

УДК 535.317; 621.283.4/5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ОХЛАЖДАЕМОЙ ДИАФРАГМЫ ТЕПЛОВИЗОРА

© А. Р. Новоселов, С. В. Хрящёв, П. А. Алдохин,
П. П. Добровольский, К. П. Шатунов

*Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1
E-mail: novoselov@isp.nsc.ru*

Приведены результаты численного моделирования облучённости паразитным излучением охлаждаемого матричного фотоприёмника в криостате при разных формах и конструкциях холодной диафрагмы. Выяснено, что оптимальной формой холодной диафрагмы является цилиндр с двумя внутренними блендами (дополнительными диафрагмами). Уровень облучённости матричного фотоприёмника паразитным излучением составляет около $9,82 \cdot 10^{-5}$ Вт/см² при неравномерности распределения по площади около 3 %.

Ключевые слова: фотоприёмные устройства, криостат, охлаждаемая диафрагма, инфракрасное излучение.

DOI: 10.15372/AUT20230412

Введение. Основой охлаждаемых тепловизоров, чувствительных в спектральном диапазоне 8–12 мкм, является гибридная сборка (ГС), состоящая из фотоприёмника на основе узкозонного полупроводникового материала и кремниевого мультиплексора. Гибридная сборка устанавливается в охлаждаемый криостат на пьедестал [1]. Тепловое изображение наблюдаемого объекта, сформированное объективом через входное окно криостата, попадает на ГС, которая преобразует его в электрический сигнал. Рабочая температура фотоприёмника на основе плёнок кадмий—ртуть—теллур составляет 77–100 К, поэтому ГС охлаждают в криостате до температур жидкого азота. Конструкция типового криостата представлена в [2].

Кроме сцены наблюдения (информационной составляющей об объекте исследования и фона вокруг него) на ГС, попадает паразитное излучение (ПИ), вызванное нагревом частей тепловизора (собственных излучений объектива, гибридной сборки, а также стенок корпуса криостата). Излучение сцены наблюдения и часть ПИ попадает на фотоприёмник напрямую, а другая часть ПИ частично отражается от разных поверхностей в криостате и также попадает на ГС. Паразитное излучение иногда называют паразитным фоном или паразитным потоком. Паразитное излучение увеличивает уровни темнового тока и шума фоточувствительных элементов фотоприёмника, снижает обнаружительную способность ГС и уменьшает его динамический диапазон. Экранирование гибридной сборки охлаждаемым экраном (ОЭ), имеющим входное отверстие (апертурную диафрагму) для прохождения ИК-излучения от сцены наблюдения, позволяет снизить уровень ПИ. Для этого необходимо поглотить ПИ на внутренней поверхности ОЭ, имеющей высокий коэффициент поглощения [3, 4]. Более ранние исследования известных покрытий внутренних поверхностей ОЭ позволили выяснить наиболее оптимальное, имеющее незначительную зеркальную составляющую отражения (менее 6 %) [5]. Покрытие состоит из взвеси частиц углерода (размер частичек 5–40 мкм) в криогенном лаке. Данное покрытие было выбрано для проведения исследований.

Охлаждаемый экран устанавливается на охлаждаемый пьедестал, и его температура такая же, как у ГС. В [6] ОЭ называется «холодной диафрагмой». Экран должен иметь минимальную массу для минимизации времени его охлаждения и снижения тепловой нагрузки на систему охлаждения криостата. Внешняя поверхность ОЭ имеет высокий коэффициент отражения для уменьшения его радиационного нагрева от стенок криостата. Отметим, что при проектировании объективов охлаждаемых криостатов необходимо совпадение выходного зрачка объектива с входным отверстием ОЭ для частичной минимизации уровня ПИ, вызванного тепловым излучением объектива [7].

Целью данной работы являлось выяснение численным моделированием наилучшей формы и конструкции охлаждаемого экрана, обеспечивающих минимальный уровень облучения гибридной сборки паразитным излучением. Рассмотрены следующие формы ОЭ, условно названные: цилиндр, конус, обратный конус, пирамида, ромб и песочные часы, имеющие разное количество внутренних дополнительных диафрагм (бленд). Бленды предназначены для дополнительного поглощения отражённых и рассеянных пучков лучей ПИ в ОЭ, при этом они не препятствуют прямому прохождению излучения от сцены наблюдения.

