

Источники излучения для проекторов инфракрасных сцен

И. С. Гибин, В. И. Козик, Е. С. Нежевенко

Рассмотрены основные принципы построения проекторов инфракрасных сцен (ИСП). Проводится анализ ИСП, построенных на основе матриц теплоизлучающих элементов, а также источников теплового излучения, которые могут быть использованы при создании проекторов инфракрасных сцен на основе матриц микрозеркал.

Ключевые слова: тепловизионные системы, проекторы инфракрасных сцен, источники ИК-излучения, тепловизионные изображения.

Ссылка: Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С. // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 67.

Reference: I. S. Gibin, V. I. Kozik, and E. S. Nejevenko, Prikl. Fiz., No. 2, 67 (2019).

Введение

Разработка современных систем тепловидения и теплопеленгации является сложной задачей. Хотя готовые изделия проходят выходной контроль по выбранному комплексу параметров, нельзя полностью исключить вероятность ошибок проектирования, а также ошибок практической реализации. Испытание подобных устройств непосредственно на борту связано с большими затратами, поэтому очень важно иметь возможность испытать эти системы на земле, но в условиях, максимально приближенных к реальным. Таким образом, вопрос проверки и тестирования специальных тепловизионных систем является одним из ключевых при создании приборов данного класса. Для этой цели применяются много-

спектральные устройства, генерирующие статические и динамические тепловизионные изображения (в дальнейшем будем использовать распространенное название для таких устройств – проектор инфракрасных сцен, сокращенно ИСП), которые могут быть использованы не только как имитаторы фоноцелевой обстановки при испытании тепловизионных систем распознавания и слежения за теплоизлучающими объектами, но и для статического и динамического контроля матричных устройств для приема ИК-изображений, используемых в этих системах.

Можно выделить два принципиально различных подхода к созданию ИСП. Первый основан на использовании матрицы теплоизлучающих элементов, которые и формируют тепловое поле. Быстродействие такой матрицы должно быть не ниже телевизионного, число элементов матрицы – такое, чтобы обеспечить качественное воспроизведение сцены, за которой наблюдает устройство распознавания или слежения. Другой подход – использование модулятора ИК-потока. Требования по быстродействию и пространственному разрешению к нему такие же, как к матрице теплоизлучающих элементов, но к тому же требуется излучатель ИК-потока, освещающего модулятор. Он должен быть достаточно мощным, стабильным во времени и обеспечивать создание равномерного ИК-поля.

Гибин Игорь Сергеевич^{1,2}, гл.н.с., д.т.н., профессор.

Козик Виктор Иванович¹, с.н.с., к.т.н.

Нежевенко Евгений Семенович¹, в.н.с., д.т.н.

¹ Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения академии наук (ИАиЭ СО РАН).

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1.

² Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

E-mail: gibin@iae.nsk.su, kozik@iae.nsk.su,

nejevenko@iae.nsk.su

Статья поступила в редакцию 4 апреля 2019 г.

© Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С., 2019

В настоящей работе будут проанализированы как матричные, так и одиночные теплоизлучатели, обеспечивающие формирование статического или динамического ИК-поля.

ИСП на основе теплоизлучающих элементов

Прежде всего рассмотрим, как можно сформировать требуемую сцену с помощью матрицы теплоизлучающих элементов. Лидером в разработке таких устройств является американская корпорация SBIR (Santa Barbara IR). В 1999 г. был представлен инфракрасный проектор сцены MIRAGE™ [1], включающий матрицу 512×511 резистивных излучателей, обеспечивающую частоту кадров 200 Гц. Система предназначена для поддержки аппаратного тестирования в процессе поиска старта ракет, а также для тестирования тепловизионных матриц. Обработка сигналов, источники питания, охлаждение излучающей матрицы, коррекция (исправление неравно-

мерности), аппаратное и программное обеспечение интерфейса пользователя интегрированы с излучателем MIRAGE™. Эти системы развивались: следующая модификация проектора этой фирмы (2002 год) содержала 1024×1024 резистора. Время нарастания яркости элементов матрицы от 10 до 90 % составляло 5 мс, полная частота 200 Гц. Дальнейшая модификация MIRAGE^{WF} имела размерность 1536×768 резисторов. Все модификации этой корпорации представлены на ее сайте [2].

