

УДК 621.383

Зависимость фотоэлектрических параметров КРТ фоторезисторов от плотности потока фонового излучения

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

Федеральное государственное унитарное предприятие "Альфа", Москва, Россия

*Исследованы зависимости величин удельной обнаружительной способности $D^*_{\lambda_{max}}$ и вольтовой чувствительности $S_{U_{\lambda_{max}}}$ охлаждаемых фотоэлектрических полупроводниковых приемников (ФЭПП) на основе фоторезисторов (ФР) из материала кадмий—ртуть—теллур (КРТ) от плотности потока фонового излучения. Уровень фоновой облученности определялся температурой окружающей среды $T_{фон} \approx 295$ К и варьировал от $(8-10)E+17$ до $(6-8)E+15$ фотон·см⁻²·с⁻¹. Измерения $D^*_{\lambda_{max}}$ и $S_{U_{\lambda_{max}}}$ проведены на многоэлементных фоторезисторах (2×32 и 128 элементов) с максимумом спектральной чувствительности на длине волны 10,5—12,0 мкм при рабочей температуре ~ 78 К. Показано, что приемники являются BLIP (background limited performance) ФЭПП.*

Диапазон длин волн от 8 до 14 мкм является весьма предпочтительным для эффективной работы тепловизионных систем обнаружения и распознавания слабо нагретых тел (объектов) в условиях реальной обстановки (сцены), характеризующейся наличием фонового излучения окружающей среды, плотность потока которого определяется температурой окружающей среды $T_{фон}$. Атмосфера имеет окно прозрачности в диапазоне указанных длин волн [1] (рис. 1), в соответствии с законом Вина длины волн, отвечающие максимуму спектральной плотности мощности излучения объектов/сцены с температурой T , К, определяются как $\lambda_{max} \approx 2898/T$, мкм и составляют [2]:

$$\lambda_{max}(-40^\circ\text{C}/233\text{K}) \approx 12,44\text{ мкм};$$

$$\lambda_{max}(-20^\circ\text{C}/253\text{K}) \approx 11,45\text{ мкм};$$

$$\lambda_{max}(0^\circ\text{C}/273\text{K}) \approx 10,62\text{ мкм};$$

$$\lambda_{max}(+20^\circ\text{C}/293\text{K}) \approx 9,89\text{ мкм};$$

$$\lambda_{max}(+30^\circ\text{C}/303\text{K}) \approx 9,56\text{ мкм};$$

$$\lambda_{max}(+40^\circ\text{C}/313\text{K}) \approx 9,26\text{ мкм},$$

т. е. излучение слабо нагретых объектов и фоновое излучение сцены в основном сосредоточены в диапазоне 8—14 мкм. Функция Планка для спектральной плотности мощности излучения табулирована и приведена в работе [3] (см. рис. 1), кроме того, уникальные свойства твердых растворов КРТ позволяют изготавливать ФЭПП на основе многоэлементных фоторезисторов с максимумом спектральной чувствительности λ_{max} от 10,5 до 12,0 мкм (соответственно, с длинноволновой границей спада чувствительности λ_{co} (50 %) от 12,5 до 13,5 мкм) при рабочей температуре ~ 78 К (см. рис. 1).

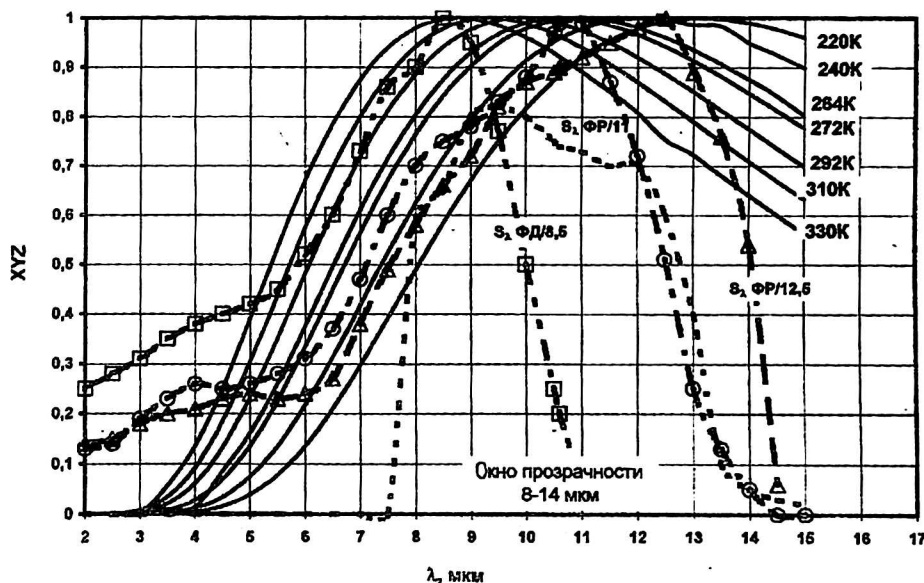


Рис. 1. X — относительная характеристика спектральной плотности мощности ("абсолютно черное тело" с $T = 220-330$ К); Y — относительная спектральная характеристика чувствительности LW ФР & ФД КРТ (S_{λ} ФД/8,5, S_{λ} ФР/11, S_{λ} ФР/12,5); Z — спектральная характеристика пропускания атмосферы в окне прозрачности 8—14 мкм (абсолютные %)

