

## ФОТОРЕЗИСТОРЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 2–15 МКМ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР $Cd_xHg_{1-x}Te$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ

© 2016 г. А. В. Филатов, канд. техн. наук; Е. В. Сусов, канд. техн. наук; Н. С. Кузнецов;  
В. В. Карпов, канд. физ.-мат. наук

ОАО “Швабе – Фотосистемы”, Москва

E-mail: info@shvabe-fs.ru

Представлены результаты разработки и промышленного производства фоторезисторов из гетероэпитаксиальных структур  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , полученных молекулярной эпитаксией, на спектральный диапазон 2–15 мкм для инфракрасной техники. Приведены различные конструкции фоторезисторов с охлаждением до 80 и 230 К и их основные фотоэлектрические параметры. Выполнен расчет надежности фоторезисторов по гамма-процентной наработке до отказа.

**Ключевые слова:** гетероэпитаксиальные структуры кадмий-ртуть-теллур, фоторезистор, надежность.

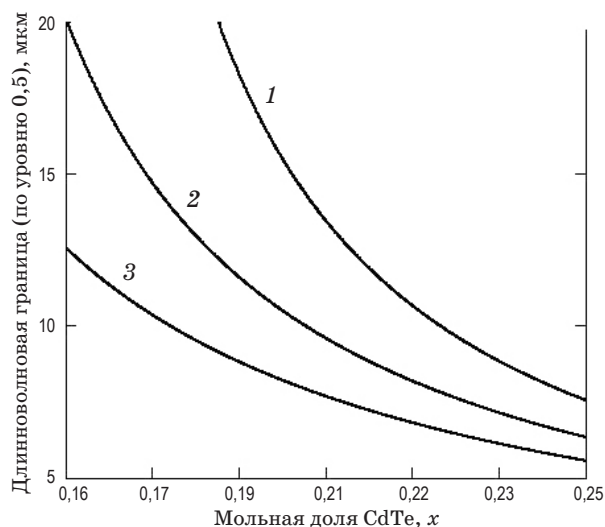
Коды OCIS: 230.5160, 040.3060, 160.6840

Поступила в редакцию 19.04.2016

### Введение

Качество современной инфракрасной (ИК) техники в большой степени определяется наличием тепловизионных средств ночного видения на основе фотоприемников (ФП) ИК излучения. Фоторезисторы (ФР) из твердого раствора теллурида кадмия-ртути  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ), где  $x \approx 0,2$ , обладают высокой чувствительностью к ИК излучению в окне прозрачности атмосферы 8–12 мкм. Для их изготовления ранее использовались монокристаллические пластины КРТ (МККРТ) произвольной формы толщиной 0,8–1,5 мм электронного типа проводимости, выделенные из слитков, полученных синтезом и кристаллизацией из расплава, которые затем подвергались длительному отжигу в парах ртути для снижения концентрации вакансий ртути. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии КРТ позволяет при относительно низкой температуре (порядка 180 °С) получать на различных подложках тонкие (не более 10 мкм) монокристаллические слои КРТ. В Институте физики полупроводников СО РАН (ИФП СО РАН) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (ГЭСКРТМЛЭ) получены гетероэпитаксиальные структуры КРТ электронного типа проводимости на подложках из GaAs диаметром более 70 мм. Структуры имеют однородность

состава ( $\Delta x \leq 0,003$ ), концентрацию основных носителей заряда  $(1-2) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ; время жизни неосновных носителей заряда более 2 нс при температуре жидкого азота. Эти параметры позволяют использовать ГЭСКРТМЛЭ для изготовления ФР с удельной обнаружительной способностью, ограниченной фоновым излучением.



**Рис. 1.** Зависимость длинноволновой границы фотопроводимости от мольной доли CdTe в КРТ при температурах ФЧЭ 80 (1), 230 (2) и 300 (3) К.

Максимум спектральной чувствительности ФП из КРТ зависит от ширины запрещенной зоны, определяемой мольной долей теллурида кадмия в КРТ, и температуры. Из многочисленных исследований зависимости ширины запрещенной зоны ( $E_g$ ) от температуры ( $T$ ) и состава КРТ ( $x$ ) чаще других используется эмпирическая зависимость из работы Хансена [1]

$$E_g = -0,302 + 1,93x - 0,81x^2 + 0,832x^3 + 5,35 \times 10^{-4}(1 - 2x)T. \quad (1)$$

На рис. 1 приведены зависимости положения длинноволновой границы фотопроводимости  $Cd_xHg_{1-x}Te$  от мольной доли  $CdTe$  в соответствии с выражением (1) без учета влияния толщины ФР при трех практически важных рабочих температурах ФП: 300, 230 и 80 К.

