

УДК 621.383.49:621.793.162

## Фоторезисторы с кодом Грея из гетероэпитаксиальных структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ на спектральный диапазон 2—11 мкм с термоэлектрическим охлаждением

А. В. Филатов, В. В. Карпов, Е. В. Сусов, А. А. Грибанов, Н. С. Кузнецов, В. И. Петренко

*Приведены результаты разработки фоторезисторов с термоэлектрическим охлаждением фоточувствительных элементов в топологии пятиразрядного кода Грея из гетероэпитаксиальных структур  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , полученных молекулярно-лучевой эпитаксией и предназначенных для регистрации импульсного лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм. Исследованы зависимости отношения сигнал/шум от состава узкозонного рабочего слоя эпитаксиальной структуры и конструкции фоторезистора.*

PACS: 85.60.Dw

*Ключевые слова:* фоторезистор, код Грея, кадмий-ртуть-теллур, термоэлектрическое охлаждение, сигнал, шум.

### Введение

Для приема импульсного лазерного излучения большое распространение получили фотонные приемники. Топология фоточувствительных площадок в виде кода Грея обеспечивает создание двоичного кодового сигнала и снижает эффект ошибок на выходе внешней электроники [1]. В диапазоне спектра 0,5—1,8 мкм используются фотоприемники с кодом Грея на основе фотодиодов из кремния и германия [2—3], а в диапазоне спектра 1—11 мкм фоторезисторов из твердого раствора теллурида кадмия-ртути [4—7].

Целью данной работы была оптимизация параметров фоторезисторов с термоэлектрическим охлаждением фоточувствительных элементов (ФЧЭ) в топологии пятиразрядного кода Грея из гетероэпитаксиальных структур  $Cd_xHg_{1-x}Te$ , полученных молекулярно-лучевой эпитаксией (ГЭС КРТ МЛЭ) и предназначенных для регистрации импульсного лазерного излучения на длине волны 10,6 мкм в диапазоне температур окружающей среды  $-50...+55\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Филатов Александр Владимирович**, ведущий инженер.  
**Карпов Владимир Владимирович**, зам. генерального директора по НИИОКР и инновационному развитию, нач. ЦКБ.  
**Сусов Евгений Васильевич**, начальник КБ отдела.  
**Грибанов Александр Александрович**, ведущий инженер.  
**Кузнецов Николай Сергеевич**, начальник отдела.  
**Петренко Виктор Иванович**, зам. начальника ЦКБ по разработкам и производству.  
 ОАО «Швабе-Фотосистемы».  
 Россия, 117545, г. Москва, Днепропетровский проезд, 4а.  
 Тел. 8 (495) 315-73-56. E-mail: co-ckb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 марта 2015 г.

© Филатов А. В., Карпов В. В., Сусов Е. В., Грибанов А. А., Кузнецов Н. С., Петренко В. И., 2015

### Постановка задачи

Схематически топология многоэлементного пятиразрядного ФЧЭ с кодом Грея показана на рис. 1. Регистрируемое излучение формируется в виде полоски шириной 0,3—0,5 мм и длиной, равной ширине всего кодового приемника. Засвечивая часть фоточувствительных площадок и часть непрозрачных для излучения токопроводящих дорожек всех разрядов, такая полоска обеспечивает в зависимости от своего положения образование в усилителях двоичного кода Грея. Размер области засветки составил  $12 \times 6$  мм. Ширина линейки ФЧЭ — 0,5 мм. Для увеличения темнового сопротивления фоточувствительные площадки были выполнены в виде меандра [5]. Основные элементы технологии изготовления ФЧЭ описаны в [5, 8].

