

УДК 621.383

Фотоэлектрические параметры КРТ фоторезисторов с термоэлектрическим охлаждением

И. Ю. Ларцев, М. С. Никитин, Г. В. Чеканова

Федеральное государственное унитарное предприятие "Альфа", Москва, Россия

Представлены основные фотоэлектрические параметры миниатюрных фотоэлектрических полупроводниковых приемников (ФЭПП) на основе фоторезисторов (ФР) из материала кадмий—ртуть—теллур (КРТ). Разработана широкая номенклатура ФЭПП с трехкаскадным термоэлектрическим охладителем (ТЭО), обладающих предельно высокими значениями удельной обнаружительной способности и вольтовой чувствительности в диапазонах спектра от 3,0 до 5,5 мкм и от 7,5 до 10,6 мкм.

Тройные твердые растворы теллуридов кадмия-ртути КРТ: $(\text{HgTe})_{1-x} + (\text{CdTe})_x$ или $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, где x — мольная доля бинарного соединения CdTe в твердом растворе, обладают рядом уникальных свойств. Во-первых, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ образует непрерывный ряд твердых растворов с плавно изменяющейся величиной энергетического зазора $E_g(x, T)$ [1, 2]. На полупроводниковой стороне составов $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($0,14 \leq x \leq 1,0$) E_g почти ли-

нейно изменяется от 0,0 до 1,6 эВ. Во-вторых, возможно выращивание однородного структурно совершенного материала $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ во всем диапазоне составов "x" от 0,0 до 1,0, обладающего оптимальными электрофизическими, фотоэлектрическими и иными необходимыми свойствами для изготовления пороговых ФЭПП на диапазон длин волн от 1,5 до 25 мкм.

Отмеченные выше особенности $Hg_{1-x}Cd_xTe$ предоставляют возможность изготавливать широкую номенклатуру ФЭПП ИК-диапазона спектра с превосходной чувствительностью и высокими свойствами твердых растворов КРТ позволяют изготавливать детекторы ИК-излучения не только для обнаружения и распознавания военных целей или наведения на цель высокоточного оружия, но и для широкого применения в гражданских сферах деятельности: в промышленном производстве, энергетике, железнодорожном и автомобильном транспорте, гражданской авиации, медицине, научных исследованиях.

ФЭПП с термоэлектрическим охлаждением являются очень удобными оптоэлектронными компонентами для построения прецизионного контрольно-измерительного оборудования, поскольку обладают прекрасной чувствительностью и не требуют для работы ничего кроме электричества.

Ниже представлены результаты исследования фотоэлектрических параметров широкой номенклатуры ФЭПП на основе КРТ фоторезисторов с термоэлектрическим охлаждением, разработанных и изготавливаемых ФГУП "Альфа", Москва, Россия. ФЭПП предназначены для широкого применения в системах дистанционного контроля тепловых полей промышленного и энергетического оборудования, анализа теплового излучения от различных объектов, прецизионной спектроскопии, прецизионного позиционирования нагретых узлов и деталей и т. д.

Фоточувствительные элементы и конструкция ФЭПП

Фоточувствительные элементы (ФЧЭ) были изготовлены из объемного монокристаллического полупроводникового материала $Hg_{1-x}Cd_xTe$ n -типа проводимости.

Рабочая температура ФЧЭ обеспечивалась трехкаскадным ТЭО и составляла $T_{раб} \sim 205-210$ К при температуре теплоотводящего радиатора $20-30$ °С.

Для изготовления ФЧЭ использовались пластины $n-Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,18-0,35$), концентрация и подвижность основных носителей заряда при $T = 77$ К составляли $n_{77} \sim (2,0-6,0) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $\mu_{77} \sim (3 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5) \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Состав x выбирался так, чтобы обеспечить требуемые параметры спектральной характеристики чувствительности ФЭПП при $T_{раб} \sim 205-210$ К. В соответствии с зависимостью ширины запрещенной зоны $E_g(x, T)$ в указанных выше диапазонах составов и температур ширина запрещенной зоны изменяется от $E_g \approx 0,1$ эВ до $E_g \approx 0,35$ эВ. Следовательно, ожидаемые значения граничной длины волны $\lambda_{со}(50\%) = 1,24/E_g$ и длины волны в максимуме спектральной чувствительности $\lambda_{max} \sim 0,85\lambda_{со}(50\%)$ лежат в диапазонах: $\lambda_{со}$ от $\sim 3,5$ до $\sim 12,5$ мкм и λ_{max} от $\sim 3,0$ до $\sim 10,6$ мкм.