На рис. 1 представлены макет дизайна пикселя и оптическая микрофотография готового пикселя матрицы 512×512 , шаг пикселей 48 мкм. Тепловые свойства материалов, из которых состоит элемент, толщина и форма ячеек выбираются из соображений минимизации тепловой проводимости и тепловой массы ячеек для получения высокой выходной температуры при ограниченной мощности и быстром отклике излучающих ячеек. На рис. 2 представлен внешний вид проектора ИК-сцен на основе теплоизлучающей матрицы.

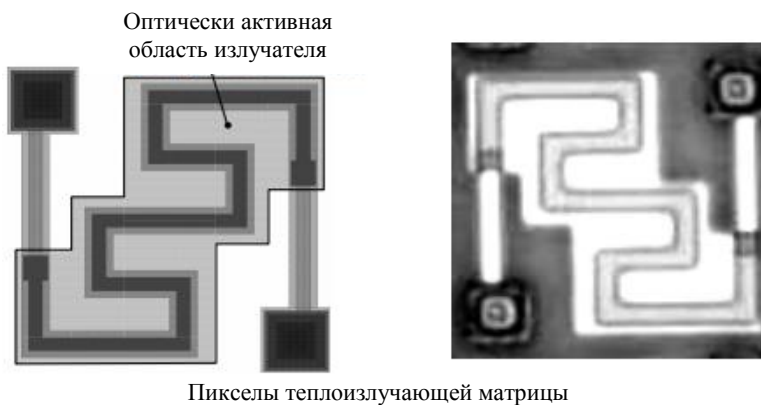


Рис. 1. Пиксели теплоизлучающей матрицы.

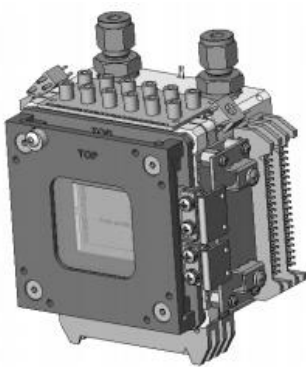


Рис. 2. Внешний вид проектора ИК-сцен на основе теплоизлучающей матрицы.

Интересный вариант ИСП представлен в [3]. Он основан на использовании двухслойной пленки, помещенной в вакуум, которая

поглощает видимый свет и излучает инфракрасный. Структура этой пленки представлена на рис. 3.

На полиамидную основу нанесены с помощью технологии МЭМС отдельные пиксели с размерами, указанными на рис. 3, б. На пленку проецируется изображение в видимом диапазоне, свет нагревает элементы, которые излучают в ИК-диапазоне. Размерность массива 1024×1024 элемента. Частота кадров 110 Гц. Каждый элемент излучает, как АЧТ с температурой от 293К до 573К. Динамический диапазон ИК-сигнала равен 200. Также для создания ИСП в диапазоне $3 \div 5$ мкм были

предложены варианты использования линеек светодиодов со сканированием по другой ко-

ординате [4] и матриц маломощных светодиодов [5].

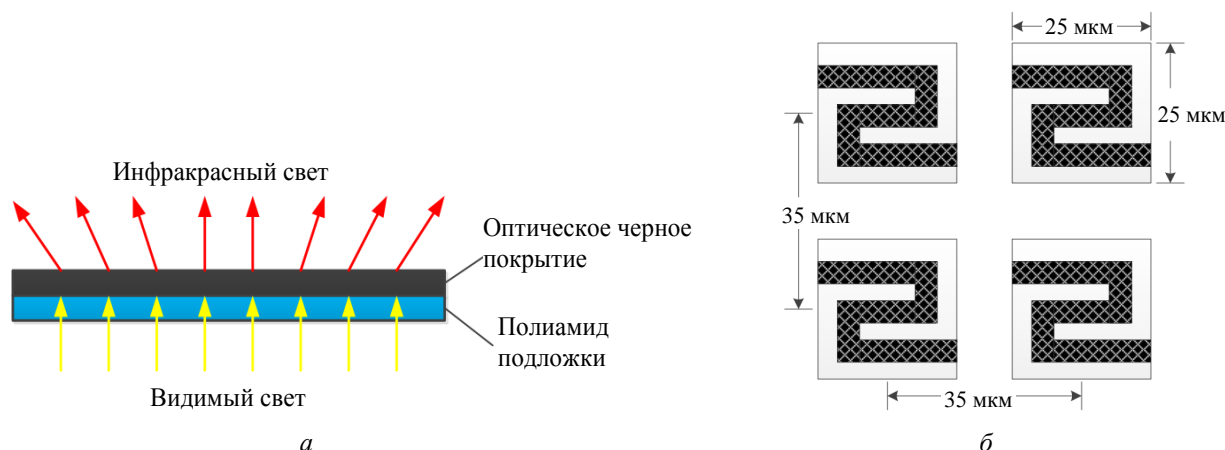


Рис. 3. Схема преобразования видимого света в инфракрасный и теплоизлучающие пиксели, нанесенные на полиамидную пленку.

