

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 681.2.084

### ГЕНЕРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ МИКРОЗЕРКАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

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

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: nejevenko@iae.nsk.su*

Проанализированы принципы построения проекторов инфракрасных сцен на основе микрозеркальных технологий как одних из наиболее перспективных устройств для генерации ИК-изображений. Рассмотрены несколько типов проекторов, созданных на этих принципах и рассматриваемых с точки зрения функциональности, минимизации шумов, диапазона длин волн, в котором генерируются изображения. Представлены проблемы, которые возникают при конструировании проекторов инфракрасных сцен, базирующихся на DMD-технологиях, при генерации длинноволновых ИК-изображений.

*Ключевые слова:* стенд для генерации инфракрасных изображений, микрозеркальный модулятор, DLP-технология, DMD-технология.

DOI: 10.15372/AUT20200101

**Введение.** Известно, что одними из главных каналов получения информации для многих приложений являются видеоканалы как в видимом, так и в инфракрасном диапазонах. Проверка таких систем в реальных условиях — весьма трудная и дорогостоящая задача, а зачастую и невыполнимая, поскольку воссоздать самые разнообразные условия наблюдения практически невозможно. Основные элементы таких фотоприёмных устройств (ФПУ) подлежат тестированию в процессе изготовления. Методика их исследования включает определение стандартных параметров ФПУ, таких как чувствительность, светосигнальная, импульсная и пеленгационная характеристики, уровень шума, пороговая чувствительность, пространственное разрешение, количество и номера дефектных элементов, корректирующие коэффициенты по чувствительности и темновым сигналам и другие.

Все исследования выполняются на специализированных стендах с использованием для имитации фоноцелевой обстановки осветителей различных спектральных диапазонов и транспарантов с изображением тестовых объектов. Однако с применением подобного оборудования сложно оценить такую принципиально важную характеристику систем наблюдения, как пороговая чувствительность: если при работе с неподвижной целью на однородном фоне особых проблем не возникает, то при работе с подвижной целью на динамичном пространственно-неоднородном фоне эти методы не подходят. При генерации сцен (изображений) в видимой области также проблем не возникает, поскольку существует огромное количество технических способов формирования таких изображений, главная проблема — в программном обеспечении. Генерировать ИК-изображения намного сложнее, так как нельзя использовать многие типы устройств отображения, применяемые в видимой области, например жидкокристаллические. Существующие технологии генерирования динамической инфракрасной сцены могут быть разделены на три категории: тепловые, квантовые и приборы, использующие модуляцию. Устройства, основанные на тепловых и квантовых эффектах, были рассмотрены в [1].

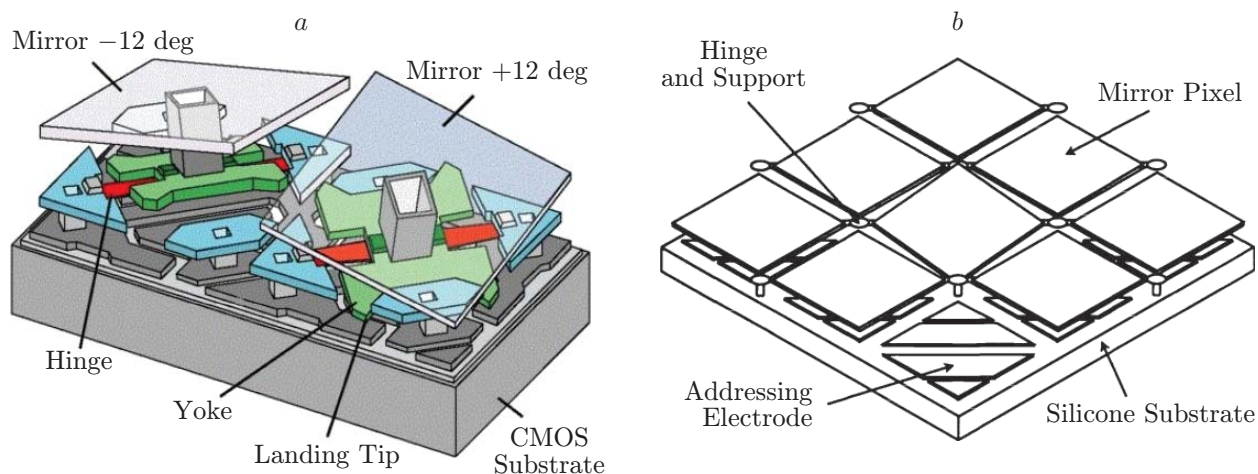


Рис. 1

Целью представленного обзора является выбор принципов построения проекторов инфракрасных сцен (ПИКС), использующих модуляцию теплового потока с учётом универсальности их применения и рекомендаций по построению.