Для изготовления ФЧЭ использовалась групповая мезапланарная технология. Рабочий слой КРТ толщиной $10-13$ мкм формировался на несущей подложке. Нижняя и фронтальная поверхности слоя КРТ были закрыты оптимальным защитно-пассивирующим покрытием. Покрытия обеспечивают достижение высоких значений ФЭП и долговременную стабильность параметров приборов в различных условиях работы и хранения. Формирование топологии и точных размеров ФЧЭ производилось методом ионного профилирования слоя КРТ коллимированным пучком ионов аргона. ФЧЭ с размером чувствительной области 35×35 мкм и 50×50 мкм имели классическую квадратную фоточувствительную площадку, т. е. размер $1 \square$ вдоль пути протекания постоянного тока смещения. Для повышения вольтовой чувствительности при одновременном снижении величины тока смещения и уменьшения спектральной плотности низкочастотного шума $1/f$ все ФЧЭ с размером фоточувствительной области $0,1 \times 0,1$ мм и более ($0,25 \times 0,25$ мм; 1×1 мм; $1,1 \times 1,1$ мм) имели структуру "Сплит" [3] (рис. 1), которая формирует компактную фоточувствительную площадь заданного размера с увеличенной протяженностью ФЧЭ вдоль пути протекания постоянного тока смещения от $4 \square$ до $16 \square$.

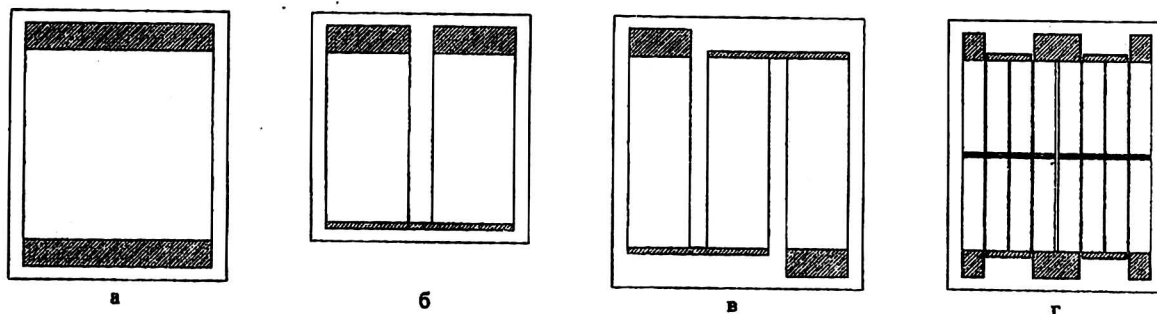


Рис. 1. Топология чувствительной площадки ФЧЭ с зазорами $0,015$ мм и размерами: а — 35×35 мкм и 50×50 мкм; б — $0,1 \times 0,1$ мм и $0,25 \times 0,25$ мм; в — 1×1 мм; г — $4 \times (1,1 \times 1,1$ мм). Заштрихованные области — контакты; светлые области — фоточувствительные области площадок

Число фоточувствительных элементов ФЭПП составляет от 1 до 10.

Обобщенный чертеж общего вида корпуса ФЭПП представлен на рис. 2.

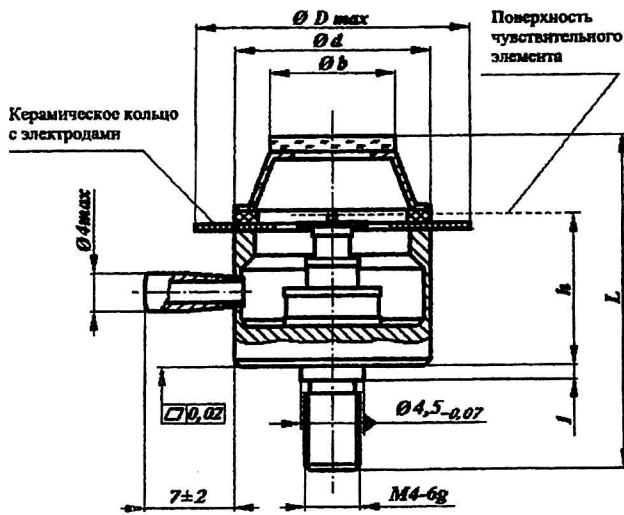


Рис. 2. Фотозлектрический полупроводниковый приемник с термоэлектрическим охлаждением

Параметры корпусов ФЭПП с ТЭО приведены в табл. 1.

Таблица 1

Типоразмеры корпусов ФЭПП с ТЭО

№ корпуса	Число каскадов ТЭО	D_{max} , мм	d , мм	b , мм	h , мм	L , мм
1	3	20	15	16	$11,4 \pm 0,3$	21
2 (с крышкой)	3	20	15	8	$11,4 \pm 0,3$	25,5
3	3	17	13	13	$11,4 \pm 0,3$	21
4 (с крышкой)	3	17	13	8	$11,4 \pm 0,3$	25,5
5	2	17	13	13	$7,5 \pm 0,1$	18

без него. Внутренняя полость полностью собранного ФЭПП заполнялась инертным газом с низкой теплопроводностью. Параметры двух наиболее применяемых трехкаскадных ТЭО приведены в табл. 2.