### Постановка задачи

Целью работы было создание из гетероэпитаксиальных структур КРТ многоэлементных ФР для тепловизионной техники, работающей в диапазоне температур окружающей среды от  $-60$  до  $+60$  °С, охлаждаемых до  $80 \pm 3$  К с помощью дроссельных микрокриогенных систем (ДМКС) или газовых криогенных машин (ГКМ), для аппаратуры регистрации лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм, работающей в диапазоне температур окружающей среды от  $-50$  до  $+55$  °С с термоэлектрическим охладителем (ТЭО) до  $230 \pm 10$  К, для фурье-спектрометров, охлаждаемых радиационной системой до  $80 \pm 3$  К в условиях открытого космоса.

Наиболее сложной и дорогостоящей частью ФР является охлаждаемые до криогенных температур фоточувствительные элементы (ФЧЭ), которые изготавливались из ГЭСКРТМЛЭ электронного типа проводимости (ИФП СО РАН) [2]. Для производства ФР, охлаждаемых до 80 К, используются образцы ГЭСКРТМЛЭ состава  $x = 0,210-0,217$  (длина волны максимального поглощения  $\lambda_{max} = 10-11,5$  мкм) и  $x = 0,189-0,199$  (длина волны максимального поглощения  $\lambda_{max} = 12,5-15$  мкм). В охлаждаемых ТЭО до 230 К фоторезисторах используются ГЭСКРТМЛЭ состава  $x = 0,186-0,193$ . Параметры образцов ГЭСКРТМЛЭ и технология изготовления ФЧЭ из них приведены в работах [3-7]. Следует отметить, что технология изготовления ФЧЭ из ГЭСКРТМЛЭ отличается от технологии изготовления ФЧЭ из МПКРТ. Это связано не только

с различной толщиной образцов, но и с температурой их выращивания. От температуры выращивания КРТ зависит структура электрически активных точечных дефектов кристаллической решетки КРТ, которые определяют его электрофизические свойства. В свою очередь технологические процессы изготовления ФЧЭ также влияют на структуру точечных дефектов.

### Серийные фоторезисторы для тепловизионной техники

Основные узлы конструкции ФР приведены на рис. 2. Наконечник (5) держателя (1), предназначенный для крепления ФЧЭ (2), выполнен из материала с коэффициентом линейного расширения (КЛР), согласованным с КЛР подложки ФЧЭ, и соединен с трубкой держателя (4) лазерной сваркой. Металлостеклянный цоколь (6) соединен с трубкой держателя (4) электронно-лучевой сваркой. Конструкция цоколя позволяет стыковать ФР как с ДМКС, так и с ГКМ. Заданный угол зрения ФП и поток фонового излучения определяются установленной на наконечнике (6) охлаждаемой диафрагмой (7) с покрытием, поглощающим ИК излучение, на внутренней поверхности. Для повышения эффективности диафрагма оснащена дополнительной перегородкой по ходу лучей. Держатель (1) изготовлен из тонкостенной трубки титанового сплава с низкой теплопроводностью. Теплоизолирующий сосуд Дьюара (3) укреплен в корпусе (9), который соединен с металлическим цо-

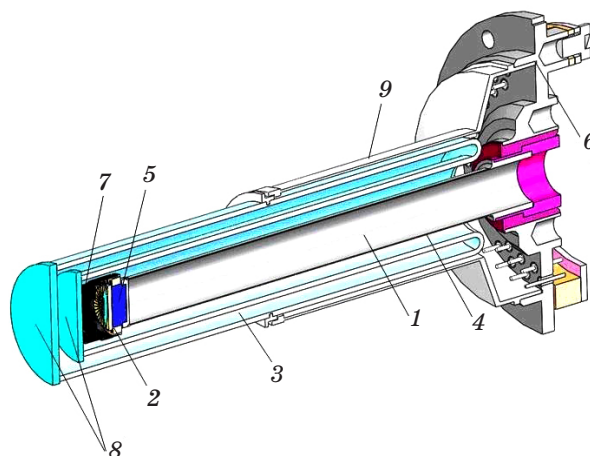
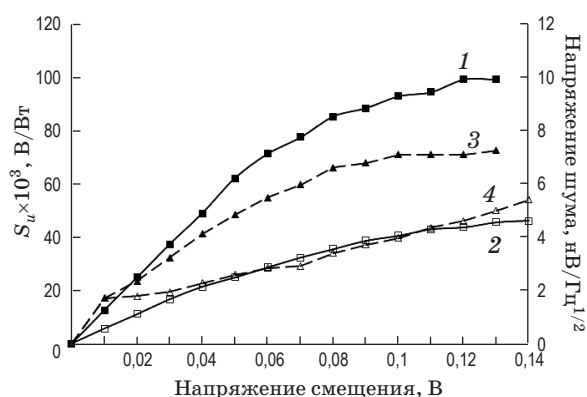


Рис. 2. Конструкция многоэлементных ФР. 1 – держатель, 2 – ФЧЭ, 3 – сосуд Дьюара, 4 – трубка держателя, 5 – наконечник держателя, 6 – металлостеклянный цоколь, 7 – охлаждаемая диафрагма, 8 – входные окна из германия, 9 – корпус.