Высококачественные КРТ-фоторезисторы обладают превосходной чувствительностью одновременно как к излучению обнаруживаемых слабо нагретых объектов, так и к излучению сцены, на которой нужно эти объекты идентифицировать по местоположению.

Спектральные характеристики, такие как прозрачность атмосферы, чувствительность ФЭПП, излучения объекта и сцены/фона, существенно перекрываются и создают, с одной стороны, благоприятную возможность формирования реального тепловизионного изображения (реального кадра), а с другой стороны, флуктуации потока фонового излучения “подавляют” обнаружительную способность ФЭПП. Второе обстоятельство легко преодолевается, если имеется в наличии технология изготовления ВЛИР ФЭПП, т. е. ФЭПП, чувствительность которых лимитируется флуктуациями потока фонового излучения вплоть до весьма малых уровней фоновой облученности.

В настоящей статье представлены результаты исследования зависимостей фотоэлектрических параметров многоэлементных охлаждаемых КРТ фоторезисторов (2×32 и 128 элементов) с максимумом спектральной чувствительности λ_{\max} 10,5–12,0 мкм от плотности потока фонового излучения. ФЭПП разработаны и изготавливаются ФГУП “Альфа” и предназначены для использования в формирователях изображения тепловизионных систем широкого применения.

Конструкция фоточувствительных элементов

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

Рабочая температура ФЧЭ составляла $T_{\text{раб}} \approx 78$ К.

Для изготовления ФЧЭ использовались пластины *n*- $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,210-0,220$), концентрация и подвижность основных носителей заряда при $T = 77$ К составляли: $n_{77} \approx (1,5-6,5) \cdot 10^{14}$ см⁻³ и $\mu_{77} \geq 10^5$ см²/(В·с). В соответствии с зависимостью ширины запрещенной зоны $E_g(x, T)$ [4, 5] в указанном выше диапазоне составов и при температуре 78 К ширина запрещенной зоны изменяется от $E_g \approx 0,09$ до $E_g \approx 0,1$ эВ. Следовательно, ожидаемые значения граничной длины волны $\lambda_{\text{со}}(50\%) = 1,24/E_g$ и длины волны в максимуме спектральной чувствительности $\lambda_{\max} \approx 0,85 \lambda_{\text{со}}$ (50 %) лежат в диапазонах: $\lambda_{\text{со}}$ — от $\approx 12,5$ до 13,5 мкм; λ_{\max} — от $\approx 10,5$ до ≈ 12 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. Последние 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 имели классическую квадратную фоточувствительную область, т. е. размер $1 \square$ вдоль пути протекания постоянного тока смещения (рис. 2).

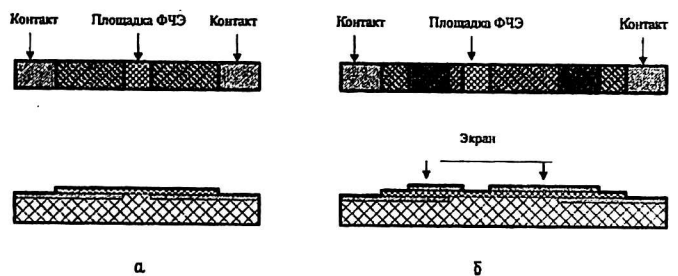


Рис. 2. Топология ФЧЭ КРТ фоторезистора: а — размер 35×35 мкм; б — размер 50×50 мкм (с “затеняющим экраном”); заштрихованные области — металлические электроды/контакты; прозрачная крест-штриховка — фоточувствительные области

ФЧЭ с размером фоточувствительной области 50×50 мкм имели структуру с “затеняющим экраном” [6, 7], позволяющим устранить влияние эффекта “выметания” неравновесных носителей заряда (см. рис. 2). Размер открытой области КРТ вдоль пути протекания постоянного тока смещения составлял примерно 2,5 \square . Чувствительная область 50×50 мкм ($1 \square$) формировалась “затеняющим экраном” и располагалась асимметрично относительно контактных электродов (см. рис. 2). Это дало возможность существенно поднять величину темнового сопротивления фоточувствительных элементов и увеличить вольт-вольтовую чувствительность при малых значениях тока смещения.