В качестве датчиков рабочей температуры ФЧЭ использовались термисторы марки СТЗ-25 или СТЗ-25А с номиналами 1,5; 2,2; 3,3; 6,8; 10 кОм. Зависимость сопротивления датчика от температуры представлена формулой

$$R(T) = R_1 \exp(B(T_1 - T)/(T_1 T)),$$

где $R(T)$, кОм — измеренная величина сопротивления датчика температуры;

R_1 , кОм — величина сопротивления датчика при 293 К, $R_1 = XX,XXX$ кОм;

$T_1 = 293$ К; T , К — реальная температура;

B , К — постоянная величина. $B = 2,3031 \lg \times (R_1/R_2)/(1/T_1 - 1/T_2)$, $B = ZZZZ$ К;

R_2 — величина сопротивления при $T_2 \neq T_1$;

оптимальные условия для определения B : $T_1 = 293$ К и $T_2 = 253$ К; $R_2 = YY,YYYY$ кОм;

$TCR = -B/T^2 \cdot 100$ % — термический коэффициент сопротивления при реальной температуре.

Относительные характеристики спектральной чувствительности

Относительные характеристики спектральной чувствительности S_λ ФЭПП с ФЧЭ, изготовленными из материала $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \sim 0,23-0,35$ и $x \sim 0,18-0,20$), измеренные при рабочей температуре 205 — 210 К, представлены на рис. 3.

Таблица 2

Основные параметры трехкаскадных ТЭО

№ п/п	Размеры, мм		Высота	Ток смещения I , А	Напряжение смещения V , В	Макс. перепад температуры ΔT , К (вакуум, $T_{гор} = 303$ К)	Макс. холодопроизв. P , при $\Delta T = 0$ Вт
	верхн. керамика	нижн. керамика					
1	2,5×2,5	6×6	$5,2 \pm 0,15$	$1,2 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,2$	114 ± 2	$0,30 \pm 0,02$
2	3×4	8×8	$6,8 \pm 0,15$	$0,9 \pm 0,09$	$3,35 \pm 0,1$	115 ± 2	$0,42 \pm 0,02$

Корпус представляет собой миниатюрный герметичный металлокерамический узел, укомплектованный малогабаритным трехкаскадным ТЭО с датчиком температуры и оптическим окном для инфракрасного излучения. Окна в виде плоскопараллельных дисков изготавливались из сапфира, оптического германия или селенида цинка как с антиотражающим покрытием, так и

Видно, что непрерывный характер зависимости $E_g(x, T)$ позволяет изготавливать ФЭПП практически с любым значением λ_{max} в диапазонах спектра от $\sim 3,0$ до $\sim 5,5$ мкм и от $\sim 7,5$ до $\sim 10,6$ мкм. Это в свою очередь, дает возможность достигать предельно высокие значения удельной обнаружительной способности $D^*_{\lambda_{max}}$ ФЭПП в указанных спектральных диапазонах, определяемые фундаментальными свойствами КРТ при температуре 205 — 210 К.