Влияние температуры внутренней поверхности корпуса криостата и формы ОЭ на уровень ПИ на ГС. В [8] численным моделированием и прямым измерением проведён анализ влияния формы ОЭ на подавление ПИ от тёплых боковых стенок корпуса криостата. Анализировались следующие конструкции: цилиндрическая, конусная и с обратной конусностью (типа рупор). Часть опубликованных результатов исследования представлены в табличной форме (табл. 1). По результатам исследования уровень ПИ на ГС от тёплых стенок криостата зависит от формы ОЭ. Наименьший уровень ПИ от боковых стенок корпуса криостата обеспечивает цилиндрический ОЭ. Численным моделированием авторы также выяснили, что увеличение диаметра ОЭ уменьшает уровень ПИ от стенок корпуса криостата на ГС.

В [9] численным моделированием уровня ПИ на ГС для тёплых экранов (имеющих температуру выше температуры пьедестала и гибридной сборки) в форме цилиндра и песочных часов показано, что последняя предпочтительнее.

Отметим, что в настоящее время ещё не определены оптимальная форма и конструкция ОЭ. Для подтверждения этого факта приведём формы ОЭ из [10, 11] (рис. 1). Полной технической информации для данных ОЭ нет, следовательно, такие конструкции не исследовались.

Анализ уровня ПИ на ГС. Энергетический расчёт потоков ПИ ($\Phi_{\text{ПИ}}(\lambda, T)$) выполнен в соответствии с [12, 13]. Поток ПИ в криостате с ОЭ в спектральном диапазоне чувствительности ГС складывается из потока, зависящего от конструкции входного объ-

Таблица 1

Паразитное излучение от боковых стенок корпуса криостата ОЭ разной формы при температурах корпуса криостата 10 и 50 °С

Варианты холодных диафрагм	Измеренный на ГС уровень ПИ при разных температурах стенок криостата, в квантах АЦП	
	10 °С	50 °С
Конусная	4529	7580
Цилиндрическая	3110	4301
С обратной конусностью	4617	6669

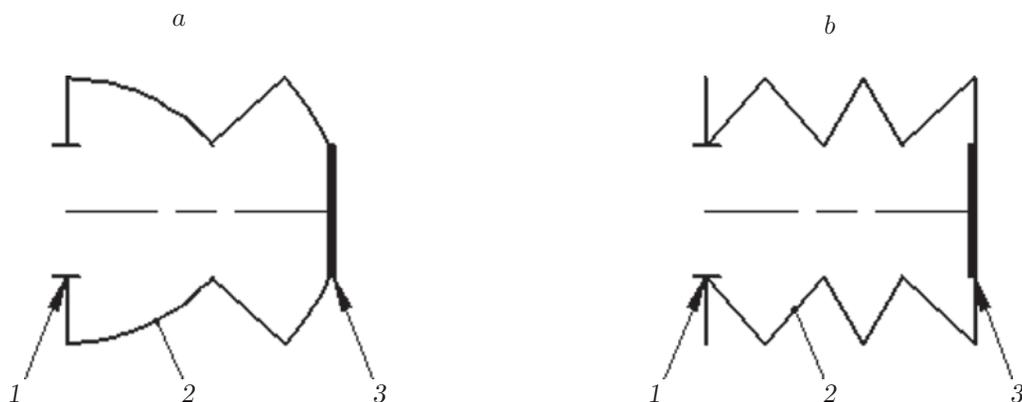


Рис. 1. Формы и конструкции ОЭ: *a* — роль бленд выполняет форма сильфона [10]; *b* — вариант составного ОЭ, внутренняя поверхность каждой части отражает ПИ обратно (обозначения: 1 — апертурная диафрагма, 2 — ОЭ, 3 — ГС) [11]

ектива тепловизора (типа оптической системы, просветления оптики), и потока, возникающего внутри криостата:

$$\Phi_{\text{ПИ}}(\lambda, T) = \Phi_{\text{кр}}(\lambda, T) + \Phi_{\text{об}}(\lambda, T) + \Phi_{\text{кон}}(\lambda, T),$$

где $\Phi_{\text{кр}}(\lambda, T)$ — паразитный поток, возникающий внутри криостата; $\Phi_{\text{об}}(\lambda, T)$ — паразитный поток от оптики входного объектива; $\Phi_{\text{кон}}(\lambda, T)$ — паразитный поток от конструкции входного объектива.