Относительные характеристики спектральной чувствительности

Типичные относительные характеристики спектральной чувствительности S_λ ФЭПП с ФЧЭ, изготовленными из материала $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,210-0,220$), измеренные при рабочей температуре 78 К, представлены на рис. 1. Видно, что непрерывный характер зависимости $E_g(x, T)$ позволяет изготавливать ФЭПП со спектральной характеристикой чувствительности, адекватной

спектральному распределению излучения слабо нагретых объектов и сцены, на которой они располагаются.

Фотоэлектрические параметры

Методика расчета обнаружительной способности ФР в режиме ограничения флуктуациями плотности потока фонового излучения рассмотрена в работах [8, 9].

В обычных земных условиях ФЧЭ облучаются фоновым излучением от тел, имеющих температуру окружающей среды, в нашем случае измерения проводились при $T_{\text{фон}} \approx 295$ К. Изменение фоновой облученности в пределах от $(8-10)E+17$ до $(6-8)E+15$ фотон·см⁻²·с⁻¹ осуществлялось с помощью охлаждаемой диафрагмы с различной апертурой. Полный плоский угол поля зрения θ составлял 180, 90, 60, 40, 30 и 10°.

Плотность потока квантов фонового излучения в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 определяется выражением

$$Q_\lambda = 2\pi c \sin^2 \frac{\theta}{2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^4 \{\exp[hc/(\lambda kT)] - 1\}}, \quad (1)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка;
 $c = 2,998 \cdot 10^{10}$ см/с — скорость света в вакууме;
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — постоянная Больцмана;
 T — температура окружающей среды ($T_{\text{фон}} \approx 300$ К);

θ — плоский угол поля зрения.

Для расчетов следует принять $\lambda_1 = 0$ и $\lambda_2 = \lambda_{\text{со}}$, т. е. использовать в вычислениях суммарную плотность потока фотонов фонового излучения в пределах спектральной характеристики чувствительности. В этом случае расчетная удельная обнаружительная способность фоторезистора в режиме ограничения флуктуациями фона (BLIP-режим) определяется формулой

$$D_{\lambda_{\text{max}}}^* (\text{BLIP}) = \frac{\lambda_{\text{со}}}{2hc} \sqrt{\frac{\eta}{Q_\lambda}}, \quad (2)$$

где η — квантовая эффективность.

С учетом френелевского отражения квантовая эффективность принималась равной $\eta = 0,7$ для $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \approx 0,210-0,220$) с поверхностью без оптических покрытий.

Расчетные зависимости $D_{\lambda_{\text{max}}}^* (\text{BLIP})$ КРТ фоторезисторов с $\lambda_{\text{со}}$ от $\approx 12,5$ до 13,5 мкм для различных значений апертуры θ приведены на рис. 3.

Определение ФЭП проводилось по стандартной методике с измерением сигнала от источника "абсолютно черное тело" с температурой 500 К. Частота модуляции тестового излучения составляла 1200 Гц. Типичные значения удельной обнаружительной способности $D_{\lambda_{\text{max}}}^*$ ($\lambda_{\text{max}}, 500$ К, 1200 Гц, 1 Гц) и вольтовой чувствительности $S_{U_{\lambda_{\text{max}}}} (\lambda_{\text{max}}, 500$ К, 1200 Гц) приведены на рис. 4-7.