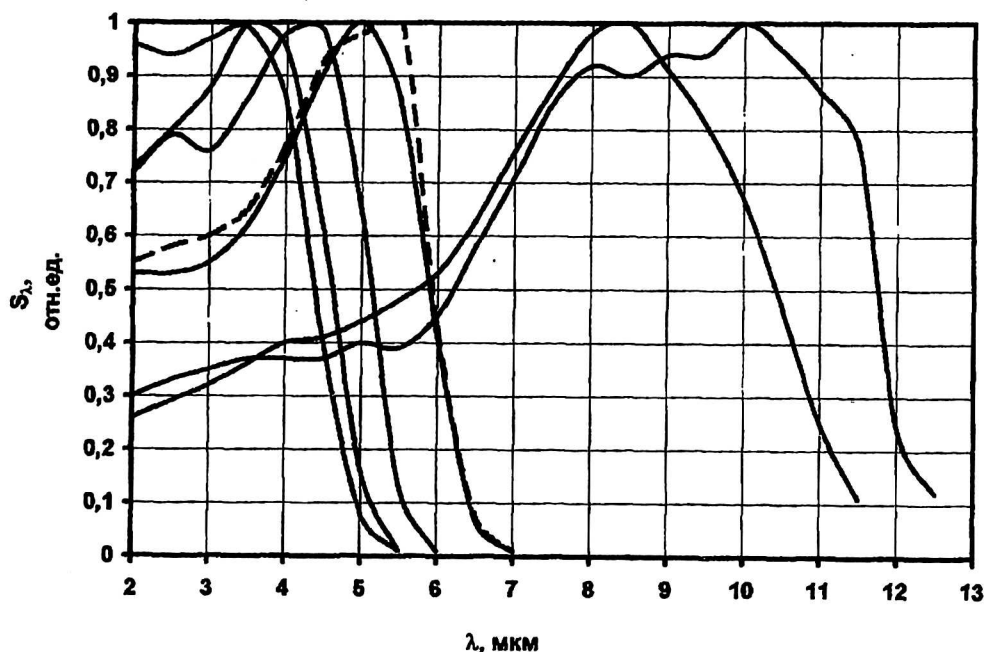


Рис. 3. Относительные характеристики спектральной чувствительности ФЭП с ТЭО

Фотоэлектрические параметры

Определение ФЭП производилось по стандартной методике с измерением сигнала от источника “абсолютно черное тело” с температурой 500 К. Частота модуляции тестового излучения составляла 1200 Гц.

На рис. 4—6 и в табл. 3 представлены типичные значения: удельной обнаружительной способности $D^*_{\lambda_{max}}$ (λ_{max} , 500 К, 1200 Гц, 1 Гц) и вольтовой чувствительности $S_{U\lambda_{max}}$ (λ_{max} , 500 К, 1200 Гц).

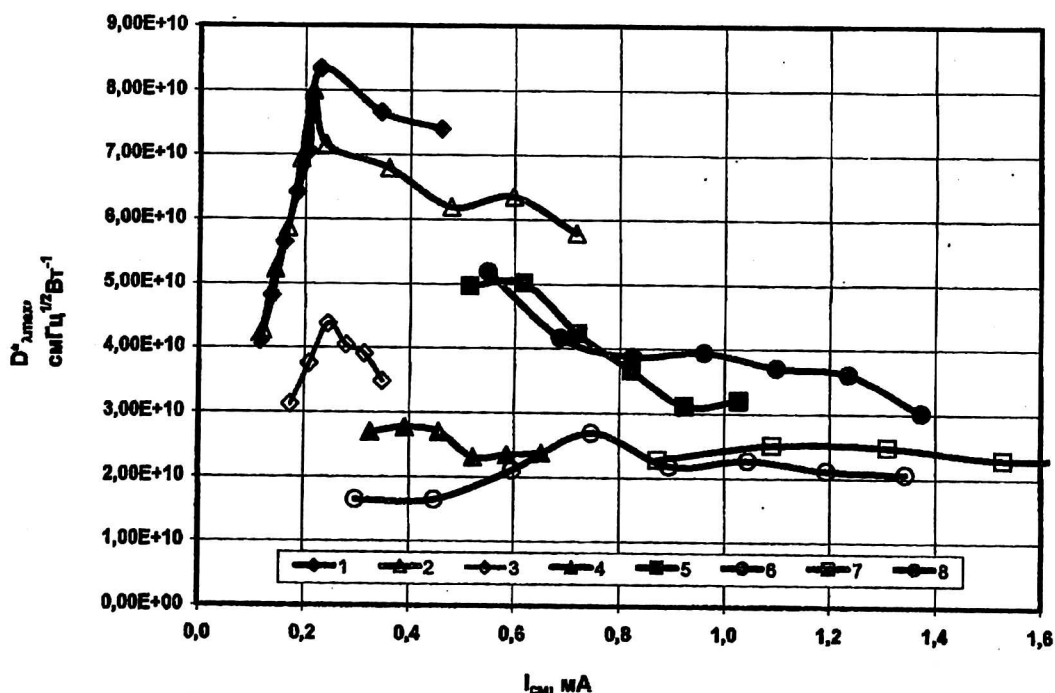


Рис. 4. Зависимость величины $D^*_{\lambda_{max}}$ (λ_{max} , 500 К, 1200 Гц, 1 Гц) от тока смещения:
 1 — λ_{max} = 3,4 мкм, 1×1 мм; 2 — λ_{max} = 3,7 мкм, 1×1 мм; 3 — λ_{max} = 4,2 мкм, 1×1 мм;
 4 — λ_{max} = 5,0 мкм, 0,25×0,25 мм; 5 — λ_{max} = 4,0 мкм, 0,25×0,25 мм; 6 — λ_{max} = 4,0 мкм, 0,1×0,1 мм;
 7 — λ_{max} = 5,5 мкм, 0,25×0,25 мм; 8 — λ_{max} = 5,0 мкм, 0,1×0,1 мм