На рис. 2 схематично представлена часть криостата, где устанавливается ГС (4). Поток ПИ, возникающий внутри криостата $\Phi_{\text{кр}}(\lambda, T)$:

$$\Phi_{\text{кр}}(\lambda, T) = \Phi_{\text{ст}}(\lambda, T) + \Phi_{\text{окна}}(\lambda, T) + \Phi_{\text{э}}(\lambda, T),$$

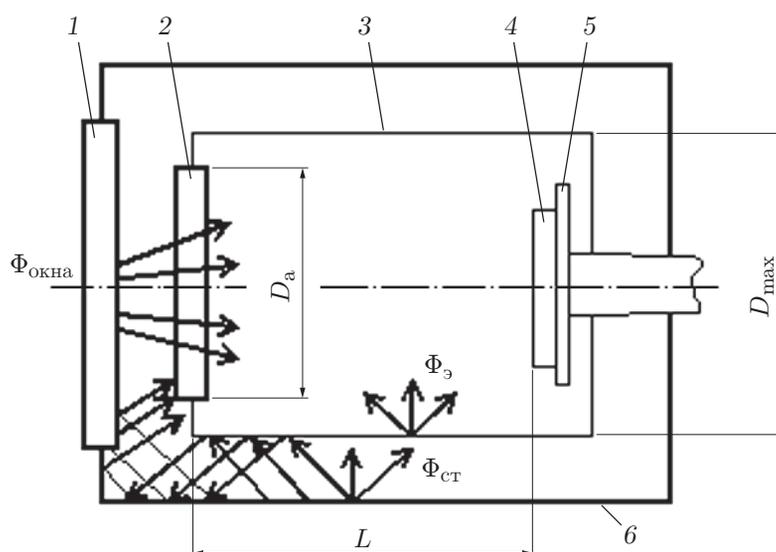


Рис. 2. Структурная схема криостата: 1 — защитное входное окно; 2 — ИК-фильтр во входном отверстии ОЭ; 3 — ОЭ; 4 — ГС; 5 — охлаждаемый пьедестал; 6 — внешний корпус криостата; D_a — диаметр апертурной диафрагмы ОЭ; D_{max} — максимальный диаметр охлаждаемого экрана; $\Phi_{\text{ст}}$, $\Phi_{\text{окна}}$ и $\Phi_{\text{э}}$ — компоненты ПИ криостата; L — расстояние от апертурной диафрагмы до ГС

где $\Phi_{\text{ст}}(\lambda, T)$ — поток от тёплых стенок криостата; $\Phi_{\text{окна}}(\lambda, T)$ — поток от входного окна криостата; $\Phi_3(\lambda, T)$ — поток от внутренней поверхности ОЭ.

Паразитный поток от стенок криостата. В [6] проведён анализ теплопритоков, возникающих от излучения стенок криостата, попадающих на ГС:

$$\Phi_{\text{ст}}(\lambda, T_{\text{ст}}) = S_{\text{ст}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\text{ст}}(\lambda, T_{\text{ст}}) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \varepsilon_{\text{ст}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

где $S_{\text{ст}}$ — площадь стенок элементов конструкции криостата; $T_{\text{ст}}$ — абсолютная температура элементов конструкции криостата; $\varepsilon_{\text{ст}}(\lambda)$ — спектральный коэффициент излучения поверхности стенок криостата; $M_{\text{ст}}(\lambda, T_{\text{ст}})$ — спектральная плотность энергетической светимости стенок внутри корпуса криостата; $\tau_{\text{ф}}(\lambda)$ — спектральная характеристика пропускания ИК-фильтра; $S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность ГС; λ_1 и λ_2 — границы спектрального диапазона чувствительности ГС (мкм).

Как уже отмечалось, высокий коэффициент отражения внешней поверхности ОЭ уменьшает радиационный нагрев от стенок криостата. Внутренние стенки криостата также зеркальны для инфракрасного излучения. При этом противоположные зеркальные поверхности переотражают тепловое излучение друг другу [8].

