

Влияние конструктивных элементов объективов на дополнительную облученность фоточувствительных элементов неохлаждаемых ИК МФПУ*А. В. Правдивцев*

В статье рассматривается влияние конструктивных элементов оправ ИК объектива, предназначенного для работы в диапазоне 8,5–12 мкм, на величину дополнительной (паразитной) облученности фоточувствительных элементов. Дополнительная облученность матричного фотоприёмного устройства (МФПУ) складывается из изучения от внешних источников, рассеянных на элементах объектива и собственного излучения оптической системы. Вклад каждой из составляющих зависит от внешних условий и характеристик оптической системы. Оптимизация оптических характеристик и формы оправ позволяет влиять на обе величины, что ведёт к возможности создания системы, обладающей минимальным паразитным потоком в требуемых условиях эксплуатации. Рассмотрена минимизация дополнительной (паразитной) облученности на примере систем двух типов: предназначенных для наблюдения удалённых объектов на фоне неба и на поверхности Земли.

Ключевые слова: тепловизионный канал, паразитный поток, ИК объектив, фотоприёмное устройство, МФПУ.

Ссылка: Правдивцев А. В. // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 79.

Reference: A.V. Pravdivtsev, Prikl. Fiz., No. 2, 79 (2019).

Введение

В настоящее время разрабатывается и производится большое количество тепловизионных систем, в которых применяются неохлаждаемые МФПУ. Для обеспечения наибольшей вероятности обнаружения и распознавания в таких системах необходимо обеспечения максимального соотношения «сигнал/шум». Величина «сигнала» на входе системы определяется температурой и коэффициентом излучения наблюдаемого объекта, величина шума – шумами МФПУ, фоновой облученностью и дополнительной (паразитной) облученностью, создаваемого конструктивными элементами объектива и самого при-

бора. Таким образом, для повышения работы необходимо минимизировать паразитный поток, приходящий МФПУ излучения [1].

Суммарный паразитный поток, попадающий на МФПУ, складывается из внешнего потока Φ_{out} , рассеянного на внутренних поверхностях элементов объектива, и собственного потока Φ_{OS} , порождаемого оптической системой, что выражается следующей формулой:

$$\Phi = \Phi_{out} + \Phi_{OS} = \Phi_{out} + (\Phi_L + \Phi_M). \quad (1)$$

Собственный паразитный поток состоит из двух компонент: поток, источником которого являются оптические элементы Φ_L , и поток от оправ Φ_M . Для определения влияния на суммарный поток на приемнике необходимо определить, какие составляющие вносят наибольший вклад для последующего их уменьшения. Следует обратить внимание, что в зависимости от условий применения оптико-электронной системы, соотношения между внешним и собственным паразитным потоком будет меняться.

Правдивцев Андрей Виталиевич, вед. оптик-конструктор.

ООО «ТОТАЛ ВИЖЕН».

Россия, 121205, Москва, Территория Сколково инновационного центра, бул. Большой, 42, стр. 1.

E-mail: apravdv@gmail.com

Статья поступила в редакцию 2 октября 2018 г.

© Правдивцев А. В., 2019

При разработке системы на внешний паразитный поток можно влиять введением бленд, диафрагм, изменением конструкции системы.

Собственный поток от оптической системы может быть уменьшен за счёт применения следующих технических решений:

1) Охлаждение и стабилизация температуры оптической системы.

2) Применение оптических материалов с низким коэффициентом поглощения в материале, уменьшение количества оптических элементов в тракте.

3) Изменение конструкции оправ – создание внутренних элементов и диафрагм, рассчитанных на подавление паразитного потока [2].

4) Изменение оптических характеристик оправ (покрытия на оправках) [3].

Охлаждение оптического тракта является эффективным способом уменьшения собственного паразитного излучения, приходящего на МФПУ. Но в ряде случаев оно не может быть реализовано из-за внешних ограничений на систему (масса, габариты, энергопотребление).

Известно, что для защиты МФПУ от паразитного излучения, приходящего от объектива или холодной области, можно использовать один из следующих вариантов [4]:

1) использовать элементы конструкции с высоко отражающими покрытиями, которые уведут рассеянное излучение от МФПУ («теплые диафрагмы»). Собственное излучение имеет низкий уровень из-за высокого коэффициента отражения.

2) высокий коэффициент поглощения ε конструкции («холодные диафрагмы»), но требуется охлаждения для уменьшения уровня собственного излучения.