Другой способ построения проектора ИК-сцен – использование матриц микрозеркал с дозированным временем светового импульса и одного (возможно, нескольких) источников излучения [6, 7]. Сравним эти два способа формирования ИК-сцен. В случае использования матрицы тепловыделяющих элементов для каждого пикселя можно задать только один параметр, а именно, температуру элемента, и, следовательно, в соответствии с законом Планка, конкретный спектральный состав излучения пикселя. Однако в случае использования массива микрозеркал можно варьировать как температурой (а, следовательно, и спектральной характеристикой) источника излучения, так и дозировкой энергии для каждого пикселя. Более того, в случае использования нескольких источников можно еще больше увеличить число степеней свободы проектора, причем не исключено также применение спектральных фильтров. Так что второй способ формирования ИК-сцен представляется нам более предпочтительным. В нем немаловажную роль играют источники излучения, которым и будет посвящено дальнейшее изложение в настоящей работе.

Прежде всего, рассмотрим нетепловые источники излучения: светодиоды и лазеры. Нас будут интересовать ИК-сцены в области 3–5 мкм или 9–12 мкм (окна прозрачности атмосферы). В диапазоне 3–5 мкм существуют светодиоды на основе InAs (они даже серийно выпускаются) [8], однако непрерывная мощ-

ность их в интересующем нас диапазоне составляет тысячные доли мВт. Светодиоды на более сложных структурах [9] (InAs/InAsSb/InAsSbP), разработанные позднее, также имеют малую среднюю мощность. Лазеры в требуемом диапазоне с удовлетворительной мощностью существуют. Они выполнены на основе двойных гетероструктур InGaAsSb(Gd)/InAsSbP, излучающие в спектральной области 3–4 мкм [10]. Максимальная мощность многомодовой генерации составляет 1,6 Вт для импульсного режима и 160 мВт для непрерывного режима. Правда, температурный режим этих лазеров составляет 77 К, т. е. требуется глубокое охлаждение.

Следует сказать, что уже есть разработки лазеров с повышенной температурой, вплоть до комнатной, однако мощность по сравнению с охлаждаемыми вариантами понижается, кроме того, сами лазеры являются весьма сложными и дорогими устройствами. Поэтому на этих излучателях останавливаться не будем, а рассмотрим более эффективные для применения в ИСП излучатели в виде нагретого тела. Наиболее известным источником ИК-излучения этого класса устройств является абсолютно черное тело (АЧТ). Оно имеет несколько привлекательных (в качестве источника ИК-излучения) свойств: все спектральные радиационные характеристики определяются только одним параметром состояния – температурой – и не зависят от других параметров системы; все спектральные

распределения для АЧТ соответствуют максимально возможному тепловому излучению тел при заданной температуре, что позволяет получить строго контролируемый по спектральному составу поток излучения, а также обеспечить максимальную мощность потока излучения; излучение АЧТ описывается основными законами оптики: полное количество излучаемой энергии – законом Стефана-Больцмана; пространственное распределение излучения – законом Ламберта; распределение интенсивности по длинам волн – законом Планка; длина волны максимума спектральной интенсивности – законом Вина. Однако все эти особенности АЧТ очень важны для различных метрологических целей и представляют меньшую ценность при использовании их в ИСП, где наиболее важными являются достаточная мощность ИК-излучения и хорошая диаграмма направленности. Что касается мощности, то она обеспечивается и абсолютно серым телом с не слишком малым коэффициентом черноты. Диаграмма же направленности определяется конфигурацией излучателя и формирующей освещающий пучок оптикой.