Паразитный поток от входного окна криостата. Величина потока $\Phi_{\text{окна}}(\lambda, T_{\text{окна}})$ на ГС складывается из двух составляющих (не показан на рис. 2):

$$\Phi_{\text{окна}}(\lambda, T_{\text{окна}}) = \Phi_1(\lambda, T_{\text{окна}}) + \Phi_2(\lambda, T_{\text{окна}}),$$

где $\Phi_1(\lambda, T_{\text{окна}})$ — паразитный поток ИК-излучения от входного окна криостата, прошедший через апертурную диафрагму и ИК-фильтр в ОЭ и попадающий непосредственно на ГС; $\Phi_2(\lambda, T_{\text{окна}})$ — паразитный поток после многочисленных отражений от стенок ОЭ, попадающий на ГС.

Паразитный поток от внутренней поверхности ОЭ. Величина потока $\Phi_3(\lambda, T_3)$ на ГС можно вычислить по формуле

$$\Phi_3(\lambda, T_3) = S_3 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_3(\lambda, T_3) \varepsilon_3(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

где S_3 — площадь поверхности холодного экрана криостата; T_3 — температура холодного экрана криостата; $\varepsilon_3(\lambda)$ и $M_3(\lambda, T_3)$ — спектральный коэффициент излучения и спектральная энергетическая светимость покрытия внутренней поверхности ОЭ; λ_1 и λ_2 — границы спектрального диапазона чувствительности ГС.

Определение значений потоков $\Phi_{\text{кр}}(\lambda, T)$, $\Phi_{\text{об}}(\lambda, T)$ и $\Phi_{\text{кон}}(\lambda, T)$, проходящих через входное отверстие в ОЭ, является сложной самостоятельной задачей, так как необходимо учитывать только те пучки лучей, которые после многочисленных отражений и рассеиваний от внешних и внутренних поверхностей криостата и входного объектива попадают на ГС. Выяснение влияния этих потоков на ПИ лучше всего проводить экспериментально, поэтому для численного моделирования влияния формы и конструкции ОЭ на уровень потока ПИ считалось, что во входном отверстии ОЭ находится изотропный излучатель с мощностью излучения 1 Вт.

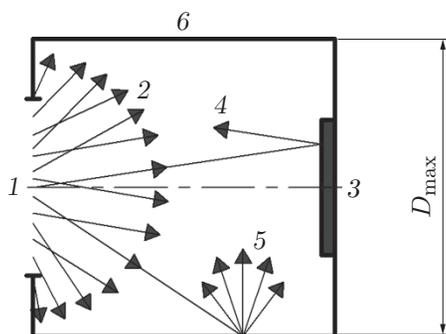


Рис. 3. Схема распространения лучей ПИ в цилиндрическом ОЭ: 1 — входное отверстие с изотропным излучателем, 2 — лучи потока ИК-излучения, 3 — поверхность ГС, 4 — отражённый луч от ГС, 5 — рассеянные лучи от поверхности ОЭ, 6 — ОЭ