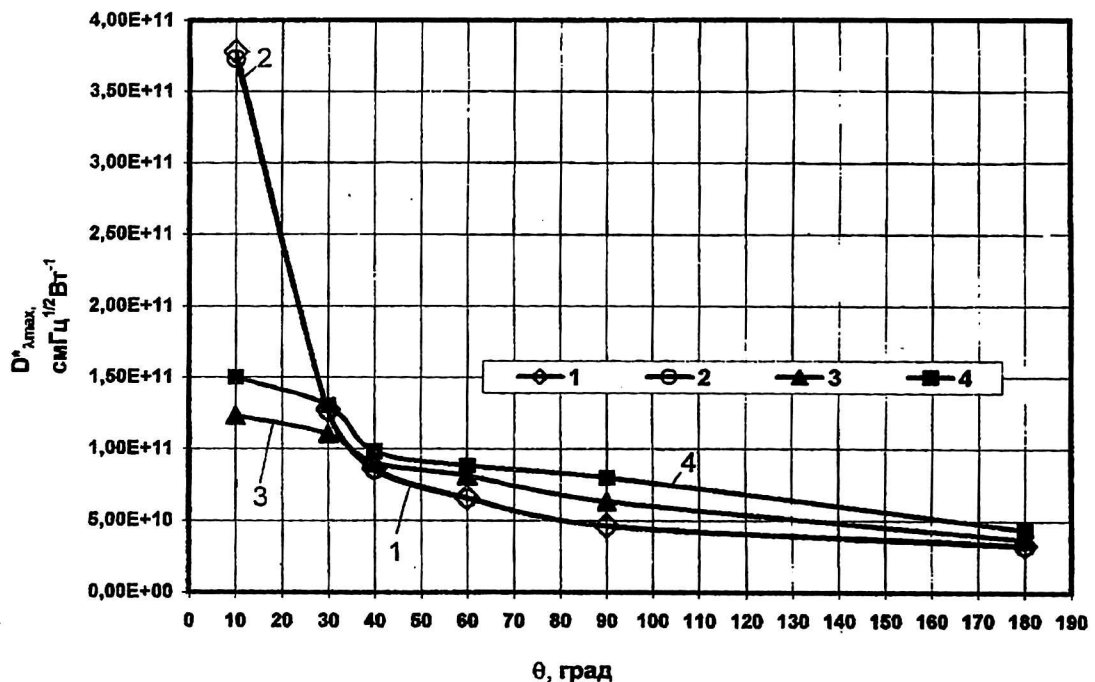


Рис. 3. Расчетные (1, 2) и измеренные (3, 4) зависимости величины D^* от величины плоского угла поля зрения (FOV). Температура фона около 300 К: 1 — расчет $\lambda_{\text{со}} = 12$ мкм; 2 — расчет $\lambda_{\text{со}} = 13$ мкм; 3 — эксперимент $\lambda_{\text{со}} = 12,5$ мкм, $A = 0,05 \times 0,05$ мм; 4 — эксперимент $\lambda_{\text{со}} = 12,5$ мкм, $A = 0,035 \times 0,035$ мм

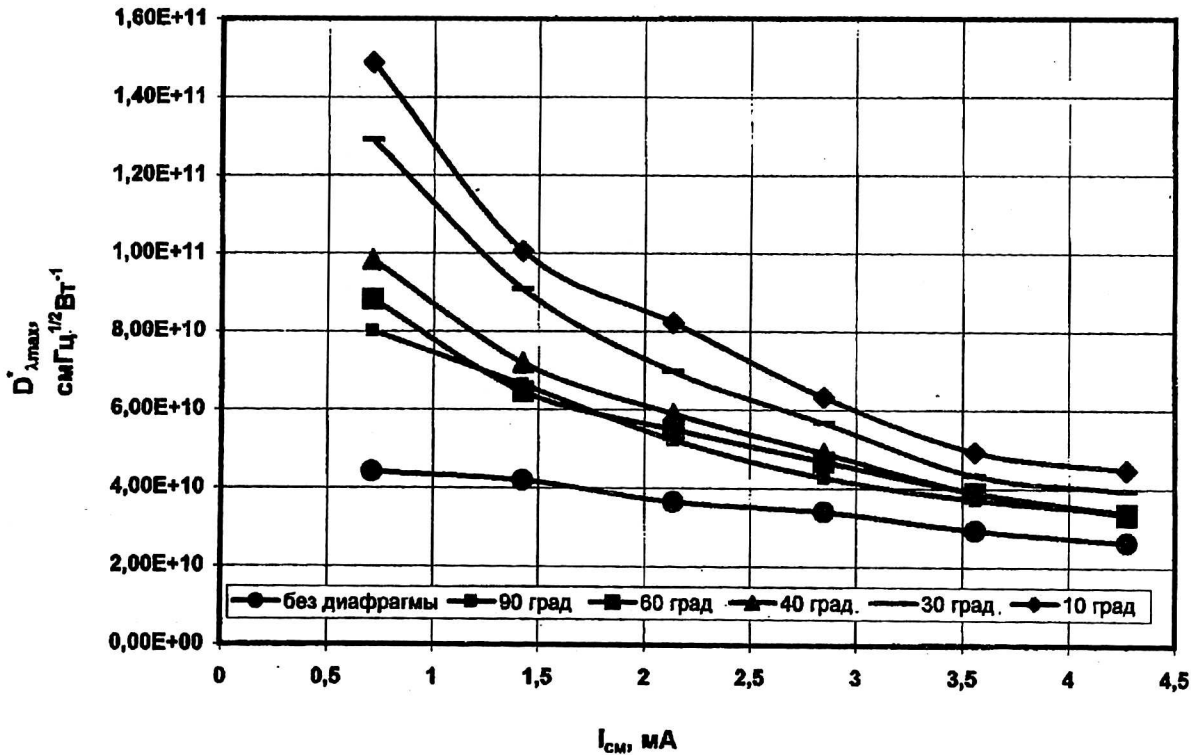


Рис. 4. Зависимость $D^*_{λmax}$ (11 мкм, 500 К, 1200 Гц, 1 Гц) от тока смещения для ФЭП с ФЧЭ размером 0,035×0,035 мм