Далее рассмотрим тепловые источники ИК-излучения [11]. Обратим внимание прежде всего на силовый излучатель глобар. Это стержень из карбида кремния SiC длиной 5–10 см и диаметром 4–7 мм с утолщениями на краях. Однако иногда глобары выполняют длиной до 1 м. Температурные характеристики глобара: $T_{пл} = 2600\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{раб} < 1400\text{ }^\circ\text{C}$. Часто глобары покрывают защитным слоем двуокси тория ThO_2 , что позволяет повысить их рабочую температуру до $2273\text{ }^\circ\text{C}$. Раскаленный карбид кремния при воздействии кислорода воздуха окисляется с образованием окиси кремния и углекислого газа. Карбид кремния при низких температурах имеет отрицательный температурный коэффициент сопротивления, как у полупроводников, а в области высоких температур – положительный, как у металлов. С ростом температуры сопротивление глобара падает, достигая минимума в области 700–1100 К. Для разжигания глобара требуется внешний подогрев. Максимум излучательной способности глобара при $T_{раб} = 1400\text{ К}$ находится в области $\lambda = 2\text{ мкм}$. Степень черноты глобара достаточно велика

(0,8–0,9) в широкой области спектра от 0,5 мкм до 200 мкм. Кривая спектральной яркости глобара из-за стабильности его химического состава хорошо воспроизводится и может служить стандартом. Т. е. глобар по своим характеристикам очень близок к АЧТ. Правда, в области 12 мкм яркость глобара несколько снижена из-за резонансного поглощения и отражения света кристаллической решеткой SiC.

Возможны и иные конструкции ИК-источников излучения, аналогичные глобару, но использующие другие материалы. Одна из них, изложенная в [12], представлена на рис. 4, а. На рис. 4, б показана кривая спектрального излучения этого источника. Он содержит излучающее керамическое тело в виде полого цилиндра, внутри которого размещен платиновый спиральный нагреватель.

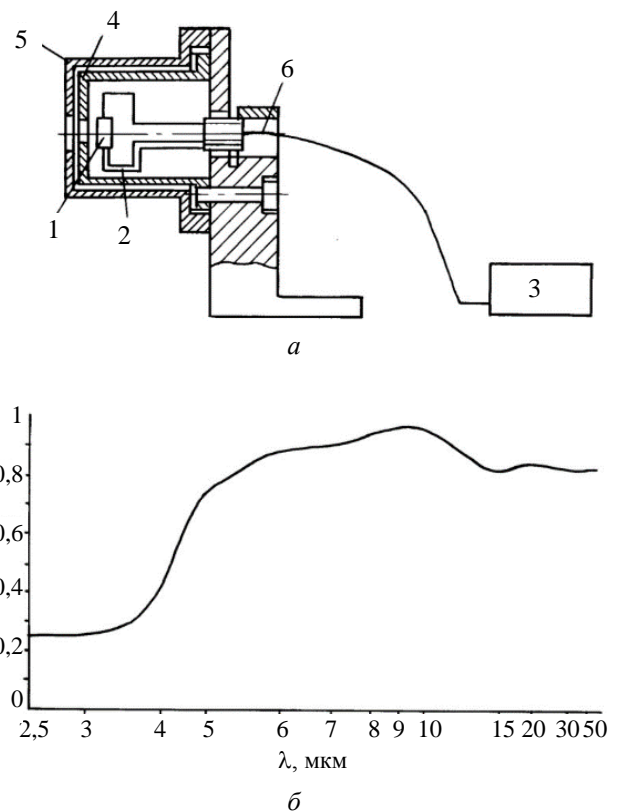


Рис. 4. Источник ИК-излучения (а) и кривая его спектрального излучения (б).

Излучающее тело покрыто двумя кожухами 4 и 5 с воздушным промежутком между ними. В кожухах для выхода излучения имеются выходные окна. Платиновый нагреватель 2 в виде спирали имеет выходные электроды 6, которые подсоединены к блоку 3 пи-

тания. Излучающее тело выполнено из материала, состоящего из окиси алюминия (70–85 %), каолина (10–20 %) и окиси хрома (5–10 %).

Благодаря предложенному подбору компонентов излучателя его свечение осуществляется очень равномерно, стабильно по мощности излучения (уход не более 0,1 % за 1 ч.), хорошо воспроизводимо в течение разных периодов времени.