#### Принципы построения ПИКС, основанных на модуляции теплового потока.

Данные ПИКС должны удовлетворять нескольким требованиям, определяемым задачами, для которых они создаются. Эти требования резко ограничивают способы их построения. Главное, они должны формировать световые поля от 3 до 5 мкм и от 8 до 12 мкм (окна прозрачности атмосферы). Количество пикселей в таком поле должно быть от SVGA- (800 × 600) до HD-формата 4K (4096 × 2400). Если проанализировать возможные варианты реализации ПИКС исходя из этих требований, можно прийти к выводу, что наиболее приемлемым представляется ПИКС, базирующийся на DLP- (Digital Light Processing) технологиях, изобретённых компанией Texas Instruments (США). Основным элементом — цифровое мультзеркальное устройство DMD (Digital Micromirror Device). Рассмотрим подробнее такой ПИКС. Ключевым его элементом является матрица микроскопических зеркал (DMD-элементов) с отражающим слоем, выполненным из алюминиевого сплава, обладающего очень высоким коэффициентом отражения [2, 3]. Каждое зеркало крепится к жёсткой подложке, которая через подвижные пластины соединяется с основанием матрицы. Под противоположными углами зеркал размещены электроды, соединённые с ячейками памяти. Под действием электрического поля подложка с зеркалом принимает одно из двух положений, отличающихся точно на  $\pm 12^\circ$  из-за ограничителей, расположенных на основании матрицы. Пара таких зеркал представлена на рис. 1, а из [3], размеры микрозеркала  $\sim 12 \times 12$  мкм.

Каждое микрозеркало крепится на так называемом торсионном подвесе, благодаря чему DLP-матрица может надёжно работать много лет. Торсионный подвес образуют ленты особой формы из сверхпрочного материала. Поворот зеркал осуществляется путём подачи электростатического потенциала на электроды, время поворота микрозеркала — единицы наносекунд. Для управления поворотами микрозеркал используется явление электростатического притяжения между адресным электродом и зеркалом. В процессе работы DMD-матрица попеременно проходит шесть фаз: сброс, освобождение, дифференциация, приземление, загрузка памяти, готовность памяти. Управление зеркалами на DMD-матрице достигается изменением напряжения на шине смещения, которое формируется специальными электронными схемами, размещёнными вне DMD-кристалла. Все зеркала в структуре поворачиваются синхронно, что благоприятно сказывается на дина-