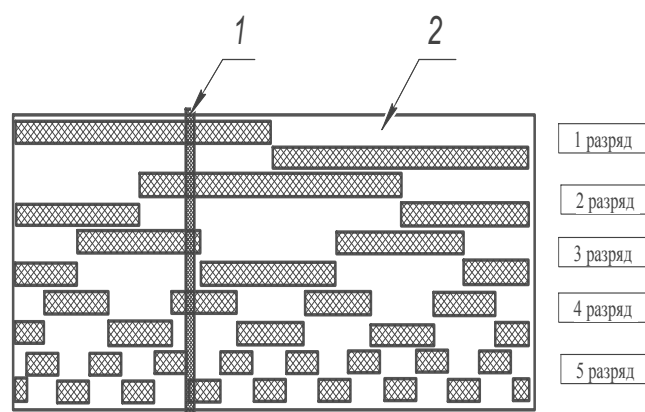


Рис. 1. Топология ФЧЭ с кодом Грея: 1 — проекция излучения на ФЧЭ в виде полоски; 2 — 1-я площадка 1-го разряда

Из многочисленных исследований зависимости ширины запрещенной зоны  $E_g$  от температуры и состава КРТ чаще других используется эмпирическая зависимость из работы Хансена [9]:

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

На рис. 2 приведены зависимости длинноволновой границы фотопроводимости для  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  от мольной доли  $\text{CdTe}$  при температуре 80, 220 и 300 К в соответствии с выражением (1) и без учета влияния толщины фоторезистора. ФЧЭ изготавливались из образцов ГЭС КРТ МЛЭ электронного типа проводимости производства ИФП СО РАН [10]. В качестве рабочего слоя ФЧЭ использовались составы КРТ от 0,160 до 0,216 мольных долей теллурида кадмия, обеспечивающие работу приемников в собственной области проводимости (от 200 К до комнатной температуры).

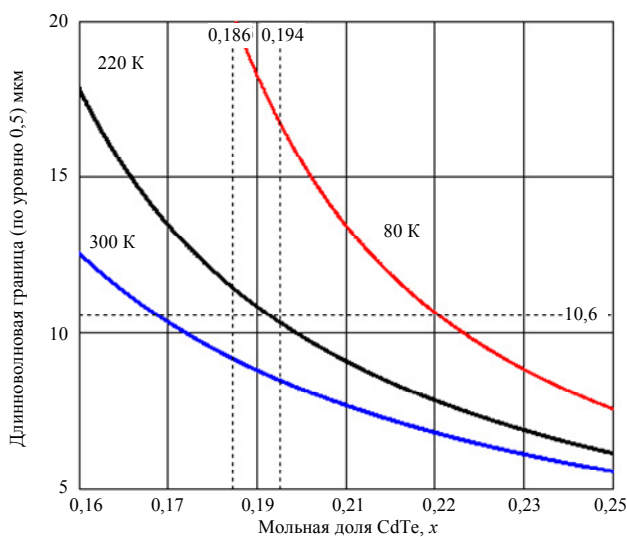


Рис. 2. Зависимость длинноволновой границы фотопроводимости от мольной доли  $\text{CdTe}$  для КРТ при температуре ФЧЭ 80, 220 и 300 К

На рис. 3 представлена принципиальная схема конструкции фоторезистора, обеспечивающая работу ФЧЭ в топологии пятиразрядного кода Грея из ГЭС КРТ МЛЭ. Охлаждение ФЧЭ (1) осуществлялось двухкаскадным термоэлектрическим охладителем (2) марки 2МС-081-15 отечественной фирмы ООО «РМТ», г. Москва. Выбранный термоэлектрический охладитель (ТЭО) соответствует двум основным условиям: имеет рабочую температуру ФЧЭ  $\approx 220$  К (рис. 2) при температуре окружающей среды  $55^\circ\text{C}$  и размеры охлаждающей поверхности, которые соответствуют размерам ФЧЭ (рис. 1). ТЭО 2МС-081-15 обеспечивает в вакууме максимальный перепад температуры  $\Delta T_{\max} = 95,0 \pm 2,0$  К и максимальную холодопроизводительность  $Q_{\max} = 5,7 \pm 0,29$  Вт при потребляемой мощности не более 15 Вт. ТЭО смонтирован в корпус (3) из ковара с изолированными электрическими выводами. Фоторезистор герметично изо-

лирован от внешней среды колпачком из никелированного ковара (4) с входным окном из просветлённого сульфидом цинка германия (5). Пустота фоторезистора 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, имеющая теплопроводность почти в пять раз выше по сравнению с коваром. Для контроля температуры ФЧЭ использовались миниатюрные калиброванные бескорпусные датчики температуры на основе кремниевого  $p-n$ -перехода с температурным коэффициентом  $\approx 2,13$  мВ/град, расположенные рядом с ФЧЭ.