колем (6). Входные окна (8) изготовлены из германия. Технология нанесения на входные окна просветляющего покрытия из ZnS ионно-термическим методом позволила получить приемлемую прочность и устойчивость покрытий к внешним воздействиям и пропускание излучения в диапазоне длин волн 10–12 мкм не менее 98%. На подложке контактного раstra с ФЧЭ (2) размещен датчик температуры для исключения подачи напряжения смещения на не охлажденный ФЧЭ. Полость ФР заполнена осушенным азотом. Разработанная конструкция ФР обеспечивает теплопритоки не более 0,4 Вт (с учетом тепла отходящих паров азота). Использование теплоизолирующего материала ТЗМК-10, расположенного между внутренней стенкой сосуда Дьюара и держателем, позволяет за счет уменьшения конвекции снизить теплопритоки до 0,3 Вт. Серийные многоэлементные ФР из КРТ с теплоизолирующим вакуумным сосудом приведенных конструкций обладают малыми теплопритоками и высокой надежностью, подтвержденными многолетней эксплуатацией.

Многоэлементные ФР изготавливались с ФЧЭ в форматах 2×10, 2×16, 2×32, с размерами фоточувствительных площадок 35×35 и 50×50 мкм. На рис. 3 приведены типичные зависимости вольтовой чувствительности ( $S_u$ ) и напряжения шума серийных ФР в единичной полосе частот от напряжения смещения при нагрузке 1000 Ом (размер фоточувствительной площадки 50×50 мкм), изготовленных из ГЭС-КРТМЛЭ и из МПКРТ [7]. В диапазонах на-

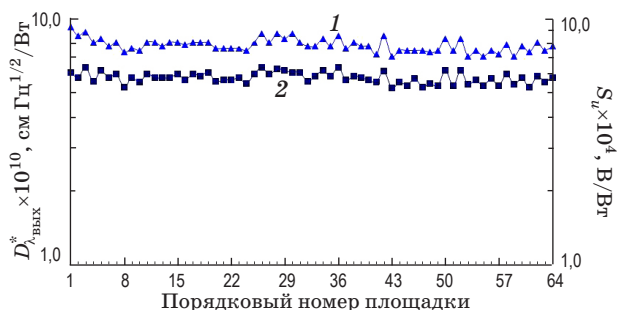


**Рис. 3.** Типичные зависимости вольтовой чувствительности  $S_u$  (1, 2) и напряжения шума в полосе частот один герц (3, 4) от напряжения смещения при нагрузке 1000 Ом ФР, изготовленных их ГЭСКРТМЛЭ (1, 3) и МПКРТ (2, 4) с фоточувствительной площадкой размером 50×50 мкм.

пряжений смещения, приведенных на рис. 3, выполняется требование по уровню удельной обнаружительной способности ( $D_{\lambda_{\max}}^*$ ) в максимуме спектральной чувствительности не менее  $4 \times 10^{10}$  см Гц<sup>1/2</sup>/Вт, а для серийных ФР с фоточувствительной площадкой размером 35×35 мкм – не менее  $5 \times 10^{10}$  см Гц<sup>1/2</sup>/Вт. Как видно из сравнения данных на рис. 3, использование разработанной технологии ФР на основе ГЭСКРТМЛЭ позволяет, оставаясь в пределах требований по обнаружительной способности, повысить вольтовую чувствительность примерно до  $8 \times 10^4$  В/Вт и снизить требования минимального напряжения шума микросборок предусилителей. Требование технических условий по минимальной вольтовой чувствительности удовлетворяется при меньших напряжениях смещения, т.е. при пониженном суммарном токе потребления. В табл. 1 приведены средние значения параметров пятисот ФР с фоточувствительной площадкой размером 50×50 мкм, изготовленных из ГЭСКРТМЛЭ и МПКРТ. Среднее значение удельной обнаружительной способности ФР из ГЭСКРТМЛЭ на 27% ниже удельной обнаружительной способности, ограниченной теоретическим пределом, приемника с данным плоским углом зрения ( $8,57 \times 10^{10}$  см Гц<sup>1/2</sup>/Вт), что соответствует уровню мировых образцов (ВЛР-режим). На рис. 4 представлены распределения удельной обнаружительной способности и вольтовой чувствительности по площадкам 64-элементного ФР из ГЭСКРТМЛЭ. Улучшение характеристик ФР из ГЭСКРТМЛЭ относительно МПКРТ связано с пренебрежимо малой скоростью рекомбинации неосновных носителей заряда на границах раздела “рабочий слой КРТ – варизонные слои КРТ”, отсутствием на поверхности рабочего слоя КРТ защитного покрытия с большим встроенным положительным зарядом, отсутствием клеевого соединения с подложкой (в конструкции ФЧЭ из монокристаллических пластин КРТ такое клеевое соединение