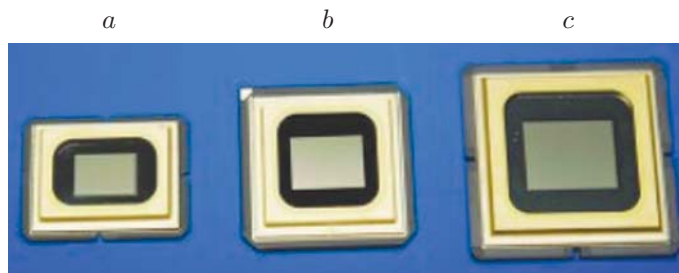


Рис. 2

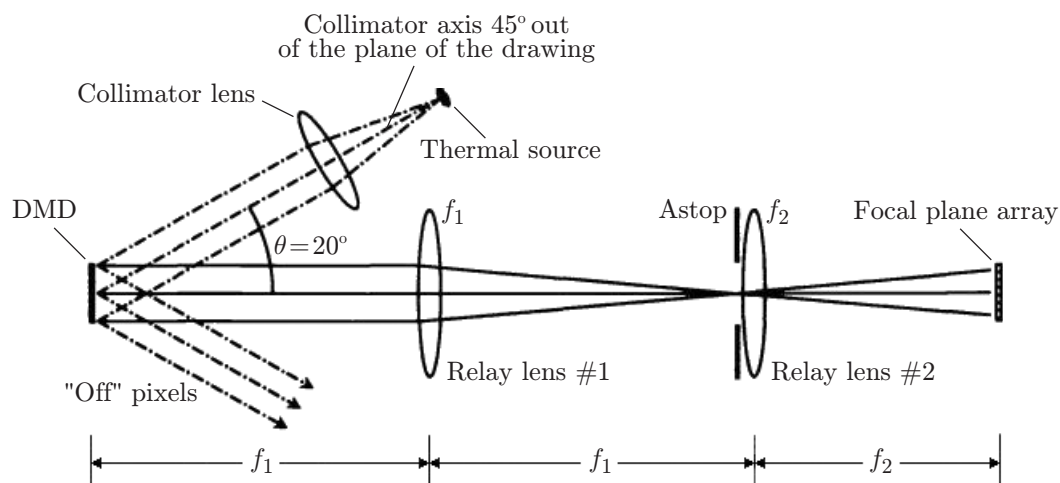


Рис. 3

мических свойствах матрицы — она хорошо передаёт движение.

На рис. 1, *b* показана часть матрицы элементов DMD [4]. Матрица помещена в корпус либо вакуумированный, либо заполненный инертным газом. Очень важным элементом корпуса является защитное стекло: обычно оно пропускает видимый и ближний ИК-свет. Поэтому для дальнего ИК-излучения или необходима специальная конструкция, или корпус подлежит переделке: замена стекла и дальнейшие действия, связанные с обеспечением требуемого заполнения внутри корпуса. Детали этой реконструкции описаны в [5]. Три варианта микрозеркальных устройств, различающихся размерами и количеством микрозеркал, показаны на рис. 2 [6]. На рис. 2, *a* представлены DMD-устройства для формирования изображения в SVGA-формате  $800 \times 600$  пикселей, на рис. 2, *b* — в XGA-формате  $1024 \times 768$  пикселей, на рис. 2, *c* — в SXGA-формате  $1280 \times 1024$  пикселя.

Подробно с характеристиками DMD (конструкцией, поколёвкой, схемами подключения, временными параметрами и т. д.) можно познакомиться в документации компании Texas Instrument, например в [7].

**Оптические схемы ПИКС.** Общая оптическая схема ПИКС, основанного на DMD-технологиях, показана на рис. 3 [4]. Источник теплового излучения (Thermal source) через коллимирующую линзу (collimator lens) освещает DMD-матрицу, зеркала которой в одном положении направляют свет через проецирующую систему, состоящую из двух линз (Relay lens #1, Relay lens #2) в выходную плоскость (Focal plane array), а в другом положении — на поглощающую диафрагму. Рассмотрим некоторые особенности этой оптической системы.

Важнейшим требованием к ней является равномерное освещение DMD-матрицы. Для этого используются сложные коллиматорные системы, одна из которых изображена на

