

Очевидно, что новая система параметров ФПУ должна опираться на ясное понимание физической картины работы фотоприемного слоя совместно с электроникой первичной обработки и считывания сигнала в реальной оптической системе. Она должна обеспечить и стимулировать взаимопонимание разработчиков и пользователей как современных, так и перспективных ФПУ. В качестве первого конкретного шага предлагается организовать инициативную группу, задачей которой будет

обобщение существующих представлений по проблемам технического облика ФПУ нового поколения и разработки новой системы параметров ФПУ и методик их измерения, и которая вынесет на обсуждение научно-технической общественности свое видение основных нерешенных проблем с тем, чтобы эти ключевые проблемы были поставлены государством для решения способным на это организациям и специалистам.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

The general features required of future generation IR-detectors

Yu. I. Belousov

Scientific Design Centre "Electro-Optical Surveillance Systems" —
The Branch of «Central Scientific Research Institute "Kometa"», St.-Petersburg, Russia

IR detectors (IRD) must have ahead developing in according with highly important function at opto-electronics systems designing. It is appropriate to discuss the most significant properties of foreseeable future generation IRD, as they determinate the appearance of the newest IR devices. There are two problems that can be solved only by joint efforts of originators and consumers of IRD. In general terms the first problem may be designated as the problem of predicating new potentials of modern IRD. The second problem is to determinate the set of necessary and sufficient properties IRD and their measurement methods for completely characterization the same objects. The future generation of IRD is not result of ordinary increasing the number and sensitivity of FPA elements only. IRD must have capability to register such physical parameters of optical fields that are distinctive features of real targets contrary to the false same and to background.

УДК 621.384.3

Оценка эффективности использования одно- и двухспектральных матричных фотоприемников на основе структур с квантовыми ямами

А. А. Солодков

Федеральное государственное унитарное предприятие "22 ЦНИИИ МО РФ",
Мытищи, Московская обл., Россия

В. Б. Куликов

Федеральное государственное унитарное предприятие «НИИ "Полус" им. М. Ф. Стельмаха»,
Москва, Россия

Приведены методика и результаты расчетной оценки эффективности применения в приборном комплексе матричных фотоприемников (МФП) на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ).

Матричные фотоприемники на основе МСКЯ представляют динамично развивающееся современное направление создания изделий фотоэлек-

троники. Ряд положительных качеств данных МФП (повышенная стойкость к воздействию ионизирующих и лазерных излучений, простота реа-

лизации чувствительности в различных спектральных диапазонах, ориентация на достаточно хорошо отработанную GaAs-технологии и др.) обеспечивает им хорошие конкурентные условия среди других МФП. Привлекательна также возможность создания на базе МСКЯ двухспектральных МФП на отечественной технологической базе.

Для выбора оптимальных направлений развития МФП на основе МСКЯ требуется всесторонняя оценка эффективности их применения в составе приборных комплексов. В качестве показателя эффективности целесообразно использовать такие универсальные критерии, как дальность обнаружения и дальность распознавания объекта наблюдения.

Методика определения численных значений критериев основана на выполнении энергетического расчета с использованием спектральных и пространственно-частотных (частотно-контрастных) характеристик всех звеньев информационного канала "объект наблюдения—атмосфера—прибор—наблюдатель". Общая схема структурных элементов, учитываемых в процессе расчета значений показателя эффективности, представлена на рис. 1.

• Для определения напряжений сигналов от элементов МФП, визирующих или элементы конструкции объекта наблюдения, или прилегающий к нему фон, использовалось соотношение, сформированное с учетом рекомендаций [1, 2]

$$U_s = \frac{D_{os}^2 A_F T_i G K_U}{4 F_{os}^2 q} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda) \tau_a(\lambda, L) \tau_{os}(\lambda) S_i(\lambda) d\lambda,$$

где D_{os} — диаметр входного зрачка оптической системы прибора;

A_F — площадь чувствительной поверхности элемента МФП;

T_i — время интегрирования сигнала на накопительной емкости коммутатора;

G — коэффициент преобразования излучения в электрический сигнал;

K_U — коэффициент усиления сигнала видеоусилителем;

F_{os} — фокусное расстояние оптической системы;

q — заряд электрона;

$W(\lambda)$ — спектральная плотность потока излучения от объекта или фона;

$\tau_a(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания излучения атмосферой;

$\tau_{os}(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания излучения оптической системой;

$S_i(\lambda)$ — спектральная характеристика токовой чувствительности элементов МФП;

λ — длина волны оптического излучения;

L — дальность до объекта наблюдения.