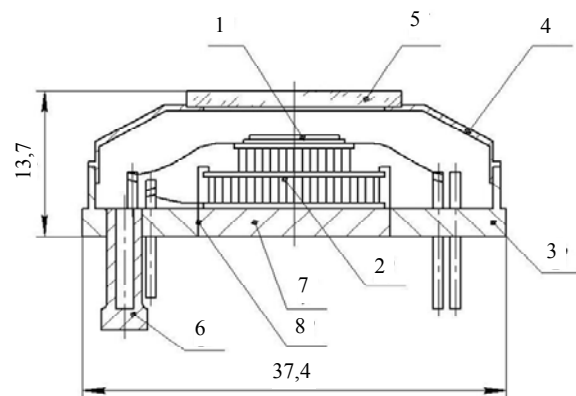


Рис. 3. Конструкция фоторезистора с кодом Грея: 1 — ФЧЭ, 2 — ТЭО, 3 — корпус, 4 — колпачок, 5 — входное окно, 6 — штенгель, 7 — вставка из сплава меди с молибденом

Для исследования свойств фоторезисторов на длине волны 10,6 мкм использовался импульсно-периодический  $\text{CO}_2$  лазер модели «ИЛ-100» производства ЦФП ИОФ РАН, ООО «Оптосистемы», г. Москва (ранее г. Троицк). Максимальная энергия импульса излучения 20 мДж на частоте 10 Гц. Длительность импульса излучения  $\approx 100$  нс. Ослабление излучения производилось калиброванными пластинами фторида лития. Измерения временных и энергетических характеристик импульсного лазерного излучения производились быстродействующим фотоприемником PD10M2, работающим на основе эффекта увлечения носителей тока фотонами, с чувствительностью на длине волны 10,6 мкм на уровне 0,26 мВ/кВт и временным разрешением не более 0,5 нс. Полоска лазерного излучения (рис. 1) шириной 0,3 мм в плоскости ФЧЭ формировалась анаморфотным объективом.

Электрический сигнал от фотоприемника PD10M2 и сигнал с сопротивления нагрузки ФЧЭ подавались непосредственно на цифровой запоминающий осциллограф TDS2022C. Измерение шумов ФЧЭ выполнялось селективным микровольт-

метром У2-8 на частоте 100 кГц с шумовой полосой  $\Delta f = 2$  кГц с использованием мал шумящего усилителя на основе операционного усилителя AD797. Спектральная плотность шума ФЧЭ в диапазоне частот 10—600 кГц исследовалась с помощью анализатора спектра С4-77.

### Экспериментальные результаты

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы длительности импульса излучения опорного приемника PD10M2 и ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ состава  $x = 0,185$  при температуре ФЧЭ  $-60$  °С. На рис. 5 приведены зависимости величины амплитуды сигнала фотоответа фоторезисторов от температуры для ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ составов от  $x = 0,160$  до  $x = 0,216$ , при фиксированной для каждого ФЧЭ плотности мощности излучения на длине волны 10,6 мкм при облученности в диапазоне  $P = 2,1 \cdot 10^{-7} - 2,0 \cdot 10^{-5}$  Дж/см<sup>2</sup>.

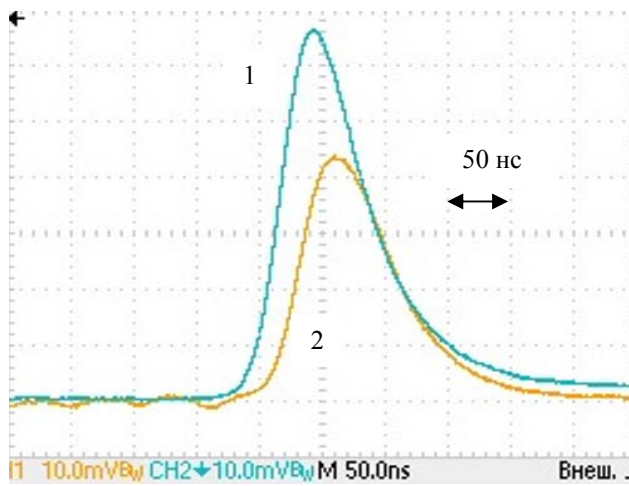


Рис. 4. Осциллограммы длительности импульса излучения  $CO_2$  лазера с приемника PD10M2 (1) и фоторезистора (2)