**Таблица 1.** Средние значения параметров ФР, изготовленных из ГЭСКРТМЛЭ и МПКРТ, с фоточувствительной площадкой размером 50×50 мкм

Материал КРТ	$D_{\lambda_{\max}}^*$ , см Гц <sup>1/2</sup> /Вт	$S_u$ , В/Вт	Рабочий ток, мА
ГЭСКРТМЛЭ	$6,28 \times 10^{10}$	$4,54 \times 10^4$	1,65
МПКРТ	$6,10 \times 10^{10}$	$4,95 \times 10^4$	3,98



**Рис. 4.** Распределения удельной обнаружительной способности  $D_{\lambda_{\max}}^*$  (1) и вольтовой чувствительности  $S_u$  (2) по площадкам 64-элементного ФР из ГЭСКРТМЛЭ; фоточувствительная площадка ФЧЭ  $35 \times 35$  мкм.



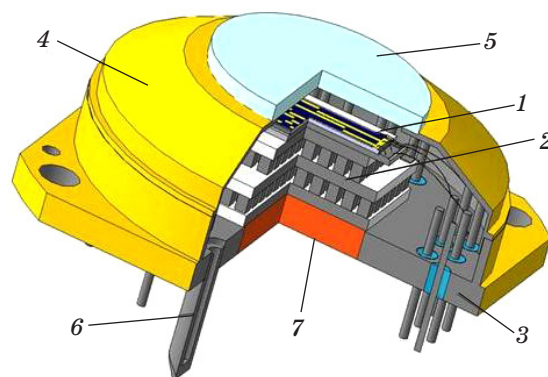
**Рис. 5.** Фотографии двух ФР (1 – ФЧЭ в формате  $2 \times 16$ , 2 – ФЧЭ в формате  $2 \times 32$ ) для тепловизионной техники, работающей в диапазоне температур окружающей среды от  $-60$  до  $+60$  °С.

неизбежно присутствует) и использованием оптимальной толщины рабочего слоя.

На рис. 5 приведена фотография двух ФР, состыкованных с микротеплообменниками.

### Фоторезисторы, охлаждаемые до 230 К двухкаскадным ТЭО, для аппаратуры регистрации импульсного лазерного излучения в диапазоне 2–11 мкм

Принципиальная схема конструкции фоторезистора с ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея, изготовленного из ГЭСКРТМЛЭ, представлена на рис. 6. Охлаждение ФЧЭ (1) осуществляется двухкаскадным ТЭО (2) марки 2МС-081-15 (ООО РМТ, Москва). Данный ТЭО удовлетворяет двум основным требованиям: обеспечивает температуру ФЧЭ 230 К (рис. 2) при температуре окружающей среды 55 °С и имеет размеры охлаждающей поверхности  $12 \times 12$  мм.



**Рис. 6.** Конструкции ФР с топологией ФЧЭ пятиразрядного кода Грея; рабочая температура ФЧЭ 230 К. 1 – ФЧЭ, 2 – ТЭО, 3 – корпус, 4 – колпак, 5 – входное окно, 6 – штенгель, 7 – вставка из сплава меди с молибденом.

При потребляемой мощности не более 15 Вт ТЭО 2МС-081-15 обеспечивает в вакууме максимальные перепад температуры  $95,0 \pm 2,0$  К и холодопроизводительность  $5,7 \pm 0,29$  Вт. Корпус (3) изготовлен из ковара с изолированными электрическими выводами. Фоторезистор герметично изолирован от внешней среды колпачком из никелированного ковара (4) с входным окном из просветленного сульфидом цинка германия (5). Полость ФР вакуумирована через медный штенгель (6) и заполнена ксеноном. Для улучшения отвода тепла от горячей поверхности ТЭО к радиатору в днище корпуса впаяна вставка (7) из сплава меди с молибденом [8], который имеет теплопроводность почти в пять раз больше, чем ковар. Температура ФЧЭ контролировалась расположенным рядом с ФЧЭ миниатюрным калиброванным бескорпусным датчиком температуры на основе кремниевого  $p-n$  перехода с температурным коэффициентом  $2,13$  мВ/град.