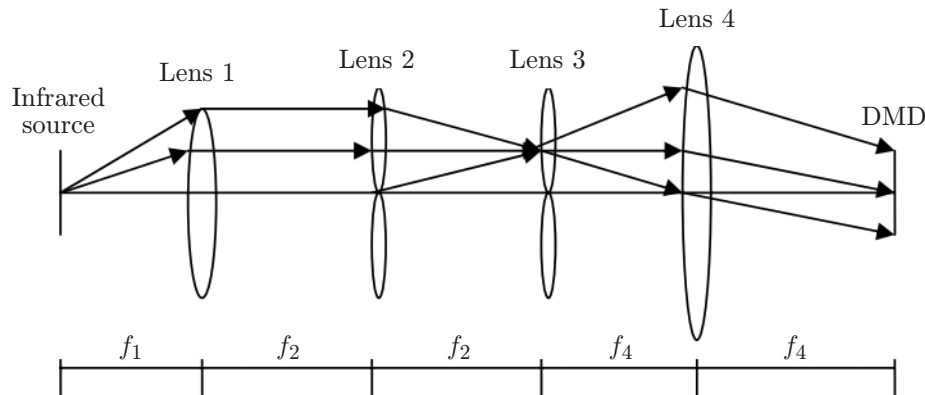


Рис. 4

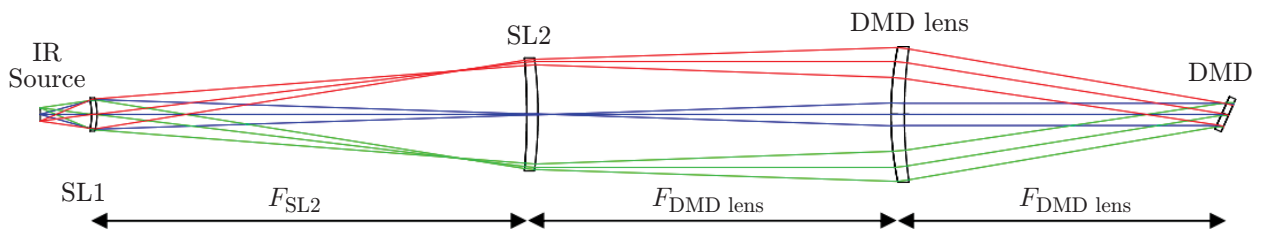


Рис. 5

рис. 4 [8]. Это так называемый «глаз мухи» — оптическая система, в которой два каскада линзовых растров (Lens 2, Lens 3) формируют достаточно равномерное освещение DMD-матрицы. Линзовый растр в [8] состоит из квадратных ( $5 \times 5$ ) линз.

Другой метод создания равномерного освещения для системы из [9], которая представлена в разделе «ПИКС с двумя DMD-матрицами», работает по известной в микроскопии системе Köhler: излучение точечных источников расширяется линзами SL1, SL2, а затем подворачивается специальной линзой DMD lens на мишень (в данном случае на DMD) (рис. 5).

Примеры равномерного освещения DMD-матрицы приведены на рис. 6: освещение, созданное по методу «глаз мухи» (рис. 6, a), освещение, созданное по методу Köhler (рис. 6, b). По горизонтальным осям отложены пространственные координаты, по вертикальной — интенсивность света.

Важнейшая характеристика ПИКС — контрастность генерируемых системой изображений. Проблемой здесь являются отклоняемые зеркалами пучки, которые не создают изображения, но за счёт дифракции и рассеяния попадают в оптическую систему тепловизора. Особенно сильно это проявляется в случае длинноволнового ИК-изображения (8–12 мкм). Интересное решение этой проблемы предложено в [10] (рис. 7). В этой работе используется специальная система призм (TIR prism group), обеспечивающих полное внутреннее отражение при небольшом наклоне пучка света так, что пучки, создающие изображение (рис. 7, a), проходят в проекционную оптическую систему, а пучки, отражённые микрзеркалами, повернутыми на  $-12^\circ$ , за счёт полного внутреннего отражения не попадают в оптическую систему, причём отклоняются и их дифрагированные и рассеянные компоненты (рис. 7, b).

По утверждению авторов, генерируемое ПИКС изображение имеет значительно больший контраст, чем полученное системами без призм.

**Лазерный ПИКС.** Все вышерассмотренные ПИКС для освещения DMD-матрицы использовали тепловые источники с ненаправленным излучением, имеющие небольшую