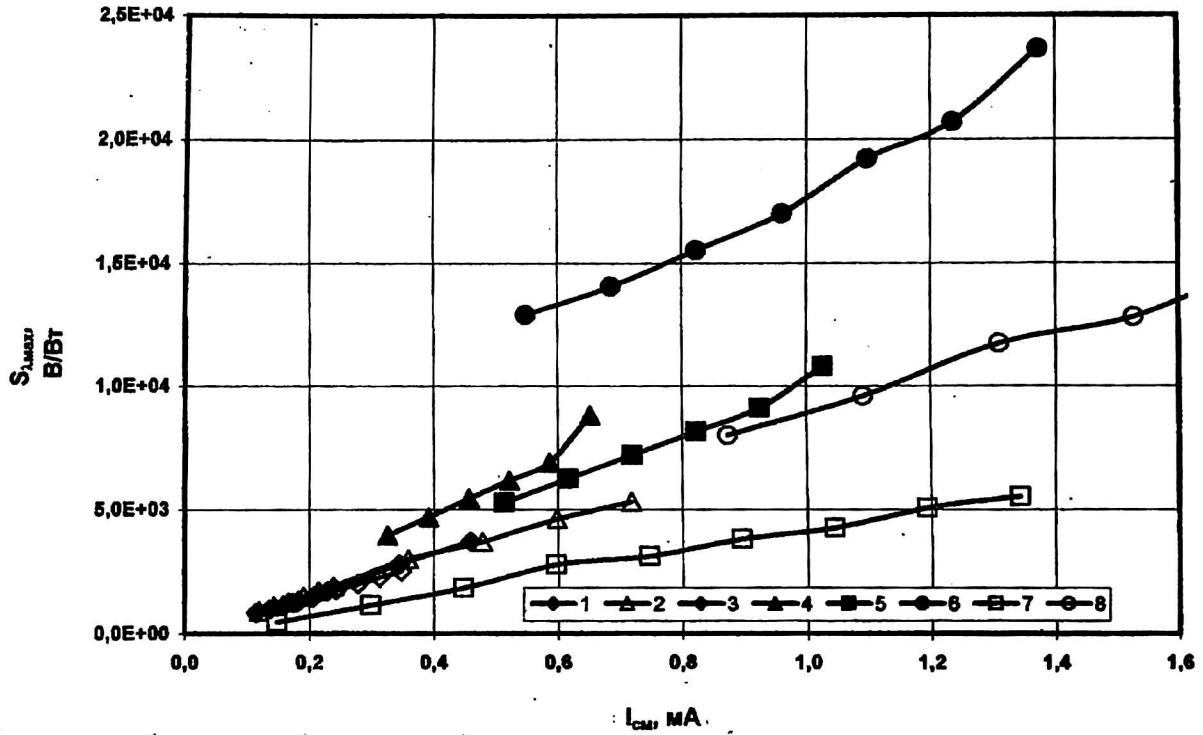


Рис. 5. Зависимость $D^*U_{\lambda_{max}}$ (λ_{max} , 500 К, 1200 Гц) от тока смещения:

1 — $\lambda_{max} = 3,4$ мкм, 1×1 мм; 2 — $\lambda_{max} = 3,7$ мкм, 1×1 мм; 3 — $\lambda_{max} = 4,2$ мкм, 1×1 мм; 4 — $\lambda_{max} = 5,0$ мкм, $0,25 \times 0,25$ мм;
 5 — $\lambda_{max} = 4,0$ мкм, $0,25 \times 0,25$ мм; 6 — $\lambda_{max} = 4,0$ мкм, $0,1 \times 0,1$ мм; 7 — $\lambda_{max} = 5,5$ мкм, $0,25 \times 0,25$ мм; 8 — $\lambda_{max} = 5,0$ мкм,
 $0,1 \times 0,1$ мм