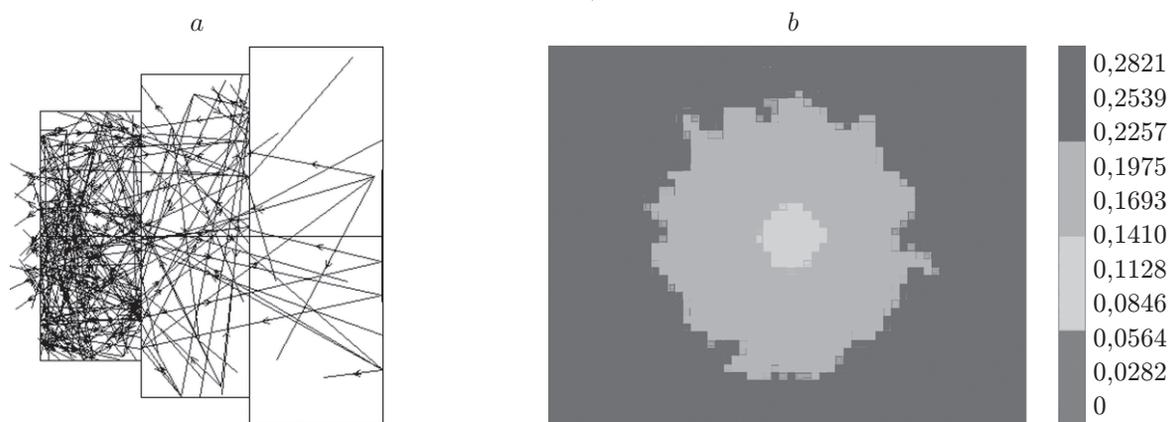


Рис. 4. Результаты моделирования ОЭ в форме пирамиды с двумя блендами: а — схема трассировки лучей; б — диаграмма распределения паразитного ИК-излучения в плоскости ГС

Модель для вычисления распределения ПИ на поверхности ГС. На рис. 3 схематично представлено распространение лучей излучения в цилиндрическом ОЭ. Излучатель испускает лучи во внутреннюю полость ОЭ с равной вероятностью во всех направлениях (2). Часть ИК-излучения поглощается ГС (3), а часть отражается (4) с коэффициентом отражения ρ_1 . Частично излучение поглощается стенками ОЭ, другая часть возвращается в источник излучения. Кроме того, часть потока отражается и рассеивается на внутреннем поглощающем покрытии поверхности ОЭ с коэффициентом отражения ρ_2 , при этом сам ОЭ излучает $\Phi_3(\lambda, T_3)$ при температуре 77 К с коэффициентом излучения $\varepsilon \approx 1 - \rho_2$. Отражённые, излучённые и рассеянные лучи условно обозначены (5).

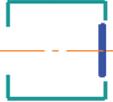
Для моделирования распределения ИК-излучения и расчёта потоков ПИ в различных типах ОЭ приняты следующие основные параметры:

- рабочий спектральный диапазон $\Delta\lambda = 7,7-10,3$ мкм;
- коэффициент отражения от поверхности ГС (обратная сторона подложки GaAs) $\rho_1 \approx 30\%$;
- интегральный коэффициент отражения поглощающего покрытия ОЭ $\rho_2 \approx 6\%$ [5];
- количество трассируемых лучей $N = 25 \cdot 10^6$.

Для анализа распределения ПИ на поверхности ГС трассируются лучи от источника излучения внутри ОЭ. Однако учитываются только те лучи, которые хотя бы один раз претерпели отражение от внутренних стенок ОЭ и поверхности ГС. Лучи, которые

Таблица 2

**Результаты моделирования уровня ПИ на поверхности ГС
для ОЭ цилиндрической формы**

Тип формы ОЭ	Поток от изотропного источника ИК-излучения $\Phi_{\text{ПИ}}(\lambda, T)$, Вт	На поверхности ГС		Энергетическая светимость ОЭ при температуре 77 К, Вт/см ²	Энергетическая облучённость $E_s(\lambda, T_s)$ на поверхности ГС от ОЭ, Вт/см ²
		*Поток $\Phi_{\text{пов}}(\lambda, T)$, Вт	Пиковое значение энергетической облучённости, Вт/см ²		
	1	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$2,44 \cdot 10^{-8}$	$1,83 \cdot 10^{-8}$

*Примечание. $\Phi_{\text{пов}}(\lambda, T)$ — поток ПИ, пришедший на ГС через светофильтр после всех отражений внутри ОЭ.

Таблица 3

Результат численного моделирования уровня энергии ПИ на ГС разных форм ОЭ

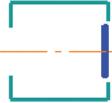
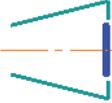
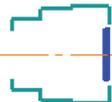
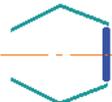
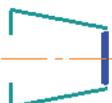
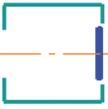
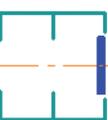
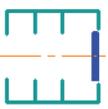
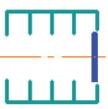
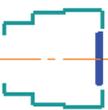
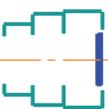
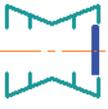
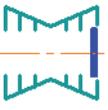
Номер ОЭ	Тип формы ОЭ	Энергия ПИ на ГС, отн. ед.	Номер ОЭ	Тип формы ОЭ	Энергия ПИ на ГС, отн. ед.
1		1	4		1,1
2		0,87	5		1,43
3		0,93	6		0,25