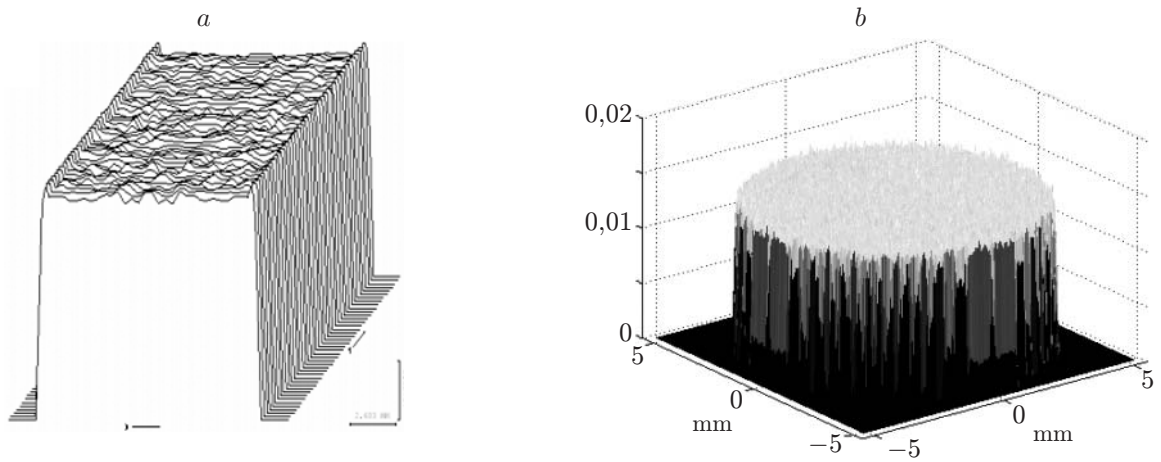


Рис. 6.

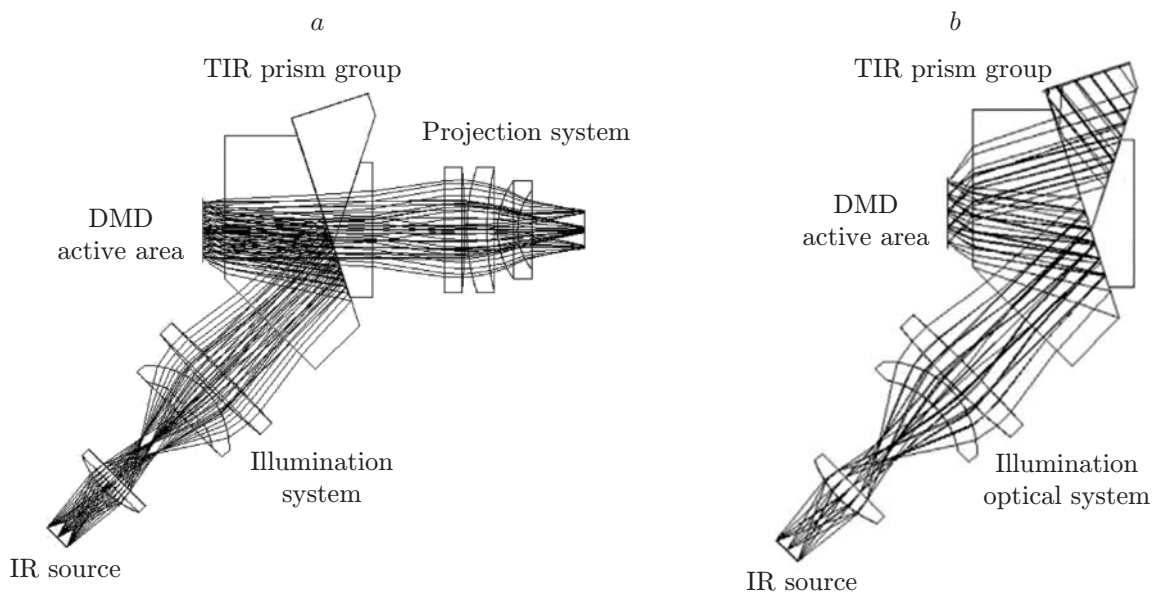


Рис. 7.