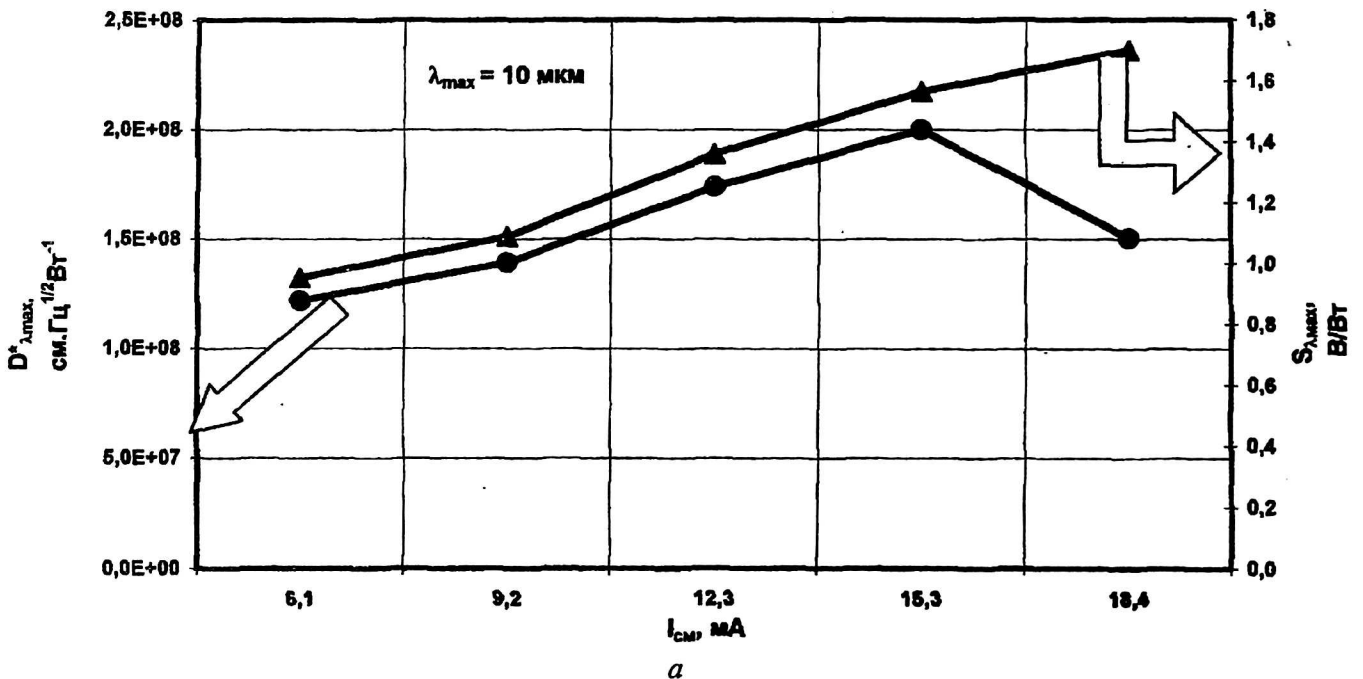


Рис. 6. Зависимости:

a — $D^*_{\lambda_{max}}$ (10 мкм, 500 К, 1200 Гц, 1 Гц) и $S^*_{\lambda_{max}}$ (10 мкм, 500 К, 1200 Гц) от тока смещения для ФЭПП с ФЧЭ размером 1×1 мм;

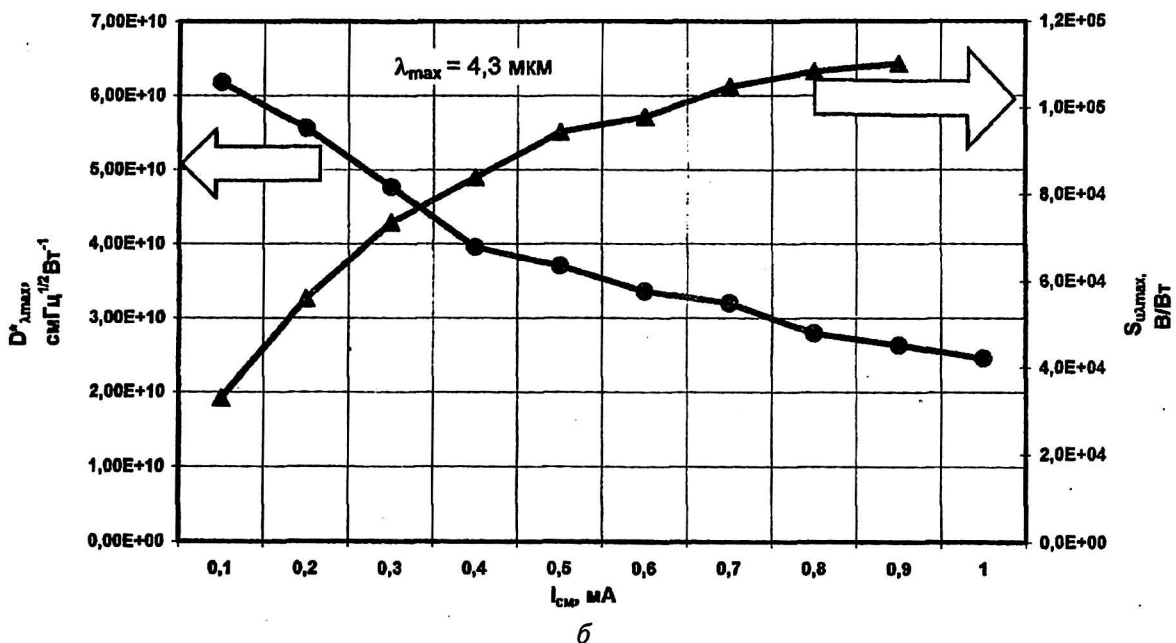


Рис. 6. Окончание.
 б — $D^*_{\lambda_{max}}$ (4,3 мкм, 500 К, 1200 Гц, 1 Гц) и $S^*_{\omega, \lambda_{max}}$ (4,3 мкм, 500 К, 1200 Гц) от тока смещения для ФЭП с ФЧЭ размером 0,05×0,05 мм