• Для определения реализуемого на экране видеомодуля отображения информации отношения сигнал/шум, скорректированного с учетом эффекта временного и пространственного интегрирования зрительным анализатором наблюдателя сигналов от протяженных (неточечных) объектов, использовалось соотношение

$$M = \frac{\Delta U_s}{U_N} H_S(\gamma) \left(\frac{T_e F_k A_{IZ}}{A_F N_P} \right)^{0,5},$$

где ΔU_s — разность напряжений сигналов от объекта и фона;

U_N — напряжение шума, создаваемого электронными компонентами прибора;

H_S — частотно-контрастная характеристика прибора;

T_e — время интегрирования сигнала зрительным анализатором;

F_k — частота смены кадров в приборе;

A_{IZ} — площадь изображения объекта в фокальной плоскости МФП;

N_P — количество различимых фрагментов (в виде полос) изображения объекта.

• Для определения частотно-контрастной характеристики прибора использовалось соотношение

$$H_S(\gamma) = H_a(\gamma) H_{os}(\gamma) H_F(\gamma) H_E(\gamma) H_D(\gamma),$$

где $H_a(\gamma)$ — частотно-контрастная характеристика атмосферного канала;

$H_{os}(\gamma)$ — частотно-контрастная характеристика оптической системы прибора;

$H_F(\gamma)$ — частотно-контрастная характеристика МФП МСКЯ;

$H_E(\gamma)$ — частотно-контрастная характеристика узла электронной обработки сигнала;

$H_D(\gamma)$ — частотно-контрастная характеристика устройства отображения.

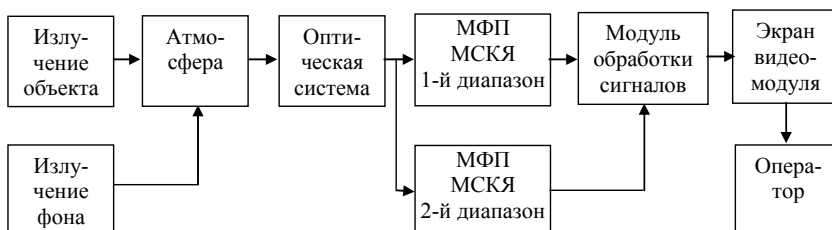


Рис. 1. Общая схема структурных элементов, учитываемых в процессе определения значений показателя эффективности

Частотно-контрастные характеристики указанных выше звеньев моделировались реальными характеристиками, представленными в виде цифровых файлов.

• Для определения напряжения шума, создаваемого электронными компонентами прибора, использовалось соотношение, учитывающее флуктуации фона и темновой ток в МФП МСКЯ

$$U_N = \left[U_S + (I_D T_i G q^{-1})^2 + U_{NU}^2 \right]^{0,5},$$

где I_D — темновой ток элементов МСКЯ;

U_{NU} — напряжение шума от усилителя сигналов.

• Пороговое отношение сигнал/шум, обеспечивающее распознавание изображения объекта на экране устройства отображения с заданной вероятностью, определялось из следующего эмпирического соотношения [3]

$$P_R = \left\{ 1 - \exp[-0,018(N_I + 1)^2] \right\} \times \left\{ 1 - \exp[-0,15(M_{DP} - 1)^2] \right\},$$

где N_I — количество строк растра индикатора устройства отображения информации, при-

ходящееся на вертикальный размер объекта;

M_{DP} — пороговое отношение сигнал/шум.