Вариант с холодными диафрагмами более эффективен, но создаёт большую нагрузку на систему охлаждения [4].

Целью данной работы является изучение влияния коэффициентов теплового излучения (черноты) и отражательных характеристик оправ и конструктивных элементов оптической системы на общий уровень её внутреннего Φ_{OS} и внешнего паразитного потока Φ_{out} в МФПУ на основе неохлаждаемых фоточувствительных элементов (ФЧЭ).

Постановка задачи

Исследование проводилось на трехлинзовом светосильном объективе со следующими характеристиками: относительное отверстие – 1:0,95; фокусное расстояние $f' = 80$ мм, угловое поле в пространстве предметов $2w = 8,4^\circ$, рабочий спектральный диапазон 8,5–12 мкм. Размер чувствительной площадки микроболометрической матрицы 9,6×7,2 мм.

Для расчёта паразитного потока от внешних и внутренних источников в расчётной программе создаётся трехмерная модель оптической системы. В модели задаётся положение и характеристики оптических элементов (включая просветляющие покрытия на элементах), а также положение и свойства элементов конструкции. В качестве внутренних источников излучения задаются оптические элементы и оправы. Поток, излучаемый каждым источником, определяется его геометрией и коэффициентом теплового излучения в рассматриваемом диапазоне [1].

На основании данных о форме и размерах элементов объектива определяется величина S_i^L – площадь i -го элемента конструкции. По площади элементов и их энергетической светимости M_{OT} , с учетом коэффициентов поглощения (серости) ε_i^L рассчитывается поток излучения от каждого элемента оптической системы:

$$\Phi_i^L = M_{OT} S_i^L \varepsilon_i^L. \quad (2)$$

Энергетическую светимость источника излучения с температурой T_{BB} рассчитываем по формуле Планка:

$$M_{OT} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_{1R}}{\lambda^5 e^{C_{2R}\lambda^{-1}T_{BB}^{-1}} - 1} d\lambda, \quad (3)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света; k – постоянная Больцмана; C_{1R} и C_{2R} – соответственно первая и вторая радиационные постоянные, λ_1 и λ_2 – границы рабочего спектрального диапазона.

Излучение каждого источника представляется набором лучей, начало которых лежит на поверхности излучающего объекта. Лучи трассируются в 3D-модели системы с учётом

геометрии и оптических характеристик всех элементов (например, при попадании луча на просветленную поверхность линзы рассматривается деление энергии с учётом спектрального коэффициента отражения, при прохождении через материал линз учитывается поглощение материала). Поток на фоточувствительном элементе определяется суммированием излучения Φ_e от всех лучей, попавших на рассматриваемый фоточувствительный элемент $\Phi = \sum \Phi_e$.

Метод проверялся на примерах, распределение потока в которых можно рассчитать теоретически. Относительная систематическая ошибка расчета распределения потока в рассмотренных примерах не превышала 0,86 %, что является достаточно точным для рассмотренного применения [1].

Численный эксперимент

При создании модели паразитных излучений изучаемого объектива, его оправы и конструктивные элементы разбивались на три группы А, В, С (см. рисунок 1). Для расчёта

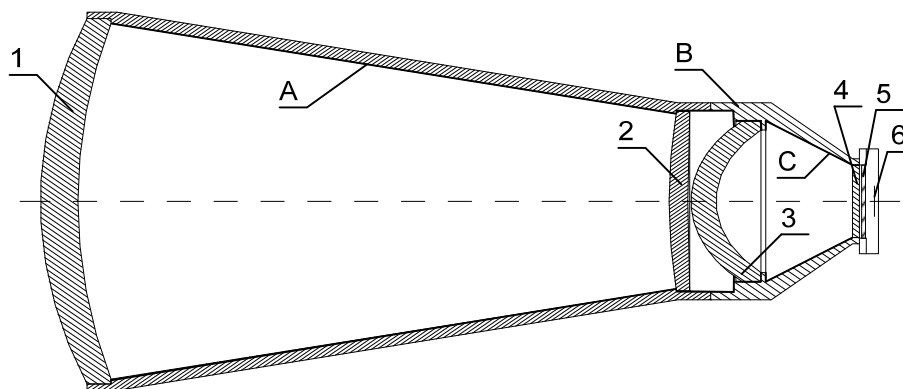


Рис. 1. Схема моделируемого ИК объектива для области 8,5-12 мкм. 1, 2, 3 – линзы объектива; 4 – входное окно, 5 – светофильтр; 6 – матрица ФЧЭ; А – первая оправа, В – вторая оправа, С – третья оправа.