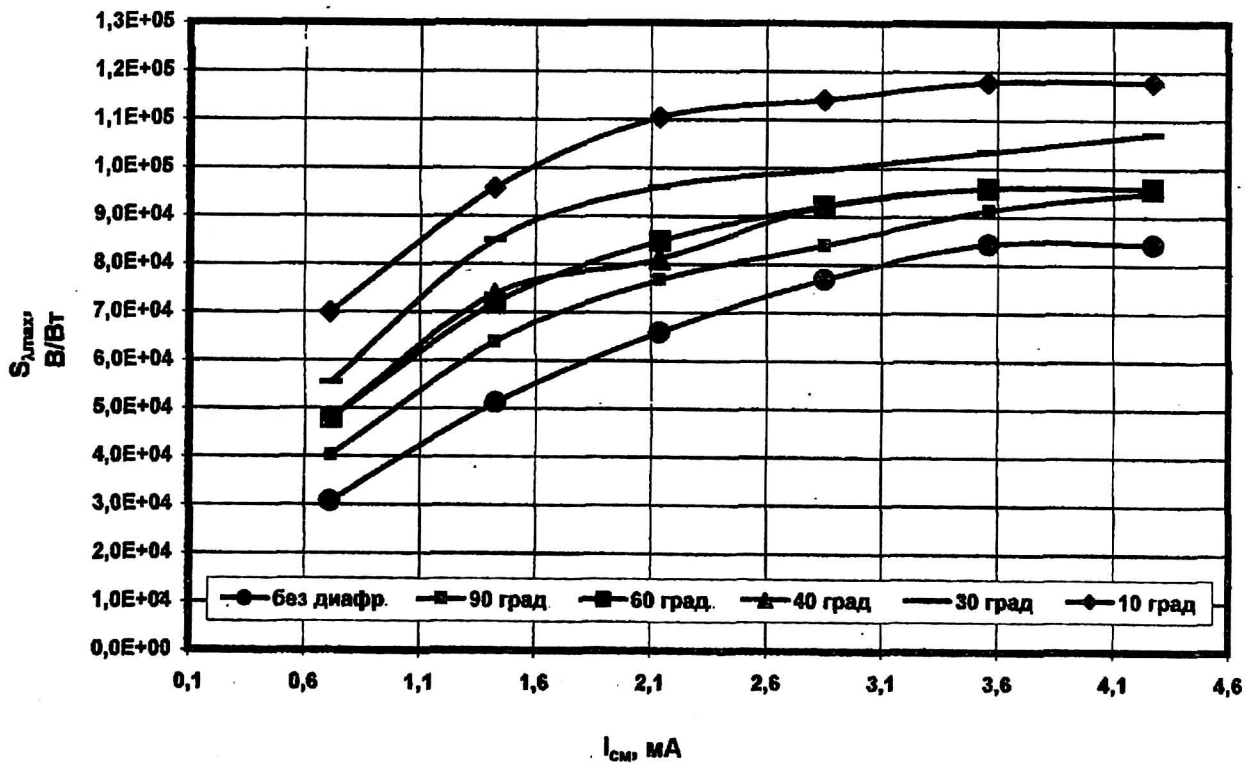


Рис. 5. Зависимость $S_{λmax}$ (11 мкм, 500 К, 1200 Гц) от тока смещения для ФЭП с ФЧЭ размером 0,035×0,035 мм