• Для определения площади изображения объекта в фокальной плоскости МФП и количества строк растра на индикаторе устройства отображения информации, приходящегося на вертикальный размер объекта (отражающее практику принятия решений операторами в соответствии с критерием Джонсона [3]), использовались следующие соотношения:

$$A_{Iz} = A_G A_V F_{os} L^{-1} \text{ и } N_I = A_V h_V^{-1},$$

где A_G — размер объекта наблюдения по горизонтали;

A_B — размер объекта наблюдения по вертикали;
 h_V — шаг чувствительного элемента МФП МСКЯ по вертикали.

Практические расчеты выполнялись применительно к сценарию, определяющему необходимость одновременного наблюдения излучающих различные уровни энергии объектов на различных фонах. Перечень основных и дополнительных объектов наблюдения и фонов представлен в табл. 1, а исходные данные для выполнения расчетов — в табл. 2.

Таблица 1

Объект наблюдения	Источник излучения объекта наблюдения	Типовой фон	Дополнительные объекты наблюдения	Требуемый результат наблюдения
Ракета	Факел твердотопливного двигателя	Лесной массив	Транспортное средство на фоне лесного массива	Одновременное наблюдение транспортного средства и факела двигателя ракеты
Самолет	Факел газотурбинного двигателя	Участок неба над лесным массивом	Линия раздела лесного массива и неба	Одновременное наблюдение линии раздела и факела двигателя самолета
Транспортное средство	Нагретые элементы конструкции	Лесной массив	—	Распознавание типа транспортного средства

Таблица 2

Наименование параметра	Значения параметров, вид характеристики
Проекция объектов наблюдения: ракета (хвостовая) самолет (хвостовая) транспортное средство (лобовая)	$N_p = 1; A_G = A_V = 1 \text{ м}; W(\lambda)$ — рис. 2, характеристика 1 $N_p = 1; A_G = A_V = 2,1 \text{ м}; W(\lambda)$ — рис. 2, характеристика 2 $N_p = 7; A_G = A_V = 0,5 \text{ м}; \Delta W(\lambda)$ — рис. 3
Параметры атмосферы	Стандартная модель LOWTRAN, $\tau_a = 0,8 \text{ км}^{-1}$
Параметры оптической системы	$D_{os} = 10 \text{ см}; F_{os} = 20 \text{ см}$
Параметры МФП МСКЯ: на диапазон 3—5 мкм (77 К) на диапазон 7—9 мкм (77 К)	$A_F = (25 \times 25) \cdot 10^{-12} \text{ см}^2; h_V = 30 \cdot 10^{-6} \text{ см}; T_i = 10^{-4} \text{ с}; G = 10^{-8}; I_D = 10^{-12} \text{ А}; S_i(\lambda)$ — рис. 4, характеристика 1; значение в максимуме характеристики — 0,6 А/Вт $A_F = (25 \times 25) \cdot 10^{-12} \text{ см}^2; h_V = 30 \cdot 10^{-6} \text{ см}; T_i = 10^{-2} \text{ с}; G = 10^{-8}; I_D = 10^{-12} \text{ А}; S_i(\lambda)$ — рис. 4, характеристика 2; значение в максимуме характеристики — 0,4 А/Вт
Параметры усилителя сигналов	$K_U = 100; U_{NU} = 10^{-9} \text{ В}$
Параметры устройства отображения	$F_k = 25 \text{ кадр/с}$
Параметры зрительного анализатора	$T_e = 0,2 \text{ с}; P_R = 0,8$