Для каждой конфигурации свойств оправ оценивались величины потока излучения, приходящего на приёмник: Φ_M , Φ_L и Φ_{out} . Для оценки внешнего паразитного потока рассматривалось два источника: первый имитировал рассеянное излучение от подстилающей поверхности, второй – источник направленного излучения, расположенный вне поля зрения системы.

каждому элементу поочерёдно присваивалось пять значений коэффициента отражения ρ_0 : 0 – 0,99 (зеркальные оправы); 1 – 0,70; 2 – 0,50; 3 – 0,28; 4 – 0,01 (поглощающие оправы). При этом каждый блок конфигураций рассчитывался для трех случаев характерного отражения от оправ: М – зеркальное; L – диффузное; О – смешанное (50 % зеркальное, 50 % – диффузное). Суммарный размер расчётного массива включал в себя 375 расчётных конфигураций. Температура линз и оправ объектива принималась равной $T = 293^\circ \text{ К}$. При расчёте паразитного потока учитывались просветляющие покрытия на оптических элементах (характеристики взяты из [5]) и коэффициент поглощения в материале линз.

При моделировании не рассматривалось изменение потоков, создаваемых внутренней полостью приёмника и элементами внутри неё, так как обычно при разработке системы модифицировать приёмник нет возможности; эти потоки будут определяться конструкцией приёмника, получаемого от производителя МФПУ. Входное окно приёмника вносит постоянный поток, который не менялся при варьировании свойств оправ объектива.

Анализ результатов по величине собственного паразитного потока

По результатам численного эксперимента по определению собственного паразитного потока вычислялась величина $\Phi_{OS} = \Phi_M + \Phi_L$. Для получения несмещённых и эффективных оценок вычисляемых величин использовался метод Монте-Карло, над каждым расчётным

массивом осуществлялось 30 розыгрышей. Поэтому в дальнейшем для анализа использовалась оценка математического ожидания потока на МФПУ по результатам 30 численных экспериментов.

Для анализа результатов каждый из трёх блоков расчётных конфигураций упорядочивался по возрастанию $M[\Phi_{OS}]$. Здесь и далее $M[\circ]$ – оператор математического ожидания. В результате конфигурация с меньшим порядковым номером имеет меньшую величину паразитного потока; каждой конфигурации сопоставлен набор оптических характеристик оправ **A, B, C**. Данное упорядочивание позволило упростить поиск закономерностей в результате. Поток на приёмнике излучения был нормирован к максимальному значению по всем конфигурациям.

Анализ трех вариантов с различным характером отражения (зеркальный, диффузный и смешанный), показал, что вид зависимостей для всех рассмотренных случаев похож. Но вариант с диффузным характером отражения показывает более высокий уровень сигнала для всех конфигураций (в среднем превышение составляет порядка 0,1 относительной единицы).

В общем, можно сказать, что величина собственного потока меньше в вариантах, где коэффициент отражения от поверхностей оправ выше. На рис. 2 приведены графики изменения $M[\Phi'_{OS}]$ для каждой из расчётных конфигураций n_c , и трех вариантов с различным характером отражения. Величина $M[\Phi'_{OS}]$ – нормированный относительного максимального значения паразитного потока во всех конфигурациях $\max[M[\Phi_{OS}] = 8,9 \times 10^{-3}]$ Вт.

Анализ результатов, позволяет сделать вывод о том, что величина внутреннего паразитного потока, приходящего на приёмник,

действительно зависит и от коэффициентов теплового излучения оправ объектива и от их отражательных характеристик. При этом оптимальная конфигурация параметров относительно средневероятной конфигурации, взятой по расчётному массиву, имеет поток меньший в $\approx 4,62$ раз. Оптимальные конфигурации с наименьшим паразитным потоком относятся к оправам имеющим либо чисто зеркальный характер отражения, либо смешанный. Оптимальные конфигурации коэффициентов теплового излучения $\{A \ B \ C\}$ для всех типов отражений – $\{0 \ 0 \ 0\}$, наихудшие – $\{4 \ 4 \ 4\}$.