Таблица 3

Фотоэлектрические параметры КРТ фоторезисторов с термоэлектрическим охлаждением

Размер чувствит. области А, мм×мм	Тип чувствит. площади	Темновое сопротивление R_r , Ом	Ток смещен. $I_{см}$, мА	Напряжен. смещения $U_{см}$, В	Рабочая температ. $T_{раб}$, К	Длина волны максимума λ_{max} , мкм	Длина волны 50%-го спада $\lambda_{со}$, мкм	Удельн. об-наружит. способность $D^*_{\lambda_{max}}$, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	Вольтовая чувствит. $S_{\omega, \lambda_{max}}$, В/Вт	Время фотоотклика τ , мкс
Относительные КРТ фоторезисторы с трехкаскадным ТЭО/стандартное сапфировое окно с антиотражающим покрытием										
0,05×0,05	1 □	100—300	0,2—1,0	0,02—0,30	≤213	2,9—3,2	3,4—3,8	1,0E11	6,0E4	10
0,1×0,1	Сплит 2	200—800	0,2—1,0	0,04—0,80	≤213	2,9—3,2	3,4—3,8	1,0E11	3,7E4	10
0,25×0,25	Сплит 2	300—1000	0,2—1,0	0,06—1,00	≤213	2,9—3,2	3,4—3,8	1,0E11	2,0E4	10
1×1	Сплит 3	1500—2500	0,2—1,0	0,30—2,50	≤213	2,9—3,2	3,4—3,8	1,0E11	5,0E3	10
1×1	Сплит 3	1500—2500	0,2—1,0	0,30—2,50	≤213	3,2—3,5	3,8—4,1	8,0E10	4,0E3	10
0,1×0,1	Сплит 2	200—800	0,2—1,0	0,04—0,80	≤213	3,7—3,9	4,4—4,6	6,0E10	2,5E4	5
0,25×0,25	Сплит 2	300—1000	0,2—1,0	0,06—1,00	≤213	3,7—3,9	4,4—4,6	6,0E10	1,2E4	5
1×1	Сплит 3	1500—2500	0,2—1,0	0,30—2,50	≤213	3,7—3,9	4,4—4,6	6,0E10	3,0E3	5
0,25×0,25	Сплит 2	300—1000	0,2—1,0	0,06—1,00	≤213	3,9—4,1	4,6—4,8	5,5E10	1,0E4	3
1×1	Сплит 3	1500—2500	0,2—1,0	0,30—2,50	≤213	3,9—4,1	4,6—4,8	5,5E10	2,534	3
0,05×0,05	1 □	100—300	0,2—1,0	0,02—0,30	≤213	4,3—4,5	5,1—5,3	5,0E10	3,0E4	2
0,25×0,25	Сплит 2	300—1000	0,2—1,0	0,06—1,00	≤213	4,3—4,5	5,1—5,3	5,0E10	7,0E3	2
1×1	Сплит 3	1500—2500	0,2—1,0	0,30—2,50	≤213	4,3—4,5	5,1—5,3	5,0E10	1,7E3	2
0,1×0,1	Сплит 2	200—800	0,2—1,0	0,04—0,80	≤213	4,7—5,0	5,5—5,9	3,0E10	1,0E4	2
0,25×0,25	Сплит 2	300—1000	0,2—1,0	0,06—1,00	≤213	4,7—5,0	5,5—5,9	3,0E10	3,0E3	2
0,25×0,25	Сплит 2	300—1000	0,2—1,0	0,06—1,00	≤213	5,0—5,5	5,9—6,5	2,0E10	2,5E3	1