Величина сигнала фотоответа  $U_c$  прямо пропорционально времени жизни неосновных носителей заряда и обратно пропорционально концентрации основных носителей. В собственной области проводимости (рис. 5) преобладает механизм Оже–рекомбинации носителей. Величина сигнала фотоответа зависит от температуры и ширины запрещенной зоны следующим образом по данным [11]:

$$U_c \sim E_g^{3/2} \cdot \exp(3E_g/2kT).$$

С увеличением ширины запрещенной зоны увеличивается крутизна изменения величины фотоответа в одном и том же диапазоне изменения температуры (рис. 5). В собственной области проводимости при высокой концентрации основных носителей ( $n > 10^{16}$  см<sup>-3</sup>) и малой величине времени жизни неосновных носителей заряда ( $\tau \leq 50$  нс,

см. рис. 4) преобладающими шумами являются тепловые.

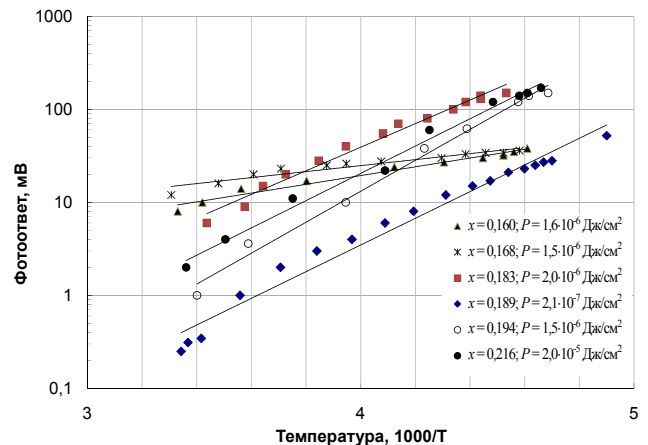


Рис. 5. Зависимости величины сигнала фотоответа ФЧЭ на длине волны 10,6 мкм от температуры для различных составов ГЭС КРТ МЛЭ

На рис. 6 приведены типичные зависимости напряжения шума в единичной полосе частот ( $\Delta f = 1$  Гц) от температуры для ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава 0,183 мольных долей CdTe.

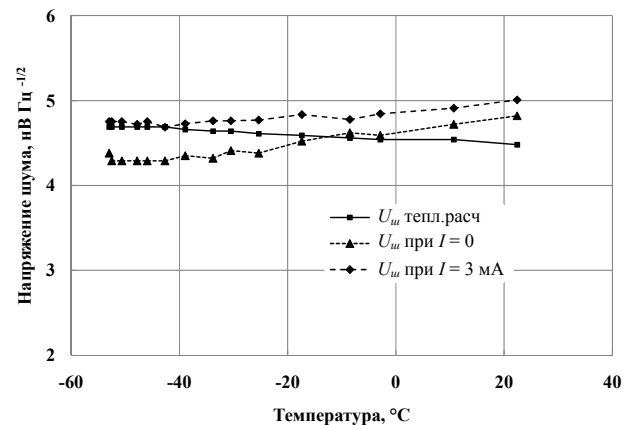


Рис. 6. Зависимость напряжения шума в единичной полосе частот от температуры для ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава 0,183 мольных долей CdTe

Из рис. 6 видно, что рабочее напряжение смещения не приводит к увеличению напряжения шума. Величина напряжения шума хорошо совпадает с расчетной величиной напряжения теплового шума, полученной в соответствии с выражением Джонсона-Найквиста  $U_{ш} = (4kTR\Delta f)^{1/2}$  из экспериментально полученной зависимости темного сопротивления данного ФЧЭ от температуры. Тепловая природа шумов ФЧЭ также подтверждена исследованиями спектральной плотности шума, которая не зависит от частоты в исследованном диапазоне частот (до 600 кГц).