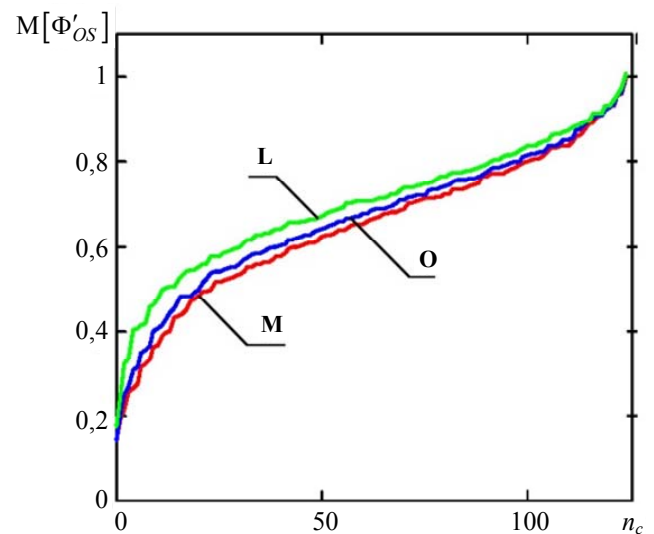


Рис. 2. Оценка математического ожидания собственного паразитного потока ИК объектива.

Для оценки выигрыша от минимизации собственного паразитного потока объектива, было проведено сравнение его абсолютной величины с внешним потоком от чистого безоблачного неба и от поверхности Земли. Эти варианты соответствуют системам, предназначенным для наблюдения объектов в верхней полусфере и системе для наблюдения поверхности Земли с летательного аппарата.

Таблица

Соотношения между внутренними паразитными потоками для оптимального набора параметров

Параметр	Вид отражения от оправ		
	M – зеркальное	O – смешанное	L – ламбертово
Φ_{OS}/Φ_M	28,636	21,658	20,809
Φ_L/Φ_M	12,638	9,607	7,731

В диапазоне 8,5–12 мкм энергетическая яркость неба (по данным работ [6–8]) составляет $L = 4,64 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ ср})$, а поток излучения, приходящий на приёмник, равен $\Phi_{B0} = 1,91 \times 10^{-4} \text{ Вт}$. Отношение паразитного потока к внешнему для оптимальной конфигурации параметров оправ равно $\Phi_{OS}/\Phi_{B0} \approx 6,4$, для средневероятной конфигурации – 29,9. В случае, если система предназначена для наблюдения объектов на поверхности Земли, из-за изменения уровня внешнего фона [7] получаем следующие значения: $\Phi_{OS}/\Phi_{B0} \approx 0,33$ для наилучшего варианта и для средневероятной конфигурации $\Phi_{OS}/\Phi_{B0} \approx 1,54$.

Учет внешнего паразитного потока

Внешний паразитный поток создается при переотражении излучения от оправ как от яркого объекта в пол зрения системы, так и вне поля зрения оптической системы.

Расчёт показал, что оправы с высоким коэффициентом отражения создают минимальный собственный паразитный поток. В тоже время, обычной практикой при изготовлении систем, является зачернение внутренних поверхностей оправ [9, 10] для уменьшения засветок от внешних источников излучения. Поэтому при решении задачи уменьшения паразитного потока следует также рассмотреть влияние внешних засветок (как естественных, так и искусственных [11]).

В рамках изучения влияния оправ на паразитный поток, интересным является случай, когда источник находится вне углового поля, при этом излучение попадает на стенки объектива после прохождения через первую линзу.

Для обоих вариантов использования системы была рассчитана облучённость на поверхности МФПУ, создаваемая как самой оптической системой, так и внешними источниками. В качестве внешних источников рассматривалась подстилающая поверхность (для первого случая температура поверхности 30 °С, подстилающая поверхность для второго – безоблачное небо) и источник направленного излучения, установленный под углом 15° к оптической оси с температурой 72 °С. По результатам вычислений были получены графики, приведённые на рис. 3, а и 3, б. Значения внешних потоков нормированы на $\max[M[\Phi_{OS}]]$.

Из анализа рис. 3, а и 3, б следует, что зависимость внешнего и внутреннего потока в среднем имеет обратный характер. Это означает, что оптимальный набор оптических свойств оправ лежит внутри рассмотренного диапазона в случае, если стоит вопрос по одновременной минимизации обоих составляющих паразитного излучения при заданных величинах допустимого внешнего излучения и внутреннего потока. Это показывает возможности по минимизации потока, путём выбора оптических характеристик оправ.