Таблица 4

**Уровни ПИ на ГС для ОЭ в форме цилиндра, пирамиды и песочных часов
при диаметрах 20 и 22 мм**

Номер ОЭ	Тип формы ОЭ	Пиковое значение облучённости на ГС, Вт/см ² и неоднородность облучённости (Δ), % для ОЭ с $D_{\max} = 20$ мм	Энергия ПИ на ГС для ОЭ при разных диаметрах, отн. ед.	
			$D_{\max} = 20$ мм	$D_{\max} = 22$ мм
1		$2,07 \cdot 10^{-3}$ 9,7 %	1	0,94
7		$4,51 \cdot 10^{-4}$ 11 %	0,25	0,12
8		$9,82 \cdot 10^{-5}$ 3 %	0,043	0,034
9		$7,42 \cdot 10^{-5}$ 6,7 %	0,034	0,033
2		$1,87 \cdot 10^{-3}$ 11 %	0,87	0,79
10		$2,84 \cdot 10^{-4}$ 49 %	0,12	0,11
6		$5,29 \cdot 10^{-4}$ 21 %	0,25	0,17
11		$2,92 \cdot 10^{-4}$ 18 %	0,13	0,092
12		$2,17 \cdot 10^{-4}$ 19 %	0,092	0,07

напрямую попадают на ГС, являются полезным сигналом и не участвуют в расчёте ПИ. Моделирование потоков ПИ выполнено с помощью пакета программ Zemax. На рис. 4 представлены результаты моделирования распространения трассируемых лучей в ОЭ в форме пирамиды.

Результаты численного моделирования.

Уровень ПИ на поверхности ГС для цилиндрической формы ОЭ. Выяснено, что величина собственного излучения ОЭ $\Phi_3(\lambda, T_3)$ мало зависит от формы и конструкции и составляет менее 3 %. Например, для ОЭ цилиндрической формы в диапазоне длин волн от 3 до 12 мкм с ГС на основе КРТ облучённость поверхности составила $E_9(\lambda, T_9) = 1,83 \cdot 10^{-8}$ Вт/см², что значительно меньше, чем пороговая облучённость матричной ГС (форматом 320×256 элементов) $2,0 \cdot 10^{-7}$ Вт/см² (с учётом пропуска фильтра) [8], следовательно, потоком $\Phi_3(\lambda, T_3)$ можно пренебречь.

В табл. 2 приведены результаты моделирования уровня ПИ на поверхности ГС для ОЭ цилиндрической формы с конструктивными параметрами: диаметр $D_{max} = 20$ мм; диаметр входного отверстия (апертурной диафрагмы) $D_a = 10$ мм; расстояние от апертурной диафрагмы до ГС $L_1 = 20$ мм.