Поскольку тепловые шумы не зависят от напряжения смещения на ФЧЭ, то максимальная ве-

личина обнаружительной способности (отношение сигнал/шум) определяется напряжением смещения, при котором тепловые шумы становятся равными генерационно-рекомбинационным шумам.

На рис. 7 приведены типичные зависимости температуры ФЧЭ и величины сигнала фотоответа ФЧЭ на длине волны 10,6 мкм от выделяемой мощности ФЧЭ при постоянной мощности ТЭО (9,8 Вт). В собственном полупроводнике распределение неосновных носителей заряда определяется амбиполярным коэффициентом диффузии. В нашем случае диффузионная длина дырок существенно меньше длины чувствительной площадки любого разряда, а величина сигнала фотоответа прямо пропорциональна напряжению смещения.

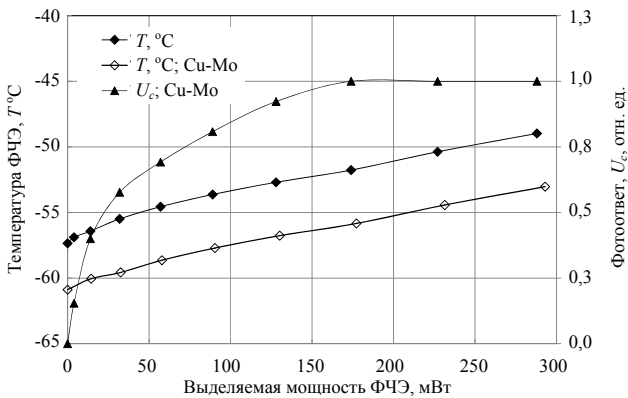


Рис. 7. Зависимость сигнала фотоответа на длине волны 10,6 мкм и температуры ФЧЭ от выделяемой мощности ФЧЭ при постоянной мощности ТЭО (≈9,8 Вт) для фотоприемника из коваара и с вставкой из Си-Мо

Наблюдаемое насыщение сигнала фотоответа (см. рис. 7) при увеличении выделяемой мощности более ≈ 0,17 Вт на всех разрядах (≈ 4,2 В на каждом элементе) связано только с увеличением температуры ФЧЭ. Таким образом, ФЧЭ работает в условиях ограничения выделяемой мощностью. Связанное с этим максимальное рабочее напряжение смещения намного меньше напряжения, когда преобладающими шумами являются генерационно-рекомбинационные шумы. На рис. 7 продемонстрировано понижение рабочей температуры ФЧЭ за счет улучшения отвода тепла из горячей зоны ТЭО с помощью медно-молибденовой вставки в днище корпуса. Для эпитаксиальных структур ГЭС КРТ МЛЭ состава  $x = 0,189$  мольных долей теллурида кадмия зависимость сигнала фотоответа на длине волны 10,6 мкм от температуры (рис. 5) с доверительной вероятностью 98 % можно аппроксимировать выражением:

$$U_c(\text{мВ}) = 6,0 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(3,3 \cdot (1000/T)), \quad (2)$$

где  $T$  — абсолютная температура ФЧЭ, К. Используя это выражение, получим, что при понижении рабочей температуры от  $-(52...54)^\circ\text{C}$  до  $-(58...61)^\circ\text{C}$  величина сигнала фотоответа увеличивается в 1,55—1,56 раза.

Исследование зависимости фотоответа от облученности в диапазоне  $1 \cdot 10^{-8}—5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  на длине волны 10,6 мкм для ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ состава от 0,183 до 0,193 мольных долей CdTe, показало, что зависимость чувствительности от облученности для исследованных составов ГЭС КРТ МЛЭ идентична. В диапазоне облученности  $1 \cdot 10^{-8}—1 \cdot 10^{-6} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  наблюдается практически линейный рост чувствительности с увеличением облученности.

На рис. 8 приведена зависимость отношения сигнал/шум фотоприемников в разном конструктивном исполнении от состава рабочего слоя эпитаксиальной структуры с толщиной 8,2—9 мкм. Результаты получены для 1-го разряда ФЧЭ при облученности  $10^{-7} \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  на длине волны 10,6 мкм в шумовой полосе  $\Delta f = 1 \text{ Гц}$ .