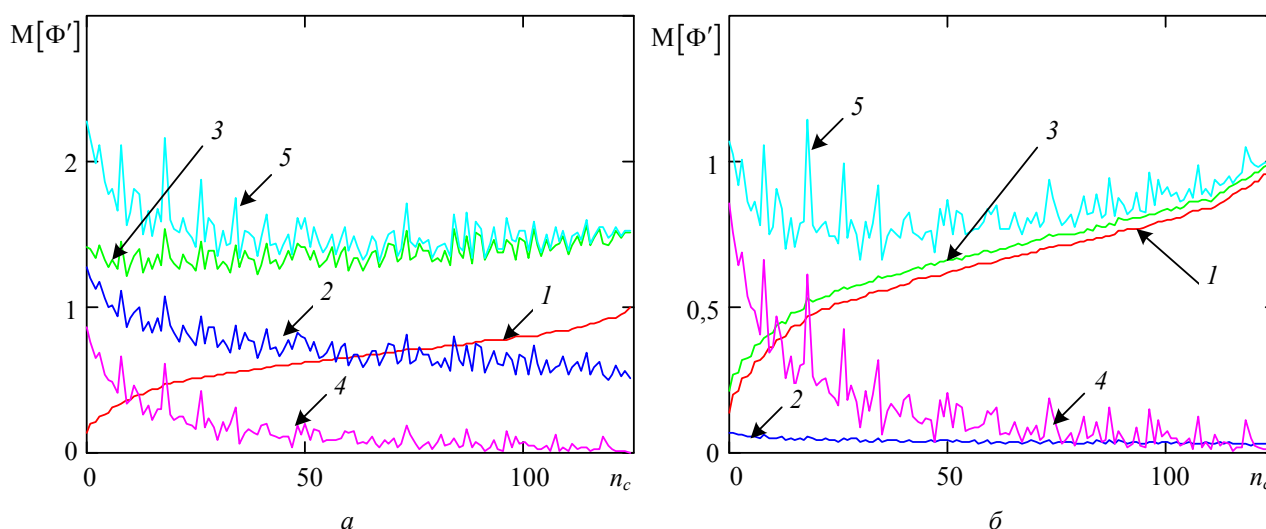


Рис. 3. Облучённость на поверхности МФПУ: а – система для наблюдения поверхности Земли, б – система для наблюдения в верхнюю полусферу. 1 – собственный паразитный поток оптической системы; 2 – внешний паразитный поток; 3 – суммарный поток от внешних и внутренних источников; 4 – поток от внешней боковой подсветки; 5 – суммарный поток от всех источников.

В первом случае сумма внешнего и внутреннего паразитного потока меняется слабо между конфигурациями. При добавлении внешних ярких источников вне поля зрения, оптимальным становится вариант с высоким коэффициентом поглощения оправ. Во втором случае при отсутствии ярких источников вне поля зрения, оптимальным будет набор оправ, имеющих высокий коэффициент отражения (а соответственно создающий низкий уровень фоновой облучённости), так как основной вклад в облучённость вносит оптическая система. При введении дополнительных внешних источников требования к подавлению рассеянного излучения увеличиваются, что приводит к требованиям к уменьшению коэффициента отражения. Для рассмотренного случая оптимальными будут наборы в середине диапазона.

Анализ распределений показывает, что, в зависимости от условий применения будут различные оптимальные характеристики конструкции системы. При выборе необходимо учитывать не только рассеянное излучение от внешнего фона, но и наличие ярких источников, находящихся вне поля зрения системы. Следует отметить, что нельзя распространять данные результаты на все подобные объекты из-за небольшого количества рассмотренных систем. Для каждой системы должен производиться анализ систем с учётом области применения.

Заключение

Проведённый анализ показал, что подбор оптимальных коэффициентов теплового излучения и отражательных характеристик оправ и конструктивных элементов оптического тракта, должен выполняться с учетом планируемого применения оптико-электронной системы.

Для систем, предназначенных для наблюдения объектов на поверхности Земли, для достижения минимального суммарного паразитного потока внутренняя поверхность оправ объектива должны иметь низкий коэффициент отражения (1 %). Такой результат можно объяснить, тем, что вклад внешнего паразитного

потока от фона (как находящегося в поле зрения, так и вне его) существенно больше, чем вклад паразитного потока от оправ, поэтому для минимизации суммарного потока требуется обеспечение высокого коэффициента поглощения оправ.