Следующий по популярности ИК-излучатель – штифт Нернста, представляющий платино-керамический излучатель с косвенным подогревом. Его изготавливают в виде цилиндрика диаметром от 1 до 3 мм и длиной до 30 мм из смеси ZrO_2 ($T_{пл} = 2800\text{ }^\circ\text{C}$, 80 %), Y_2O ($T_{пл} = 2400\text{ }^\circ\text{C}$, 5 %), ThO_2 ($T_{пл} = 3040\text{ }^\circ\text{C}$, 10 %) с примесями окиси кальция, окиси магния и борной кислоты. Все компоненты смешиваются с глицерином с последующим спеканием и запеканием платиновых электродов, которые припаивают к концам цилиндрика, представляющего хрупкий беловато-желтый стержень.

Его внешний вид представлен на рис. 5, а, а на рис. 5, б – схема его подключения. Нагре-

вается штифт проходящим через него током. Поскольку штифт Нернста в холодном состоянии является диэлектриком, то его предварительно разогревают при помощи специальной спирали. Штифт потребляет ток до 1 А при напряжении питания 130–220 В. Проводить электрический ток штифт Нернста начинает при $T > 1000\text{ K}$. Рабочая температура штифта Нернста составляет $T_{раб} = 1700\text{ K}$, что соответствует $\lambda_{max} = 1,5\text{ мкм}$. Максимальная температура нагрева штифта Нернста достигает 2000 К. В области спектра 1– 6 мкм штифт Нернста излучает селективно, а в видимой области спектра и при $\lambda > 7\text{ мкм}$ является «серым излучателем». Для уменьшения потерь штифт, как правило, помещают в кожух, в котором монтируется окно из материала, прозрачного для заданной области излучения. В спектральной области 5–50 мкм яркость платино-керамического излучателя составляет 0,8–0,9 яркости глобара. При $\lambda < 5\text{ мкм}$ у штифта Нернста наблюдается спад яркости до 0,2–0,3 яркости глобара. Штифт Нернста и глобар применяют для получения ИК-излучения в спектральных приборах.

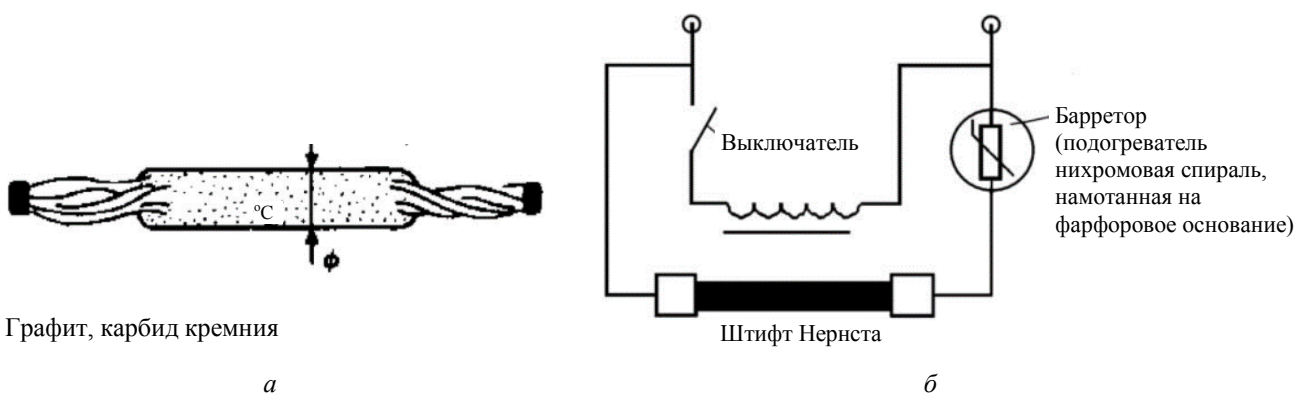


Рис. 5. Внешний вид штифта Нернста (а) и схема его подключения (б).

Существуют также т. н. темные ИК-излучатели. Они представляют собой металлические трубки из жаропрочной (хромоникелевой) стали с коэффициентом теплового излучения 0,95. Трубку заполняют керамикой, внутри которой помещают нагреватель. Рабочая температура – 1000 К. Средняя мощность излучения около 1 кВт на 1 м длины трубки.

Трубчатые кварцевые ИК-излучатели устроены следующим образом. На тонкий

кварцевый стержень навивают спираль из хромоникелевой стали. На стержень надевают трубку из кварца, которая нагревается спиралью до 1400 К. Срок службы таких ламп достигает 5000 ч.