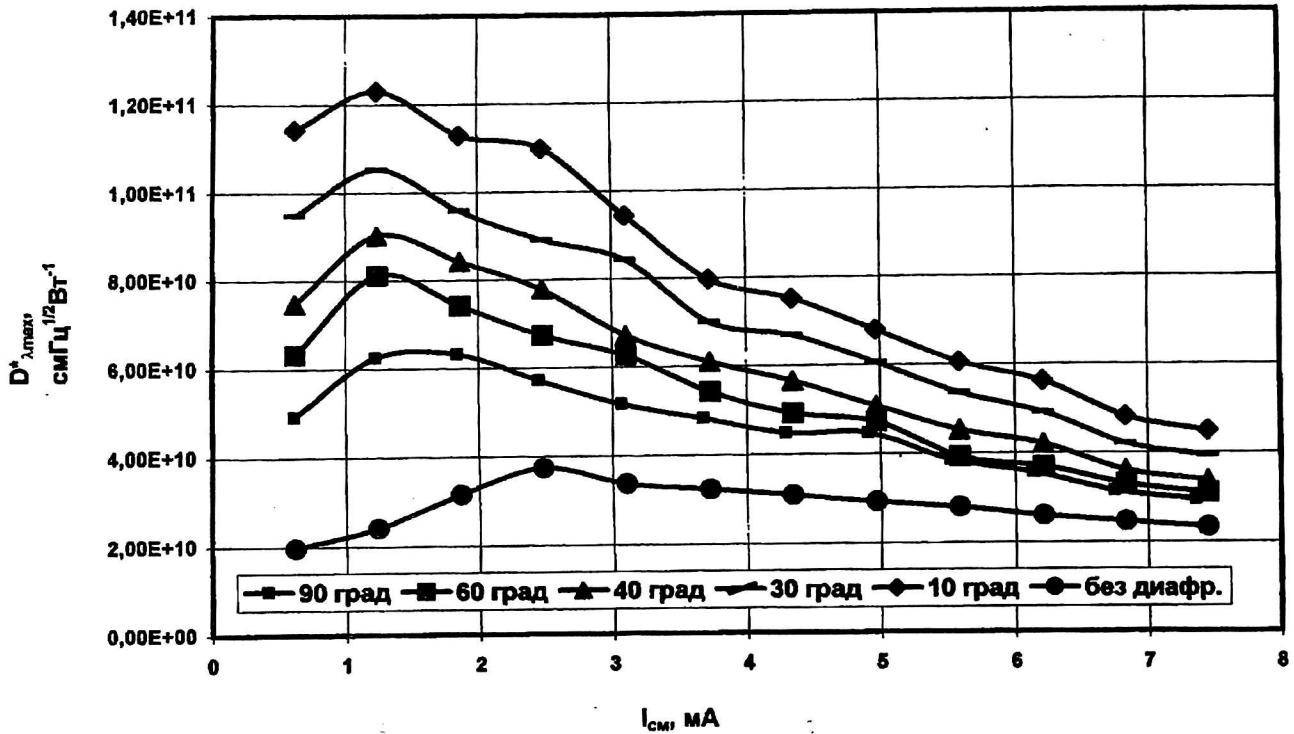


Рис. 6. Зависимость $D^*_{\lambda_{max}}$ (11 мкм, 500 К, 1200 Гц, 1 Гц) от тока смещения для ФЭП с ФЧЭ размером $0,05 \times 0,05$ мм