Напротив, для системы, наблюдающей в верхнюю полусферу объекты на «холодном» фоне, коэффициент отражения оправ должен быть достаточно высоким (порядка 70 %). В данном случае будет обеспечиваться достаточное подавление паразитного фона от объектов, находящихся вне поля зрения, при одновременно низком уровне собственного паразитного потока от оптической системы.

Следует отметить, что применять полученные рекомендации не стоит обобщать на все оптические системы этого класса. Наиболее рационально проводить данный анализ для каждого конструктивного решения оптической системы индивидуально с учётом заложенных технических решений и условий эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаренко А. В., Правдивцев А. В., Юдин А. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. № 12. С. 28.
2. Макаренко А. В., Правдивцев А. В. / Сб. докладов Международной конференции «Прикладная Оптика-2010». Т. 3. (Санкт-Петербург. 2010). С. 208–212.
3. Правдивцев А. В. / Сб. докладов Международной конференции «Прикладная Оптика-2012». Т. 1. (Санкт-Петербург. 2012). С. 230–234.
4. Gerin N., Chorier P. // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3436. P. 802.
5. Гайнутдинов И. С., Шувалов Н. Ю., Сабиров Р. С., Иванов В. А., Гареев Р. Р., Мирханов Н. Г. // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 5. С. 68.
6. Кузнецик О. П., Захарич М. П. Деп. ВИНТИ. 1980. № 2495. С. 47.
7. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. Vol. 1. Sources of Radiation / Ed. by G. J. Zissis – Bellingham: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1993.
8. Mahulikar S. P., Potnuru S. K., Rao G. A. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2009. Vol. 11. P. 045703.
9. Snail K. A., Brown D. P., Costantino J. P. // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2864. P. 465.
10. Miller J. L. // Opt. Eng. 2006. Vol. 45. P. 056401.
11. Попов Г. Н., Голубев П. Г., Мордвин Н. Н. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 124.

The influence of lens design elements on the additional irradiance of photo-sensitive elements of uncooled IR FPA

A. V. Pravdivtsev

TOTAL VISION LLC.
Bd. 1, 42 Territory of the Skolkovo Innovation Center, Blvd. Big,
Moscow, 121205, Russia
E-mail: apravd@gmail.com

Received October 2, 2018

The article discusses the influence of optical characteristics of the mounts in IR lens (for spectral range 8.5–12 mkm) on stray light. The total stray flux on focal plane array (FPA) is summarize from flux from external sources and stray light from the objective. The value of influence is depending of external conditions and the characteristics of the optical system. The optimization of optical characteristics of the mounts allows to minimize the total flux depending of external conditions. The article discus the flux minimization for the two variants of the systems: for remote sensing and for observation of the Earth.

Keywords: infrared channel, stray light, IR lens, photodetector, FPA.

REFERENCES

1. A. V. Makarenko, A. V. Pravdivtsev, and A. N. Yudin, *Electromagnitnie volni i electronnie system*, No. 12, 28 (2009).
2. A. V. Makarenko and A. V. Pravdivtsev, in *Proceedings of international conference "Applied Optics-2010"* (St.-Petersburg, 2010), vol. 3, pp. 208–212.
3. A. V. Pravdivtsev, in *Proceedings of international conference "Applied Optics-2012"* (St.-Petersburg, 2012), vol. 1, pp. 230–234.
4. N. Gerin and P. Chorier, *Proc. SPIE* **3436**, 802 (1998).
5. I. S. Gainutdinov, N. Yu. Shuvalov, R. S. Sabirov, V. A. Ivanov, R. R. Gareev, and N. G. Mirkhanov, *Journal of Optical Technology* **76** (5), 302 (2009).
6. O. P. Kuznechik and M. P. Zakharich, *Dep. VINITI*, No. 2495, 47 (1980).
7. *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. Volume 1. Sources of Radiation* / Ed. by G. J. Zissis (The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers – Bellingham, 1993).
8. S. P. Mahulikar, S. K. Potnuru, and G. A. Rao, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11**, 045703 (2009).
9. K. A. Snail, D. P. Brown, and J. P. Costantino, *Proc. SPIE* **2864**, 465 (1996).
10. J. L. Miller, *Opt. Eng.* **45**, 056401 (2006).
11. G. N. Popov, P. G. Golubev, and N. N. Mordvin, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 124 (2007).