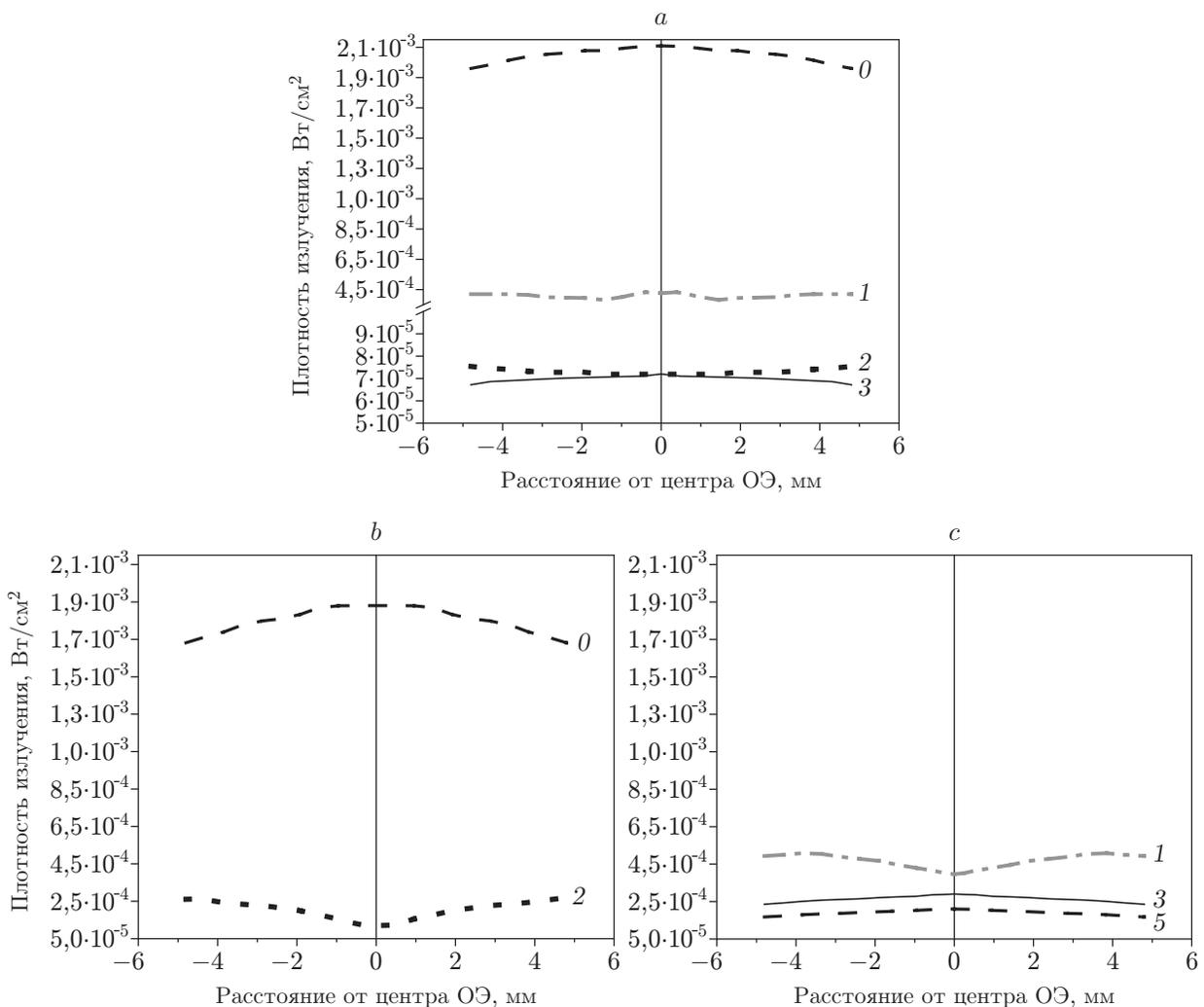


Рис. 5. Распределение ПИ по центральной линии ГС при использовании ОЭ: цилиндрической формы (а), пирамидальной формы (б) и в форме песочных часов (с) с разным количеством бленд. Количество бленд указано цифрами 0—5

Влияние формы диафрагм на уровень ПИ на ГС. В табл. 3 представлен результат моделирования уровня энергии ПИ на ГС разных известных нам форм ОЭ с $D_{max} = 20$ мм. Для удобства сравнения различных форм ОЭ уровень потока ПИ на ГС для цилиндрической формы ОЭ ($1,45 \cdot 10^{-3}$ Вт) принят за единицу.

Наименьший уровень энергии ПИ на ГС имеют ОЭ с номерами 2 и 6 (табл. 4).

Уровень энергии ПИ на ГС для ОЭ с разным количеством бленд. Результаты моделирования уровней энергии ПИ на ГС для форм цилиндрической, пирамидальной и песочных часов при двух диаметрах (D_{max} 20 и 22 мм) представлены в табл. 4. Стандартный размер ОЭ $D_{max} = 20$ мм, и $D_{max} = 22$ мм — максимально возможный диаметр для выбранного криостата.

На рис. 5 показано изменение уровня ПИ по центральной линии ГС при разном количестве бленд в ОЭ. Численное моделирование выполнено для ОЭ в форме цилиндра, пирамиды и песочных часов.

Заключение. Моделирование потоков ПИ с помощью изотропного источника, расположенного во входном отверстии ОЭ, позволило выяснить влияние формы и конструкции ОЭ на уровень паразитного излучения и его распределение в плоскости ГС.