Размер чувствит. области A, мм×мм	Тип чувствит. площади	Темновое сопротивление R_T , Ом	Ток смещения $I_{см}$, мА	Напряжен. смещения $U_{см}$, В	Рабочая температур. $T_{раб}$, К	Длина волны максимума λ_{max} , мкм	Длина волны 50%-го спада $\lambda_{со}$, мкм	Удельн. об-наружит. способность $D^*_{\lambda_{max}}$, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	Вольтовая чувствит. $S_{\lambda_{max}}$, В/Вт	Время фотоотклика τ , мкс
Одноэлементные КРТ фоторезисторы с трехкаскадным ТЭО/стандартное германиевое окно с антиотражающим покрытием										
1×1	Сплит 3	70—150	5,0—25,0	0,35—3,75	≤213	7,5—8,5	8,8—10,0	3,0Е8	3,0	0,5
0,25×0,25	Сплит 4	100—200	5,0—25,0	0,50—5,00	≤213	7,5—8,5	8,8—10,0	3,0Е8	1,5	0,5
1×1	Сплит 3	70—120	5,0—25,0	0,35—3,00	≤213	8,5—10,0	10,0—11,8	2,0Е8	2,0	0,3
2,25×2,25	Сплит 4	100—200	5,0—25,0	0,50—5,00	≤213	8,5—10,0	10,0—11,8	2,0Е8	1,0	0,3
Двухэлементные КРТ фоторезисторы с трехкаскадным ТЭО/стандартное сапфировое окно с антиотражающим покрытием										
0,1×0,1	Сплит 2	200—800	0,2—1,0	0,04—0,80	≤213	3,7—3,9	4,4—4,6	6,0Е10	2,5Е4	5
0,1×0,1	Сплит 2	200—800	0,2—1,0	0,04—0,80	≤213	4,7—5,0	5,5—5,9	3,0Е10	1,0Е4	2
10-элементные КРТ фоторезисторы с трехкаскадным ТЭО/стандартное сапфировое окно с антиотражающим покрытием										
0,05×0,05	1 □	100—300	0,2—1,0	0,02—0,30	≤213	4,3—4,5	5,1—5,3	5,0Е10	3,0Е4	2
Квадрантные КРТ фоторезисторы с трехкаскадным ТЭО/стандартное германиевое окно с антиотражающим покрытием										
4×(1,1×1,1)	Сплит 4	100—200	5,2—25,0	0,50—5,00	≤213	7,5—8,5	8,8—10,0	3,0Е8	3,0	0,5
4×(1,1×1,1)	Сплит 4	100—200	5,2—25,0	0,50—5,00	≤213	8,5—10,0	10,0—11,8	2,0Е8	2,0	0,3

Из приведенных зависимостей следует, что полученные значения удельной обнаружительной способности $D^*_{\lambda_{max}}$ (λ_{max} , 500 К, 1200 Гц, 1 Гц) близки к предельным расчетным значениям для КРТ фоторезисторов при $T_{раб} \approx 205$ К. Оптимально высокие значения удельной обнаружительной способности $D^*_{\lambda_{max}}$ (λ_{max} , 500 К, 1200 Гц, 1 Гц) и вольтовой чувствительности $S_{\lambda_{max}}$ (λ_{max} , 500 К, 1200 Гц) достигаются при низких значениях величины тока смещения: для ФЭПП на диапазон спектра 3,0—5,5 мкм при 0,1—1,0 мА, для ФЭПП — на диапазон спектра 7,5—10,6 мкм при 5,0—15 мА.

Заключение

Разработаны, изготовлены и исследованы ФЭПП с трехкаскадным ТЭО на основе КРТ фоторезисторов. Показано, что приборы обладают высокими значениями основных фотоэлек-

трических параметров и оптимальными потребительскими свойствами. Приборы предлагаются для использования в контрольно-измерительном оборудовании широкого применения.

Выпускаемые ФГУП "Альфа" приборы указанного класса по техническим и эксплуатационным характеристикам конкурентоспособны аналогичным изделиям ведущих мировых производителей, таких как Judson Technologies Inc. (США), British Aerospace Electronics (BAE) Systems Infra-Red Ltd. (Великобритания), Hamamatsu (Япония/США).

Литература

1. Hansen G. L., Schmit J. L., Casselman T. N. // J. Appl. Phys., 1982. V. 53. № 10. P. 7099.
2. Laurenti J. P., Camassel J., Buchemadou A. P., Toulouse B., Legros R., Lussion A. // Ibid. 1990. V. 67. № 10. P. 6454.
3. Blackman M. V., Jenner M. D. // UK Patent Application. № 2027985A. 1980.

Performance of thermoelectrically cooled MCT photoconductors

I. Yu. Lartsev, M. S. Nikitin, G. V. Chekanova
Federal State Unitary Enterprise ALPHA, Moscow, Russia

Wide nomenclature of Photoconductive Mercury-Cadmium Telluride (PC MCT) infrared radiation detectors with three-stage thermoelectric cooler (TEC) has been developed and fabricated. Performance of PC MCT detectors are presented evidencing excellent peak detectivity $D^(\lambda_p)$ and responsivity $R_V(\lambda_p)$ values in spectral ranges from 3,0 to 5,5 μm and from 7,5 to 10,6 μm .*