На рис. 7 приведены типичные зависимости температуры и фотоответа (сигнала) ФЧЭ на длине волны 10,6 мкм от выделяемой ФЧЭ мощности при постоянной мощности ТЭО (9,8 Вт). В собственном полупроводнике распределение неравновесных носителей заряда определяется амбиполярным коэффициентом диффузии. Диффузионная длина дырок в рассматриваемом случае существенно меньше длины чувствительной площадки любого разряда. При этом фотоответ прямо пропорционален напряжению смещения в широком диапазоне напряжений. Наблюдаемое насыщение сигнала (рис. 7) при увеличении выделяемой мощности более 0,17 Вт на всех разрядах (смещение



около 4,2 В на каждом элементе) связано с увеличением температуры ФЧЭ. Таким образом, ФЧЭ работает в условиях ограничения по выделяемой мощности. На рис. 7 продемонстрировано, кроме того, понижение рабочей температуры ФЧЭ за счет улучшения отвода тепла из горячей зоны ТЭО с помощью медно-молибденовой вставки в днище корпуса.

Исследование зависимости сигнала ФЧЭ, изготовленных из ГЭСКРТМЛЭ, содержащих в своем составе от 0,183 до 0,193 мольных долей CdTe, от облученности в диапазоне  $1 \times 10^{-8} - 5 \times 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup> на длине волны 10,6 мкм проиллюстрировано рис. 8, из которого видно, что зависимости чувствительности ГЭСКРТМЛЭ исследованных составов от облученности одинаковы. В диапазоне облученностей  $1 \times 10^{-8} - 1 \times 10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup> наблюдается прак-

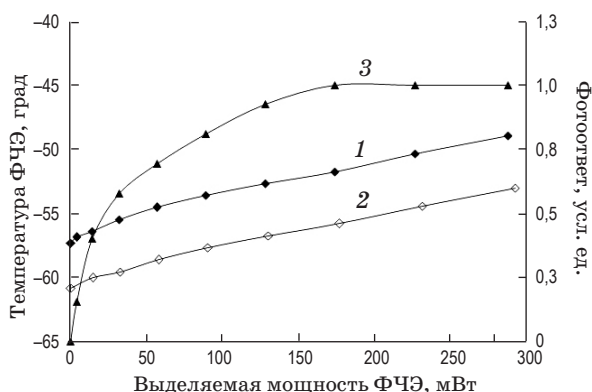


Рис. 7. Зависимости температуры ФЧЭ ФП из ковара (1) и со вставкой из Cu-Mo (2) на длине волны 10,6 мкм и фотоответа (3) от выделяемой мощности ФЧЭ при мощности ТЭО 9,8 Вт.

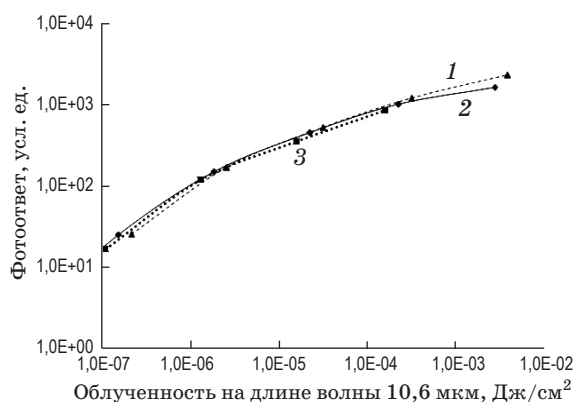


Рис. 8. Зависимости фотоответа от облученности и состава ГЭСКРТМЛЭ. 1 –  $x = 0,186$ , 2 –  $x = 0,189$ , 3 –  $x = 0,193$  (при  $x < 0,193$  рабочее напряжение смещения увеличивалось для достижения сопоставимого фотоответа).

тически линейный рост чувствительности с увеличением облученности.

На рис. 9 приведена зависимость отношения сигнал/шум ФП в разном конструктивном исполнении от состава рабочего слоя эпитаксиальной структуры толщиной 8,2–9 мкм. Результаты получены при облученности  $10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup> на длине волны 10,6 мкм в шумовой полосе 1 Гц.

Для сопоставления достигнутого уровня параметров ФР с кодом Грея с параметрами ФР классического дизайна был выполнен расчет обнаружительной способности освещаемой лазерным излучением 10,6 мкм (полуширина импульса излучения 75 нс) фоточувствительной площадки  $0,5 \times 0,3$  мм при суммарной длине линейки 6 мм. При расчете использовались отношения сигнал/шум, приведенные на рис. 9. Вклад теплового шума балластного сопротивления неосвещаемой части линейки учитывался поправочным коэффициентом, равным  $(6/0,3)^{1/2}$ . Напряжение сигнала пересчитывалось для тока смещения 20 мА/мм, так как в условиях такого отношения тока смещения к линейному размеру площадки известны значения обнаружительной способности одноэлементных фоторезисторов РС-10.6 и РС-2ТЕ-10.6 (VIGO System S.A., Польша [9]) на длине волны 10,6 мкм при рабочих температурах порядка 300 и 230 К. Приведенные в табл. 2 результаты расчета показывают, что параметры ФР с кодом Грея из ГЭСКРТМЛЭ соответствуют современному уровню ФР. Аналогов ФР из ГЭСКРТМЛЭ в топологии ФЧЭ с кодом Грея, охлаждаемых ТЭО, нами не выявлено.