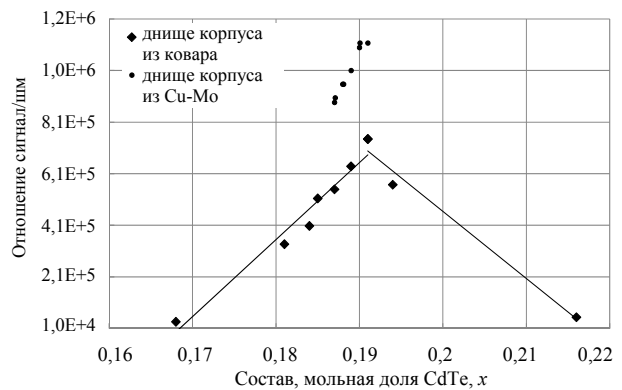


Рис. 8. Зависимость отношения сигнал/шум при облученности  $10^{-7} \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  на длине волны 10,6 мкм в шумовой полосе  $\Delta f = 1 \text{ Гц}$  от состава ГЭС КРТ МЛЭ

На рис. 9 приведены спектральные характеристики чувствительности двух фоторезисторов, изготовленных из эпитаксиальных структур составов  $x = 0,185$  и  $0,194$ , при температурах ФЧЭ  $-52$  и  $-50,4^\circ\text{C}$  соответственно.

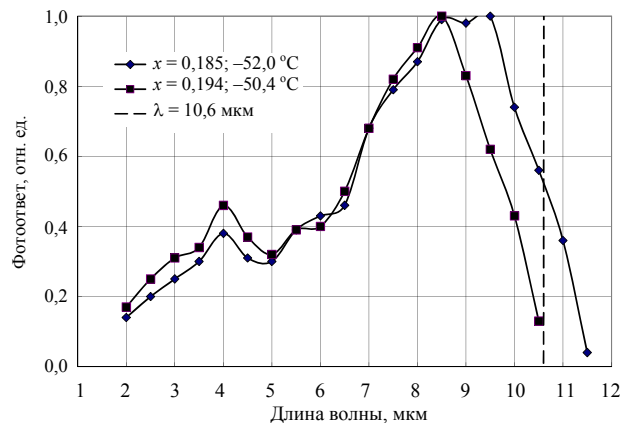


Рис. 9. Спектральные характеристики чувствительности двух фотоприемников, изготовленных их ГЭС КРТ МЛЭ составов 0,185 и 0,194 мольных долей CdTe

Как видно из рисунков, максимальное отношение сигнал/шум (см. рис. 8) достигается на участке длинноволнового спада спектра фотопроводимости (рис. 9) и определяется соотношением между квантовой эффективностью (коэффициентом поглощения, толщиной рабочего слоя), величиной концентрации основных носителей и рабочей температурой при фиксированных величинах потребляемых мощностях ТЭО и ФЧЭ.

### Заключение

В работе показано, что параметры фоторезисторов с термоэлектрическим охлаждением двухкаскадным ТЭО и фоточувствительными элементами в топологии пятиразрядного кода Грея из гетероэпитаксиальных структур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  на спектральный диапазон 2—11 мкм ограничены выделяемой мощностью ФЧЭ.

Достигнуто отношение сигнал/шум при облученности  $10^{-7}$  Дж·см<sup>-2</sup> на длине волны 10,6 мкм в шумовой полосе  $\Delta f = 1$  Гц более  $1 \cdot 10^6$  при суммарной мощности потребления двухкаскадного ТЭО и ФЧЭ не более 10 Вт.

Оптимальный состав рабочего слоя ГЭС КРТ МЛЭ фоторезисторов, охлаждаемых двухкаскадным ТЭО, находится в диапазоне 0,189—0,191 мольных долей теллурида кадмия. Введение в конструкцию дна фоторезистора медно-молибденовой ставки за счет улучшения отвода тепла существенно понижает рабочую температуру ФЧЭ, что позволяет улучшить фотоэлектрические параметры фоторезистора.