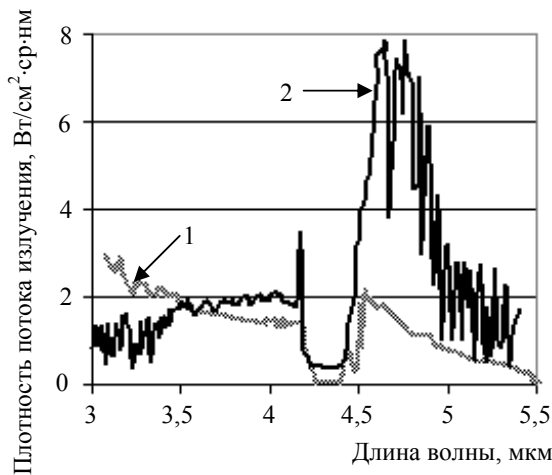


Рис. 2. Спектральные характеристики излучения факелов твердотопливной ракеты (1) и газотурбинного двигателя (2) при визировании в направлении хвостовой проекции [4]

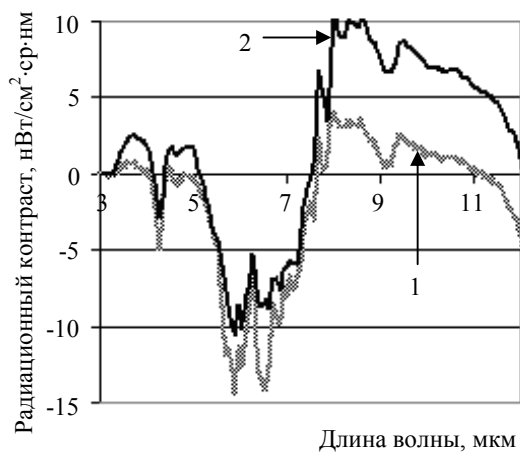


Рис. 3. Спектральная характеристика (среднее — 1 и максимальное — 2 значения) радиационного контраста транспортного средства (лобовая проекция) на фоне леса [5]

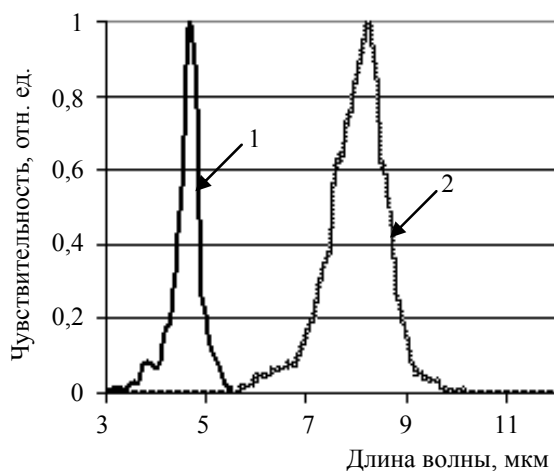


Рис. 4. Спектральные характеристики (нормированные) чувствительности МФП МСКЯ для диапазонов 3—5 мкм (1) и 7—9 мкм (2) [6]

По результатам расчетов получены следующие значения отношения сигнал/шум, составившие при визировании факела:

твердотопливной ракеты (в диапазоне дальностей 500—2000 м) — $(3,5—4,5) \cdot 10^4$;

газотурбинного двигателя (в диапазоне дальностей 500—10000 м) — $(3—7) \cdot 10^4$ (рис. 5)

Дальность распознавания транспортного средства составила примерно 1300 м.

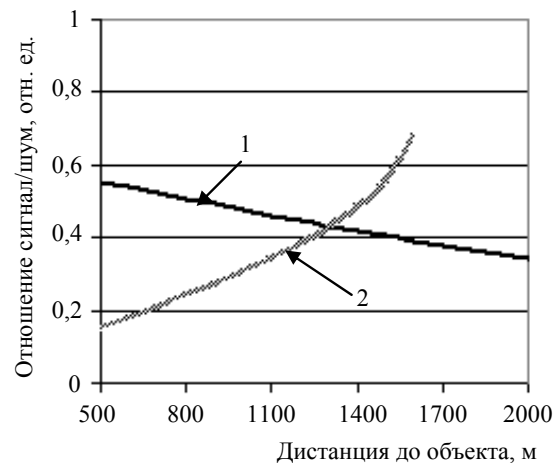


Рис. 5. Изменение значений реализуемого прибором (1) и порогового для наблюдателя (2) отношений сигнал/шум

Выводы

1. Расчетная оценка эффективности применения МФП МСКЯ в составе приборного комплекса с использованием реальных спектральных характеристик излучения объектов наблюдения и фонов показала возможность реализации режима одновременного наблюдения сильно- и слабоконтрастных объектов, соответственно, в средневолновом (3—5 мкм) и длинноволновом (7—9 мкм) участках ИК-диапазона.