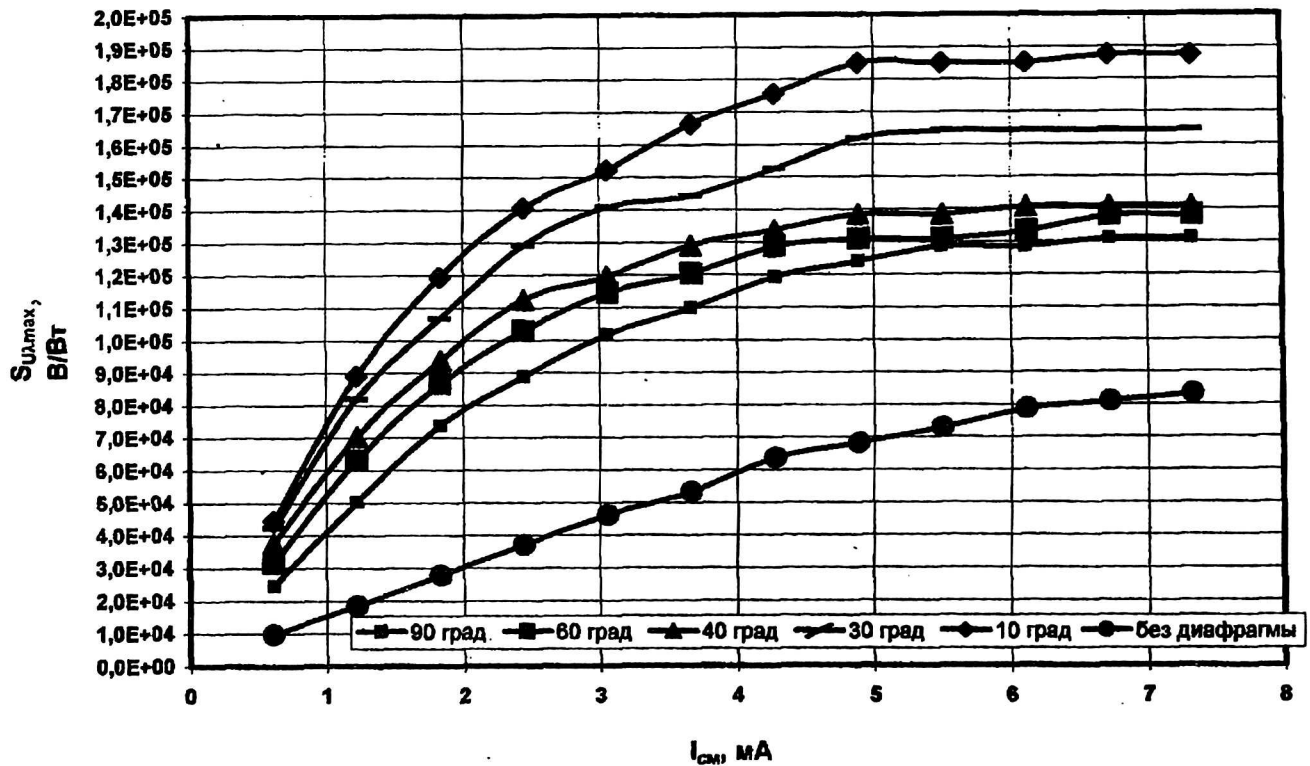


Рис. 7. Зависимость $S_{U\lambda_{max}}$ (11 мкм, 500 К, 1200 Гц) от тока смещения для ФЭП с ФЧЭ размером $0,05 \times 0,05$ мм

Из приведенных зависимостей следует, что измеренные значения удельной обнаружительной способности $D^*_{\lambda_{\max}}(\lambda_{\max}, 500 \text{ К}, 1200 \text{ Гц}, 1 \text{ Гц})$ близки к предельным расчетным значениям для КРТ фоторезисторов при $T_{\text{раб}} \approx 78 \text{ К}$ (см. рис. 3). Оптимально высокие значения удельной обнаружительной способности $D^*_{\lambda_{\max}}(\lambda_{\max}, 500 \text{ К}, 1200 \text{ Гц}, 1 \text{ Гц})$ и вольтовой чувствительности $S_{U\lambda_{\max}}(\lambda_{\max}, 500 \text{ К}, 1200 \text{ Гц})$ достигаются при низких уровнях фоновой облученности и малых величинах тока смещения ФЧЭ в диапазоне 1,0—2,0 мА. Значительный рост величины фотосигнала при уменьшении плотности потока фонового излучения может быть обусловлен ростом времени жизни и концентрации неравновесных носителей заряда при снижении темпа генерации фоновым излучением [10]. На рис. 8 показана пиктограмма распределения $D^*_{\lambda_{\max}}$ по 128 площадкам линейного фоточувствительного элемента ФЭПП с $\lambda_{\max} = 11 \text{ мкм}$ при $\approx 50^\circ$ и одинаковом значении величины тока смещения 2 мА для всех площадок. Более 95 % площадок имеют значение $D^*_{\lambda_{\max}} = 8,4\text{E}+10 \text{ см}\cdot\text{Гц}^{1/2}\cdot\text{Вт}^{-1} \pm 10 \%$, т. е. одинаковы по

$D^*_{\lambda_{\max}}$ в пределах ошибки измерения данного параметра.

Заключение

Многоэлементные ФЭПП на основе ФР из $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \approx 0,210-0,220$) обладают высокими значениями основных фотоэлектрических параметров при $T_{\text{раб}} \geq 78 \text{ К}$, что позволяет рассматривать их как не имеющих конкурентов для применений, связанных с получением надежного и достоверного теплового изображения объектов, имеющих температуру, примерно равную температуре окружающей среды на фоне ландшафта (обстановки) с температурой, примерно равной температуре окружающей среды. Это очевидно, поскольку ФЭПП на основе ФР КРТ обладают превосходными значениями D^* в диапазоне длин волн $\geq 10 \text{ мкм}$, что недостижимо для ФЭПП на основе ФД КРТ, которые могут обладать высокими значениями D^* только при $T_{\text{раб}} \leq 78 \text{ К}$ и только лишь в диапазоне длин волн $< 10 \text{ мкм}$ [11]. Приборы предлагаются для использования в формирователях изображения тепловизионных систем широкого применения.

