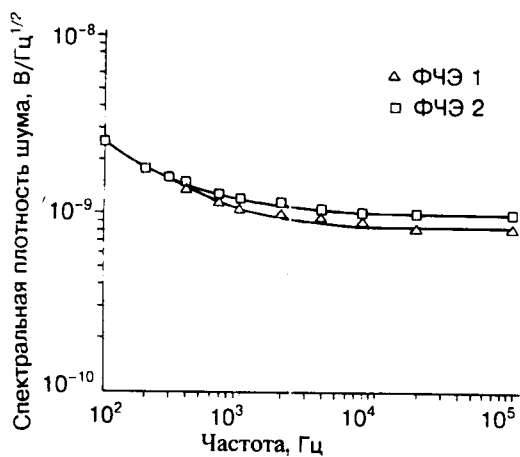


Рис. 4. Распределение спектральной плотности шума для двух ФЧЭ 128-элементного фоторезистора

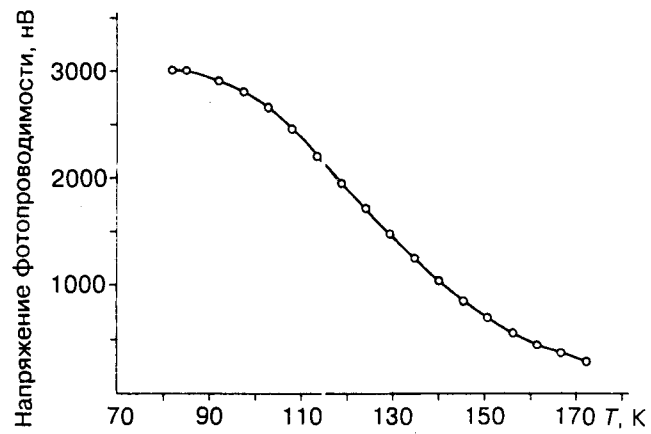


Рис. 5. Температурная зависимость сигнала фоторезистора

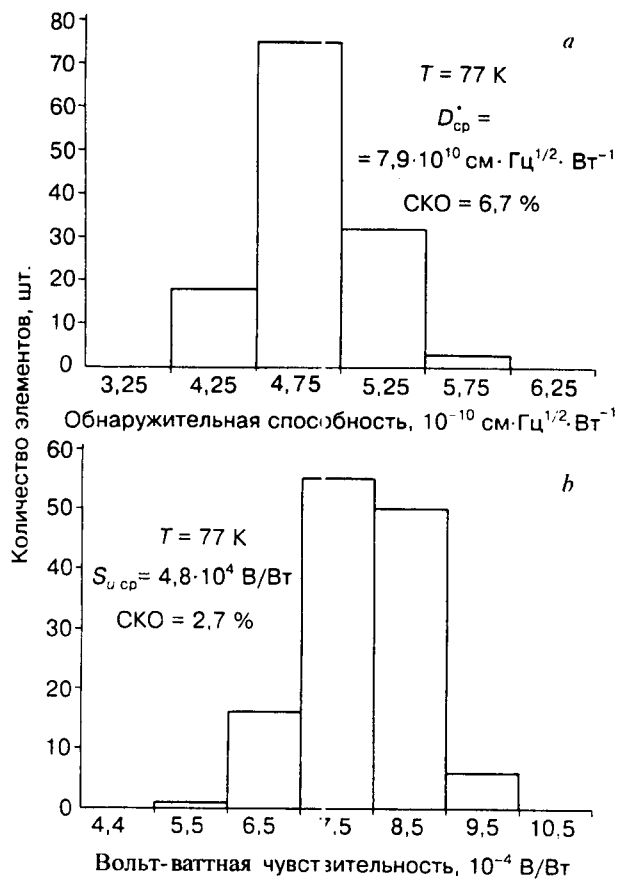


Рис. 6. Гистограммы распределения фотоэле стрических характеристик 128-элементного фоторезистора

Гистограммы распределения обнаружительной способности (рис. 6, *a*) и вольт-ваттной чувствительности (рис. 6, *b*) по элементам 128-элементной линейки показывают высокую однородность. Обнаружительная способность $D_{\lambda, \max}^* = (4 - 6)10^{10} \text{ см}^2 \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ и вольт-ваттная чувствительность $S_{\lambda, \max}'' = (6 - 9)10^4 \text{ В/Вт}$ при 77 К, что близко к предельным характеристикам.

128-элементный фотоприемник из ГЭС КРТ был испытан на воздействие вибраций, ударов, смены температур, предельной повышенной и минимальной пониженной температур. Воздействие повышенной температуры (+60 °С) приводит к изменению фоновой нагрузки и соответствующему изменению обнаружительной способности D^* . Фотоэлектрические характеристики после механических и климатических воздействий практически не изменились. Длительные испытания фоторезистора в течение 12 мес. не выявили отклонений параметров от первоначальных.

Заключение. Разработана комплексная технология изготовления многоэлементных фоторезисторов с числом элементов до 128, с чувствительностью в области длин волн 8–12 мкм ГЭС КРТ, выращенных методом МЛЭ.

Изготовлен ИК-фотоприемник на основе 128-элементного фоторезистора с высокими фотоэлектрическими параметрами. При проведении испытаний на механические и климатические воздействия ФП не обнаружено изменение фотоэлектрических свойств. Параметры ФП не изменились при испытаниях в течение 12 мес.

ГЭС КРТ пригодны для использования в разработке и производстве высококачественных многоэлементных фотоприемников на основе фоторезисторов в диапазоне длин волн 8–12 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I. et al. Molecular beam epitaxy of high quality $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ films with control of composition distribution // J. Cryst. Growth. 1996. **159**. P. 1161.
2. Sidorov Yu. G., Dvoretzky S. A., Yakushev M. V. et al. Peculiarities of the MBE growth physics and technology of narrow-gap II–VI compounds // Thin Solid Films. 1997. **307**. P. 253.
3. Сусов Е. В., Сидоров Ю. Г., Северцев В. Н. и др. Многоэлементный охлаждаемый фоторезистор на основе гетероэпитаксиальных структур HgCdTe // Автометрия. 1996. № 4. С. 40.

Поступила в редакцию 27 мая 1998 г.