2. Фотоприемники каждого из диапазонов, охлаждаемые до температуры 77 К, в рамках единой конструкции могут последовательно накапливать сигнал от источников излучения, причем общее время накопления укладывается в пределы допустимого для времени формирования кадра при заданной частоте смены информационных кадров. Имеющийся в средневолновом канале запас в части отношения сигнал/шум позволяет уменьшить размеры приемника и время накопления, что дает возможность оптимизировать в целом конструкцию двухспектрального МФП на основе МСКЯ.

Литература

1. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. — М.: Логос, 2004. — 444 с.

2. Cooke B. J., Laubsher B. E., Borel C. C. et al. Methodology for rapid infrared multi-spectral electro-optical imaging system performance analysis and synthesis// SPIE Proc. 1996. V. 2743. P. 52—86.

3. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ./ Под ред. А. И. Горячева — М.: Мир, 1978. — 416 с.

4. Heikell J. Electronic warfare self-protection of battlefield helicopters: a holistic view. — Finland, Helsinki University of

Technology, Applied electronics laboratory, Series E: Electronics Publications E18.

5. Schwarts C. R., Eismann M. T., Cederquist J. N. et al. Thermal multispectral detection of military vehicles in vegetated and desert backgrounds// SPIE Proc. 1996. V. 2742. P. 286—297.

6. Куликов В. Б., Залевский И. Д., Бородин Д. В. и др. Инфракрасные фотоприемники на основе структур с квантовыми ямами// Электронная промышленность, 2003. № 2. С. 143—150.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Estimation for effectiveness of use of mono- and two-spectral focal plane arrays based on quantum well structures

A. A. Solodkov

The 22-nd Central Research Institute, Mytichshi, Moscow Region, Russia

V. B. Kulikov

Polyus Research Institute, Moscow, Russia

Account is taken of methods and results of calculation estimation for effectiveness of use of focal plane arrays based on multilayer structures with quantum wells, which are built up in to an instrumentation module.

УДК 621.315.592

Формирование фотодиодов на основе n -HgCdTe имплантацией As^+

В. В. Васильев, В. С. Варавин, Т. И. Захарьяш, Д. Ю. Протасов,
Р. Н. Смирнов, Д. Г. Икусов

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Имплантацией мышьяка в слои HgCdTe n -типа, выращенные методом МЛЭ на подложках из GaAs, изготовлены p^+ - n -переходы. Профили распределения мышьяка после легирования были измерены с помощью вторичной ионной масс-спектропии (ВИМС). Для электрической активации атомов мышьяка применялся двухстадийный отжиг. Тестовые фотодиоды были изготовлены по меза-технологии. Плотность темнового тока для полученных фотодиодов при смещении $U = -0,1$ В составляет $\sim 0,04$ А/см². Значение произведения $R_0 \cdot A$ лежит в диапазоне 20—28 Ом·см² ($\lambda_s = 9,7$ мкм). Оценка интегральной амперваттной чувствительности дает значение $S = 1,92$ А/Вт.

Фотоприемные устройства (ФПУ) на основе тройного раствора $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ) широко применяются для регистрации ИК-излучения, превосходя своих конкурентов по большинству параметров. В качестве фотоприемных элементов в матричных ФПУ больших форматов используются фотодиоды, так как они в отличие от фоторезисто-

ров обладают низкой мощностью рассеивания и могут быть легко мультиплексированы на фокальной плоскости [1].

В настоящее время для создания фотодиодов наиболее широко применяются образцы КРТ с p -типом проводимости. Это связано прежде