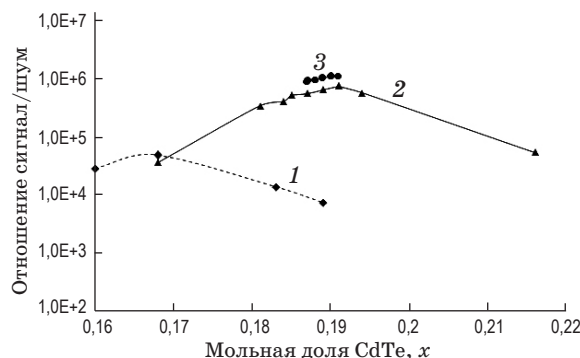
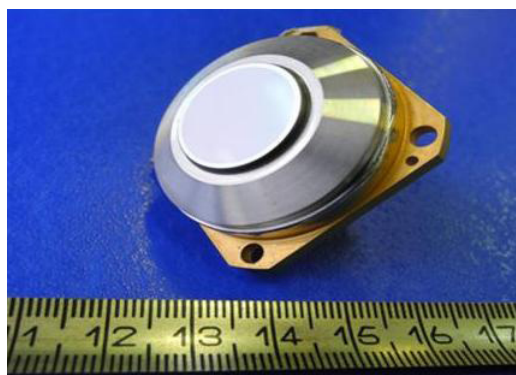


Рис. 9. Зависимости отношения сигнал/шум при облученности  $10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup> на длине волны 10,6 мкм в полосе частот один герц от состава ГЭСКРТМЛЭ. Температура ФЧЭ ФП из ковара 20 °С – 1, 45 °С – 2, температура ФЧЭ ФП со вставкой из Cu-Mo 45 °С – 3.

**Таблица 2.** Удельная обнаружительная способность ФР при температурах порядка 300 и 230 К

Тип приемника	$D_{\lambda_{\max}}^*$ , см Гц <sup>1/2</sup> /Вт	Рабочая температура, К
Фоторезисторы фирмы VIGO System S.A. [9]	$\geq 9 \times 10^6$	300
	$\geq 1,4 \times 10^8$	230
Фоторезисторы с кодом Грея (данная работа)	$\geq 1 \times 10^7$	300
	$\geq 2 \times 10^8$	230



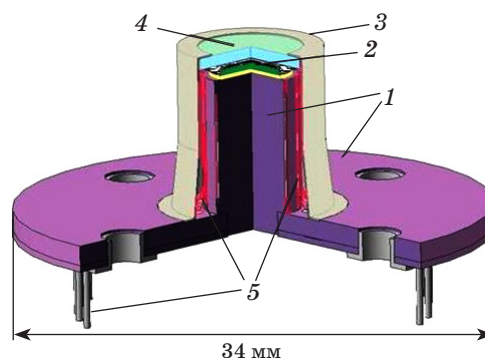
**Рис. 10.** Фотография ФР, охлаждаемого ТЭО, для регистрации импульсного лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм в диапазоне спектра 2–11 мкм при температуре окружающей среды от –50 до +55 °С.

На рис. 10 приведена фотография ФР с ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея с двухкаскадным ТЭО, предназначенного для регистрации импульсного лазерного излучения в диапазоне спектра 2–11 мкм и диапазоне температур окружающей среды от –50 до +55 °С.

### Длинноволновые фоторезисторы, охлаждаемые радиационной системой, для фурье-спектрометра космического аппарата

Длинноволновый ФР для фурье-спектрометра космического аппарата работает при криогенных температурах порядка 80 К, которые достигаются с помощью радиационной системы охлаждения (РСО). Большое зеркало РСО космического аппарата, смотрящее в открытый космос, приходит в равновесие с излучением космического пространства при температуре, близкой к 80 К, если тепловая нагрузка от ФР не превосходит 30 мВт. Охлаждение ФР происходит за счет теплопроводности материала его конструкции, охлаждаемая поверхность