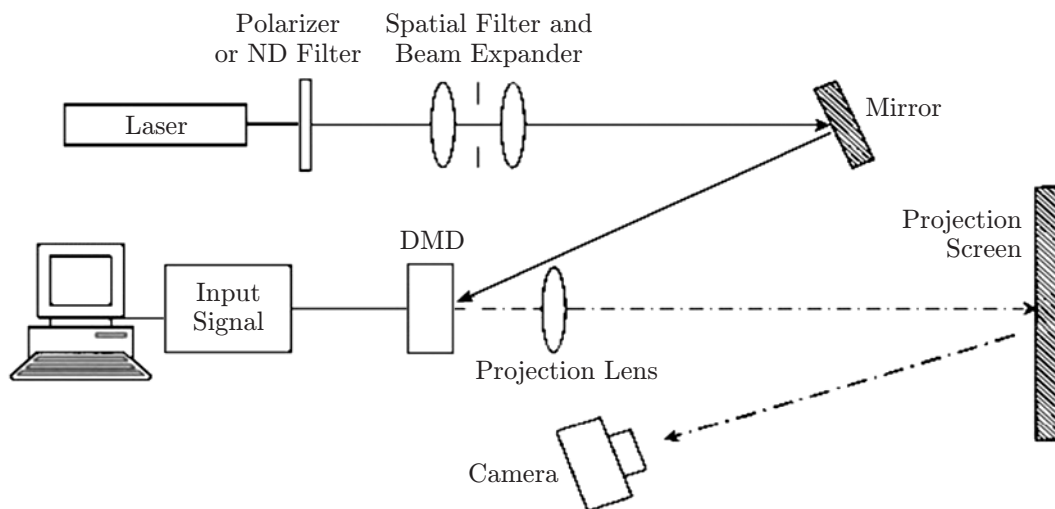


Рис. 8.

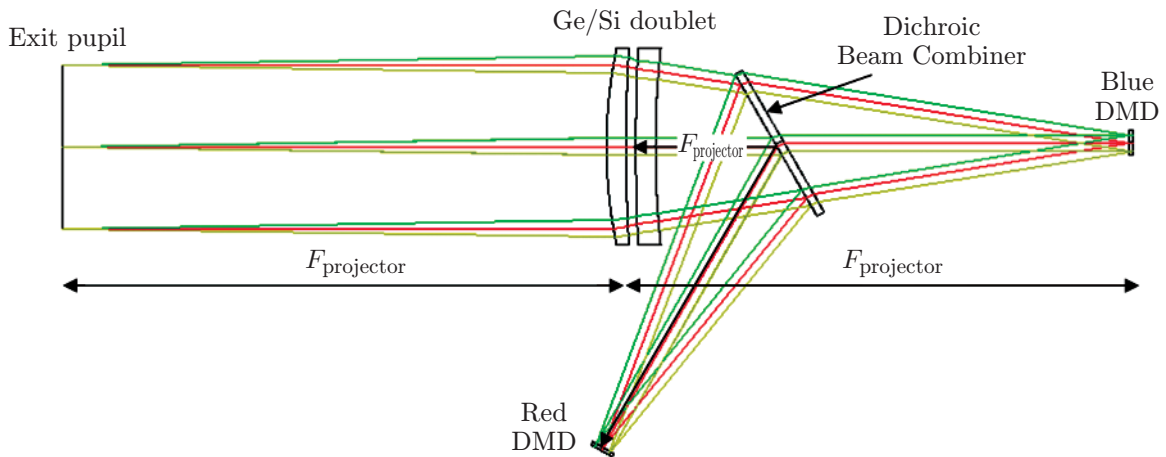


Рис. 9

световую мощность, так что сформированный ими световой поток должен поступать непосредственно в апертуру регистрирующей тепловизионной камеры. С другой стороны, ИК-изображение перспективно формировать для практических применений на экране и уже затем проецировать его на камеры. Этот вариант представлен в [11] и показан на рис. 8.

Для формирования изображения в средневолновой области используется He—Ne-лазер с  $\lambda = 3,39$  мкм, в длинноволновой — CO<sub>2</sub>-лазер с  $\lambda = 10,6$  мкм. Сформированное изображение через систему (Projection Lens) проецируется на обработанный пескоструйным способом алюминиевый экран размерами 215 × 280 мм, который имеет диффузную отражательную способность в ИК-диапазоне больше чем 90 %. В работе тщательно исследуются шумы, которые сопровождают сформированное таким способом ИК-изображение.

**ПИКС с двумя DMD-матрицами.** Представим ПИКС с двумя DMD-матрицами, каждая из которых формирует изображение в своей длине волны [9, 12]. Система была разработана по заказу ВМС США для проверки различных технологий обнаружения ИК-угроз, включая системы предупреждения о ракетном нападении. Оптическая схема такой системы представлена на рис. 9.