*Авторы признательны сотрудникам ИФП СО РАН С. А. Дворецкому, Н. Н. Михайлову и В. С. Варавину в создании и исследовании эпитаксиальных структур для данной работы.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Преснухин Л. Н. Фотоэлектрические преобразователи информации. — М.: Машиностроение. 1974.
2. Никонов Б. С. // Опτικο-механический журнал. 1983. № 2. С. 45.
3. Филачёв А. М., Кравченко Н. В., Трищенко М. А. и др. // Патент на полезную модель РФ № 50058 U1 по заявке 2005118450/22 с приоритетом от 14.06.2005.
4. Ларцев И. Ю., Комов А. А., Никитин М. С. и др. // Прикладная физика. 2004. № 3. С. 91.
5. Филатов А. В., Гиндин П. Д., Карпов В. В. и др. // Патент на полезную модель РФ № 140458 U1 по заявке 2014107447/28 с приоритетом от 27.02.2014.
6. Гиндин П. Д., Карпов В. В., Филатов А. В. и др. / XXIII Международная научно-техническая конференция и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 28—30 мая 2014, Москва, Россия. Труды конференции, С. 538.
7. Piotrowski J. // Opto-electronics review. 1982. V. 12. No. 1. P. 111.
8. Филатов А. В., Сусов Е. В., Гусаров А. В. и др. // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 12. С. 49.
9. Hansen G. L., Schmit J. L., Casselman T. N. // J. Appl. Phys. 1982. V. 53. P. 7099.
10. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., et al. // J. Cryst. Growth. 1996. V. 159. P. 1161.
11. Kinch M. A., Brau M. J., Simmons A. // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. No. 4. P. 1649.

## Photoresistors with a Gray code from heteroepitaxial structures $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ on the 2–11 $\mu\text{m}$ spectral range with thermoelectric cooling

A. V. Filatov, V. V. Karpov, E. V. Susov, A. A. Gribanov, N. S. Kuznetsov, and V. I. Petrenko

Shvabe-Photosystems, Inc.  
4a Dnepropetrovsky passage, Moscow, 117545, Russia  
E-mail: co-ckb@mail.ru

Received March 17, 2015

*Consideration is given to results of development of photoresistors with thermoelectric cooling photo-sensitive elements in topology of a five-unit Gray code from hetero-structures  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  received molecular-beam epitaxial growth and intended for registration of pulse laser radiation on length of a wave 10.6 microns. Data on optimization of the attitude are obtained by a signal/noise depending on a working layer of the structures and a design of the photoresistor.*

PACS: 85.60.Dw

*Keywords:* photoresistor, Gray code, cadmium-mercury-tellurium, thermoelectric cooling, signal, noise.

## REFERENCES

1. L. N. Presnukhin, *Photoelectrical Transformers of Information* (Mashinostroenie, Moscow, 1974) [in Russian].
2. B. S. Nikonov, *Optic&Mechanic Journal*, No. 2, 45 (1983).
3. A. M. Filachev, N. V. Kravchenko, M. A. Trishenkov, et al., RF Patent No. 50058 U1, June 14, 2005.
4. I. Yu. Lartsev, A. A. Komov, M. S. Nikitin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 91 (2004).
5. A. V. Filatov, P. D. Gindin, V. V. Karpov, et al., RF Patent No. 140458 U1, February 27, 2014.
6. P. D. Gindin, V. V. Karpov, A. V. Filatov, et al., in *Proc. XXIII Intern. Conf. Photoelectronics* (Russia, Moscow, May 28—30, 2014). P. 538.
7. J. Piotrovski, *Opto-Electronics Review* **12**, 111 (1982).
8. A. V. Filatov, E. V. Susov, A. V. Gusarov, et al., *Optich. Zhurn.* **76** № (12), 49 (2009).
9. G. L. Hansen, J. L. Schmit, and T. N. Casselman, *J. Appl. Phys.* **53**, 7099 (1982).
10. V. S. Varavin, S. A. Dvoretzky, et al., *J. Cryst. Growth.* **159**, 1161 (1996).
11. M. A. Kinch, M. J. Brau, and A. Simmons, *J. Appl. Phys.* **44**, 1649 (1973).