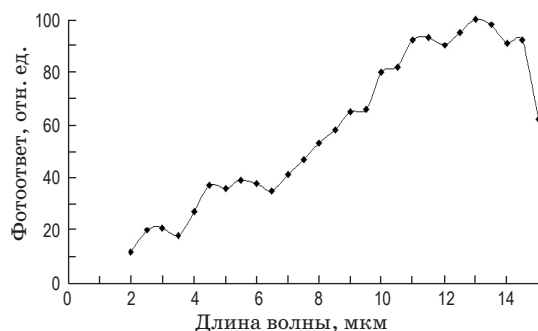
которого находится в контакте с поверхностью зеркала. В тепловое равновесие с окружающей средой за счет излучения и теплопроводности приходят все элементы конструкции ФР. Необходимость в тепловой изоляции держателя ФЧЭ отпадает. Однако к качеству сопрягаемых поверхностей предъявляются жесткие требования. На рис. 11 представлена в аксонометрии конструкция ФР [10] в разрезе. Корпус ФР (1) изготовлен из керамики ВК-94-1, обладающей высокой теплопроводностью при низких температурах (около 940 Вт/м град при 77 К) и являющейся хорошим диэлектриком. Фоточувствительный элемент (2) находится в среде осушенного азота полости ФР, ограниченной тонкостенной полированной крышкой (3) из титана с входным окном из германия (4), просветленным на диапазон спектра 9–15 мкм сульфидом цинка. Для контроля рабочей температуры в зоне ФЧЭ установлен миниатюрный датчик. Электрические выводы (5) от ФЧЭ и датчика температуры соединены с металлизированными дорожками на керамическом основании (держателе ФЧЭ). Гермовводом является многослойный керамический цоколь. Особенностью ФЧЭ данного ФР является большой (1×1 мм) размер пяти фоточувствительных площадок. С увеличением их размеров падает вольтовая чувствительность. Чтобы ее поднять, была разработана конструкция ФЧЭ в виде меандра, позволившая увеличить сопротивление ФЧЭ и вольтовую чувствительность. Этот прием позволил также снизить ток смещения и выделяемую мощность, ограниченную холодопроизводительностью РСО. Для измерения фотоэлектрических параметров длинноволновых ФР использовался вакуумируемый заливной криостат, имитирующий работу РСО, с экранами.



**Рис. 11.** Конструкция длинноволнового ФР в разрезе. 1 – корпус, 2 – ФЧЭ, 3 – крышка, 4 – входное окно, 5 – электрические выводы.

**Таблица 3.** Фотоэлектрические параметры длинноволнового ФР, изготовленного из ГЭСКРТМЛЭ, с фоточувствительной площадкой размером 1×1 мм

№ площадки	$D_{\lambda_{\max}}^*$ , см Гц <sup>1/2</sup> /Вт	$S_u$ , В/Вт	Темновое сопротивление ФЧЭ, Ом	Выделяемая мощность ФЧЭ, мВт
1	$5,1 \times 10^{10}$	720	780	5,65
2	$5,1 \times 10^{10}$	720	780	5,66
3	$4,9 \times 10^{10}$	690	780	5,66
4	$4,1 \times 10^{10}$	590	790	5,58
5	$4,1 \times 10^{10}$	610	770	5,73



**Рис. 12.** Спектральная характеристика чувствительности длинноволнового ФР при температуре 79,3 К.

Фотоэлектрические параметры длинноволнового 5-площадочного ФР при температуре 79,3 К с суммарной выделяемой мощностью 28,3 мВт приведены в табл. 3, а на рис. 12 – спектральная характеристика его чувствительности.

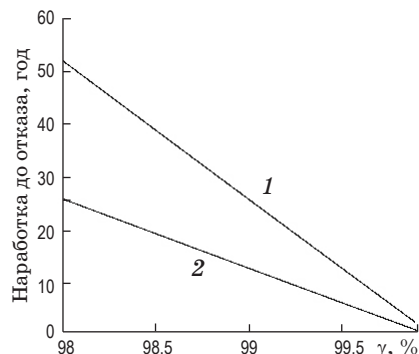
### Оценка надежности фоторезисторов из ГЭСКРТМЛЭ

Оценка надежности фоторезисторов выполнялась по гамма-процентной наработке до отказа [11] в соответствии с выражением

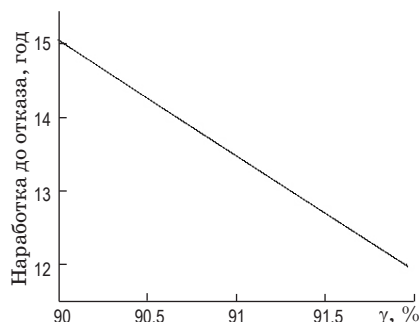
$$T_\gamma = -\ln(\gamma/100)/\lambda, \quad (2)$$

где  $T_\gamma$  – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах,  $\lambda$  – интенсивность отказов (1/ч). В процессе эксплуатации и хранения ФР не было зафиксировано отказов ФЧЭ. К началу написания статьи суммарная наработка (время хранения и эксплуатации у заказчика) ФР из ГЭСКРТМЛЭ с ФЧЭ форматов 2×10, 2×16, 2×32 и с фоточувствительными площадками размерами 35×35 и 50×50 мкм составила  $7,23 \times 10^8$  элементарно-часов ( $\lambda = 1,38 \times 10^{-9}$  1/ч), а в топологии пятиразрядного кода Грея –  $4,0 \times 10^7$  элементарно-часов ( $\lambda = 2,5 \times 10^{-8}$  1/ч). На рис. 13 приведены зависи-

мости  $T_\gamma$  ФП, работающих при 80 К, с ФЧЭ форматов 2×10, 2×16 и с фоточувствительными площадками размерами 35×35 и 50×50 мкм. На рис. 14 представлена зависимость  $T_\gamma$  ФП, работающих при 230 К, с ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея с двухкаскадным ТЭО. Как видно из рис. 13 и 14, конструкция ФП и технология изготовления ФЧЭ из ГЭСКРТМЛЭ обеспечивают стабильность и сохраняемость параметров ФР в условиях хранения и эксплуатации не менее 12,5 лет.