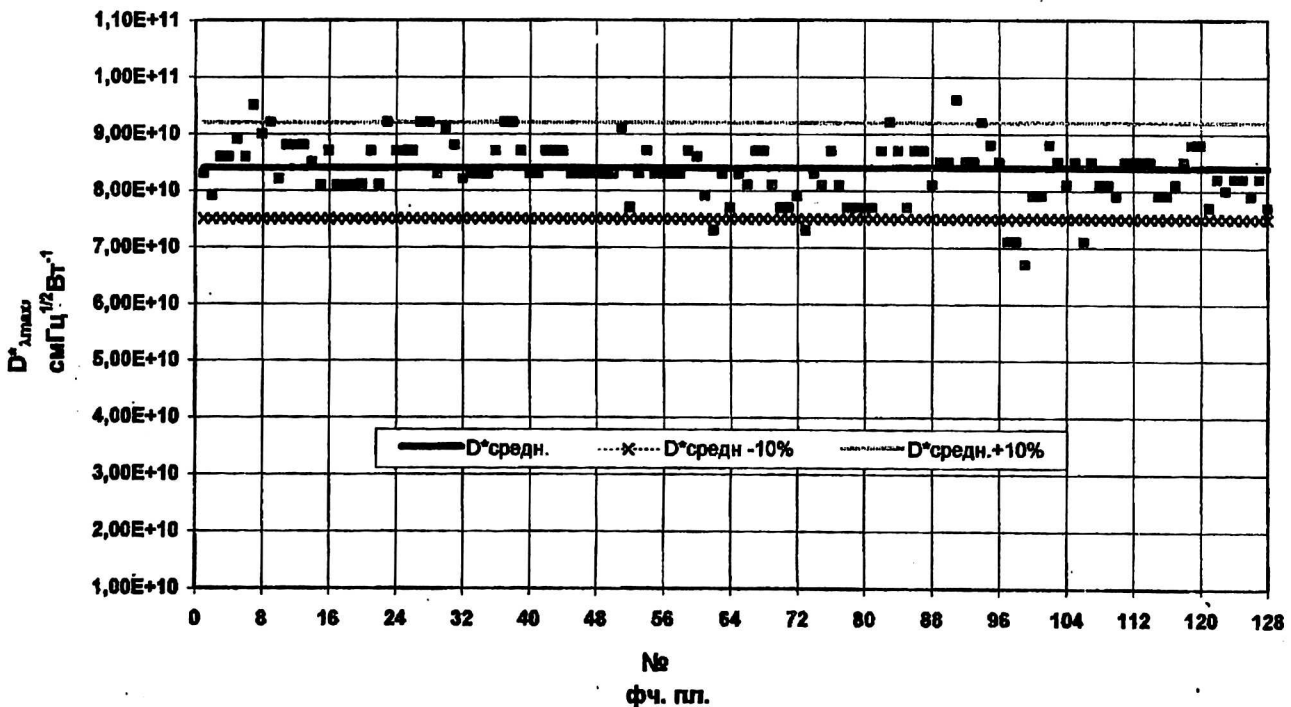


Рис. 8. Распределение значений $D^*_{\lambda_{\max}}$ по 128 площадкам линейного фоточувствительного элемента (апертура $\theta = 50^\circ$; $A = 0,05 \times 0,05 \text{ мм}$; $I_{\text{см}} = 2 \text{ мА}$ на каждой площадке)

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), SCD Semiconductor Devices (Израиль).

Литература

1. Филиппов В. Л., Макаров А. С., Иванов В. П. Оптическая погода в нижней тропосфере. — Казань: Дом печати, 1998.
2. Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел. — М.: Наука, 1964.

3. Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. — М.: Наука, 1964.
4. Hansen G. L., Schmit J. L., Casselman T. N.// J. Appl. Phys. 1982. V. 53. № 10. P. 7069.
5. Laurenti J. P., Camassel J., Buchemadou A. P., Toulouse B., Legros R., Lusson A.// Ibid. 1990. V. 67. № 10. P. 6454.
6. Kinch M. A., Borello S. R., Breazeale D. H., Simmons A.// Infrared Physics. 1977. V. 17. № 2. P. 137.
7. Sano M., Miyamoto K., Oda N., Fujino Y.// Proceedings of SPIE. 1996. V. 2744. P. 2.
8. Курбатов Л. Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. — М.: МФТИ, 1999.
9. Куес Р. Дж. Фотоприемники видимого и инфракрасного диапазона спектра. — М.: Радио и связь, 1985.
10. Borello S., Kinch M. A., LaMont D.// Infrared Physics. 1977. V. 17. № 2. P. 121.
11. Manissadjian A., Costa P., Tribolet P., Destefanis G.// Proceedings of SPIE. 1998. V. 3436. P. 150.

Variations of MCT photoconductors performance with background flux density

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

Variations of peak detectivity $D^(\lambda_p)$ and peak responsivity $R_V(\lambda_p)$ values with background flux density have been examined on Photoconductive Mercury-Cadmium Telluride/ $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (PC MCT) infrared radiation detectors. Measurements were performed at operating temperature $T_{op} \approx 78$ K. Performance was examined on multi-element PC MCT infrared radiation detectors ($N = 3 \times 32$ and 128 elements) with responsivity peak wavelength λ_p from 10,5 to 12,5 μm at the background flux density from $(8-10)E+17$ to $(6-8)E+15$ $photon \cdot cm^{-2} \cdot sec^{-1}$. Tested PC MCT detectors demonstrate background limited performance (BLIP).*