Установлено, что уровень собственного излучения внутренней поверхности ОЭ $\Phi_3(\lambda, T_3)$ ниже порога чувствительности фотоприёмника (КРТ, формат 320×256 элементов) слабо зависит от её формы и конструкции (различие составляет менее 3 %). Эта составляющая ПИ не учитывалась при моделировании.

Определено, что незначительное увеличение диаметра ОЭ с двумя и более внутренними блендами не даёт значимого снижения уровня ПИ. Поэтому для экспериментального исследования форм и конструкции ОЭ выбран общепринятый диаметр 20 мм.

Осуществлён выбор форм и конструкций оптимальных ОЭ по уровню и равномерности ПИ по площади ГС: цилиндр с двумя блендами ($9,82 \cdot 10^{-5}$ Вт/см², $\Delta = 3$ %). Для широко применяемого ОЭ в форме пирамиды с двумя блендами уровень облучённости составлял $2,84 \cdot 10^{-4}$ Вт/см² при неравномерности излучения $\Delta = 49$ %, песочные часы с дополнительными двумя блендами $2,92 \cdot 10^{-4}$ Вт/см², $\Delta = 18$ %. Самый распространённый и простой в изготовлении ОЭ в форме цилиндра без бленд обеспечивает уровень облучённости ПИ около $2,07 \cdot 10^{-3}$ Вт/см² при неравномерности излучения $\Delta = 9,7$ %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев А. В., Сусяков А. О., Сабина И. В. и др. Матричные фотоприёмные устройства формата 384×288 элементов для ИК-диапазона 8–10 мкм // Успехи прикладной физики. 2018. 6, № 3. С. 224–230.
2. Кузнецов Н. С. Проектирование и технология изготовления ВВК и стыковки с ГКМ. Курс лекций. М: Исследовательский технологический университет «МИС и С», 2021. 46 с.
3. Патрашин А. И. Инфракрасное фотоприёмное устройство с оптимальной диафрагмой // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 65–70.
4. Патрашин А. И. Теоретическое исследование фоновых облучённостей ИК МФЧЭ с холодными диафрагмами заданных типов // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 98–106.
5. Новоселов А. Р., Алдохин П. А., Добровольский П. П. и др. Исследование отражения диафрагмами ИК-излучения в тепловизионных приборах // Автометрия. 2021. 57, № 3. С. 117–125. DOI: 10.15372/AUT20210313.
6. Демьянов Э. А., Добровольский П. П., Журавлев П. В., Сущих А. А. Особенности построения систем криостатирования на основе газовых криогенных машин // Микросистемная техника. 2001. № 8. С. 30–33.

7. **Дегтярев Е. В., Рудный И. В.** Анализ эффективности перспективности тепловизионных приборов различных классов и выбор схем их построения / Сб. ст. под ред. В. В. Тарасова и Ю. Г. Якушенкова. Вып. 1. М: «Алтей и К», 2001. 161 с.
8. **Фотоприёмные** устройства на основе эпитаксиальной системы кадмий—ртуть—теллур /Отв. редактор А. Л. Асеев. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2012. 258 с.
9. **Добровольский П. П., Кремис И. И., Хрящев С. В. и др.** Применение тёплой апертурной диафрагмы в охлаждаемых малоформатных матричных фотоприёмниках // Автометрия. 2020. **56**, № 6. С. 120–124. DOI: 10.15372/AUT20200613.
10. **Pat. 5994702 US.** Method and apparatus for cold shielding /Т. Н. Clynne, L. W. Bossert, J. P. Knauth, M. L. Robinson. Publ. 30.11.1999.
11. **Pat. 8692172 US.** Cold shield apparatus and methods /К. G. Preston, A. Traylor, D. G. Jenkins. Publ. 08.04.2014.
12. **Якушенков Ю. Г.** Теория и расчёт оптико-электронных приборов. М.: Сов. радио, 1980. 390 с.
13. **Иванов В. П., Курт В. И., Овсянников В. А., Филипов В. Л.** Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. 594 с.

Поступила в редакцию 21.02.2023

После доработки 10.03.2023

Принята к публикации 20.03.2023