**Рис. 13.** Зависимости гамма-процентной наработки до отказа  $T_\gamma$  от вероятности  $\gamma$  ФП, работающих при 80 К, с количеством площадок 32 (1) и 64 (2).



**Рис. 14.** Зависимость гамма-процентной наработки до отказа от вероятности ФП с ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея, работающих при 230 К.

## Заключение

Разработана базовая технология изготовления фоторезисторов спектрального диапазона 8–12 мкм с ФЧЭ из отечественных гетероэпитаксиальных структур CdHgTe, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, с количеством элементов от 2×16 до 2×32, фоточувствительными площадками размером 35×35 и 50×50 мкм и рабочей температурой 80 К. Фоторезисторы серийно выпускаются с 2009 г., имеют высокую чувствительностью (BLIP-режим), надежность и сохраняемость параметров. Разработан фотоприемник спектрального диапазона 2–11 мкм с рабочей температурой 230 К,

обеспечиваемой двухкаскадным термоэлектрическим охладителем, с ФЧЭ из того же полупроводникового материала в топологии пятиразрядного кода Грея. Разработаны длинноволновые фоторезисторы ( $\lambda_{\max} = 12,5\text{--}15$  мкм), охлаждаемые радиационной системой, для фурье-спектрометра космического аппарата. Созданные фоторезисторы не имеют отечественных аналогов и по своим параметрам не уступают лучшим зарубежным образцам.

Авторы выражают свою признательность сотрудникам ИФП СО РАН Ю.Г. Сидорову, С.А. Дворецкому, Н.Н. Михайлову и В.С. Варавину за создание и исследование эпитаксиальных структур для фоторезисторов.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hansen G.L., Schmit J.L., Casselman T.N. Energy gap versus alloy composition and temperature in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. P. 7099–7101.
2. Varavin V.S., Dvoretzky S.A., Liberman V.I., Mikhailov N.N., Sidorov Yu.G. Molecular beam epitaxy of high quality  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  films with control of the composition distribution // J. Cryst. Growth. 1996. V. 159. P. 1161–1166.
3. Гиндин П.Д., Карпов В.В., Филатов А.В., Сусов Е.В., Петренко В.И., Никифоров А.Ю., Кузнецов Н.С., Грибанов А.А. Фоторезистор с кодом Грея из гетеро-эпитаксиальных структур КРТ для регистрации импульсного излучения  $\text{CO}_2$  лазера // Труды XXIII Межд. научно-техн. конф. “Фотозлектроника и приборы ночного видения”. М., 2014. С. 538–542.
4. Филатов А.В., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Кузнецов Н.С., Сусов Е.В. Многоэлементный кодовый приемник // Патент на полезную модель России № 140458. 2014.
5. Филатов А.В., Сусов Е.В., Гусаров А.В., Акимова Н.М., Крапучин В.В., Карпов В.В., Шаевич В.И. Долговременная стабильность фоторезисторов спектрального диапазона 8–12 мкм, изготовленных из гетероэпитаксиальных структур CdHgTe, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 12. С. 49–54.
6. Филатов А.В., Карпов В.В., Сусов Е.В., Грибанов А.А., Кузнецов Н.С., Петренко В.И. Фоторезисторы с кодом Грея из гетероэпитаксиальных структур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  на спектральный диапазон 2–11 мкм с термоэлектрическим охлаждением // УПФ. 2015. Т. 3. № 2. С. 190–195.
7. Филатов А.В., Сусов Е.В., Акимова Н.М., Карпов В.В., Шаевич В.И. Высокостабильные фоторезисторы диапазона 8–12 мкм из ГЭС КРТ МЛЭ // УПФ. 2015. Т. 3. № 2. С. 196–201.
8. Филатов А.В., Кузнецов Н.С., Гиндин П.Д., Карпов В.В., Козырев М.Е., Петренко В.И. Приемник излучения с термоэлектрическим охлаждением // Патент на полезную модель России № 153455. 2015.
9. Infrared detectors and related electronic devices. Catalogue VIGO System S.A. www.vigo.com.pl.
10. Кузнецов Н.С., Марущенко А.В., Гиндин П.Д., Михайлова Е.В., Акимова Н.М. Приемник излучения с радиационным охлаждением // Патент на полезную модель России № 111642. 2011.
11. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.