Заключение

В настоящей работе мы рассмотрели только те излучатели и формирователи тепло-

вого поля, которые пригодны для построения ИСП. Причем предпочтение отдано одиночным излучателям, пригодным для использования в ИСП на основе микрозеркальных технологий. Именно этот класс устройств представляется нам наиболее эффективным в плане многофункциональности и удобства эксплуатации. При этом особое внимание следует обращать на стабильность излучаемой мощности источника во времени, возможность формирования равномерного светового поля, хорошую светоотдачу в требуемом спектральном диапазоне.

Исследование выполнено за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания № АААА-А17-117052410034-6 в ИАиЭ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. http://www.sbir.com/PDFs/MIRAGE-Publications/MIRAGE_Status_Overview_1999.pdf
2. <http://www.sbir.com/mirage.asp>
3. Yang Yanga, Nuo Shia, Lang Zhoua, Chang Xua, Li Zhang, Yanhong Li, Xin Wang, Zhuo Lia // Proc. SPIE. Vol. 9618. P. 96180C-1.
4. Cantey T. M., Ballard G., Gregory D. A. // Optical Engineering. 2008. Vol. 47. No. 8. P. 086401.
5. Norton D. T., LaVeigne J., Franks G., et al. // Proc. SPIE. 2016. Vol. 9820. P. 98200X-1.
6. Yu Hu, Ya-wei Zheng, Jiao-bo Gao, Ke-feng Sun, Jun-na Li, Lei Zhang, Fang Zhang // Proc. SPIE. 2016. Vol. 10157. P. 101571Q.
7. Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С. // Автотметрия. 2013. Т. 49. № 1. С. 80.
8. <http://www.ibsg-st-petersburg.com/>
9. <http://ru.lmsnt.com/leds1600-5000/models/#LED3>
10. Айдаралиев М., Зотова Н. В., Карандашев С. А., Матвеев Б. А., Ременный М. А., Стусь Н. М., Талалакин Г. Н. // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 10. С. 1261.
11. Тепловые источники излучения. <http://w-rabbit.narod.ru/elektr/tepl.htm>
12. Смолкин И. К. Патент РФ 2050502.

PACS: 07.57. Ty,07,60.-j, 07,20.-n

Sources of radiation for infrared projectors

I. S. Gibin^{1,2}, V. I. Kozik¹, and E. S. Nejevenko¹

¹ Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science
1 Koptug av., Novosibirsk, 630090, Russia

² Novosibirsk State Technical University
20 K. Marks av., Novosibirsk, 630073, Russia
E-mail: gibin@iae.nsk.su, kozik@iae.nsk.su, nejevenko@iae.nsk.su

Received April 4, 2019

Consideration is given to the main principles of creating the infrared scenes by projection devices. Besides, the article offers the review of the absolutely black body (ABB) models analogues that can be used as infrared radiation sources while creating the infrared scenes by projection devices with the use of micromirrors matrix.

Keywords: thermal vision systems, infrared scenes projection devices, IR radiation sources, thermal vision images.

REFERENCES

1. [http://www.sbir.com/PDFs/MIRAGE-Publications/ MIRAGE Status Overview_1999.pdf](http://www.sbir.com/PDFs/MIRAGE-Publications/MIRAGE_Status_Overview_1999.pdf)
2. <http://www.sbir.com/mirage.asp>
3. Yang Yanga, Nuo Shia, Lang Zhoua, Chang Xua, Li Zhang, Yanhong Li, Xin Wanga, and Zhuo Lia, Proc. SPIE, **9618**, 96180C-1.
4. T. M. Cantey, G. Ballard, and D. A. Gregory, Optical Engineering **47** (8), 086401 (2008).
5. D. T. Norton, J. LaVeigne, G. Franks et. al., Proc. of SPIE **9820**, 98200X-1 (2016).
6. Yu Hu, Ya-wei Zheng, Jiao-bo Gao, Ke-feng Sun, Jun-na Li, Lei Zhang, and Fang Zhang, Proc. SPIE **10157**, 101571Q (2016).
7. I. S. Gibin, V. I. Kosick, and E. S. Nezhevenko, Autometry **49** (1), 80 (2013).
8. <http://www.ibsg-st-petersburg.com/>
9. <http://ru.lmsnt.com/leds1600-5000/models/#LED3>
10. M. Aidaraliev, N. V. Zotova, S. A. Karandashev, et al., Semiconductors **35** (10), 1261 (2001).
11. *Thermal radiation sources*. <http://w-rabbit.narod.ru/elektr/tepl.htm>
12. I. K. Smolkin, RF Patent 2050502