Два источника ИК-излучения: условно голубой (Blue,  $\lambda = 3,0$ –4,2 мкм) и условно красный (Red,  $\lambda = 4,2$ –5,0 мкм) освещают две DMD-матрицы через коллиматорные системы. Отражённые световые потоки совмещаются на полупрозрачном дихроичном зеркале (Dichroic Beam Combiner) и через проецирующую германий-кремниевую оптику (Ge/Si doublet) формируют ИК-изображение (в плоскости Exit pupil). Очень важно, что в этой системе предусмотрено охлаждение DMD-матрицы. Оно резко снижает шум, накладываемый на генерируемое изображение. Аксонометрическое изображение ПИКС показано на рис. 10.

Видно, что структура ПИКС достаточно сложна, однако его функциональные возможности оправдывают сложность. Представление о минимальных шумах на генерируемом этим ПИКС изображении и его динамическом диапазоне даёт рис. 11. Здесь изображён клин, генерируемый программным обеспечением ПИКС, справа — шкала интенсивностей от 0 до 1000, по горизонтальной оси — пространственные координаты, по вертикальной оси — интенсивность.

**Проблемы длинноволнового ПИКС.** Таким образом, мы рассмотрели различные конструкции ПИКС, основанные на DMD-технологиях. Однако есть ещё одна проблема при построении ПИКС, которая возникает, если необходимо генерировать изображение в



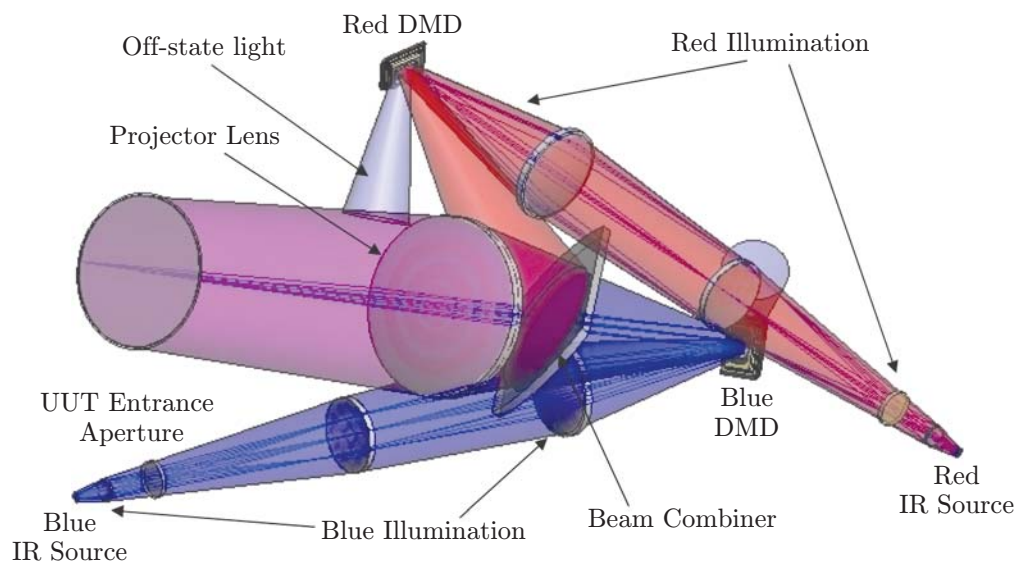


Рис. 10.

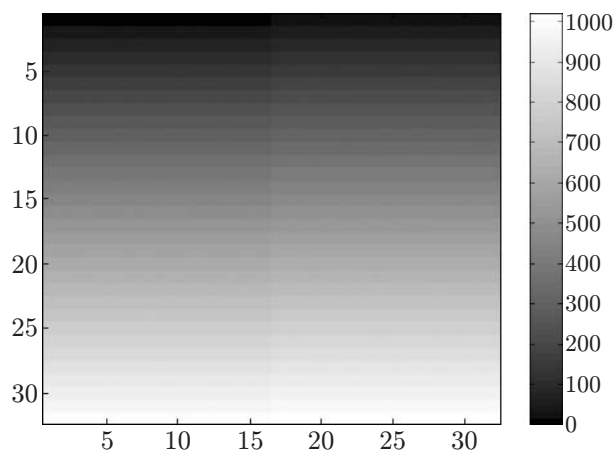


Рис. 11.

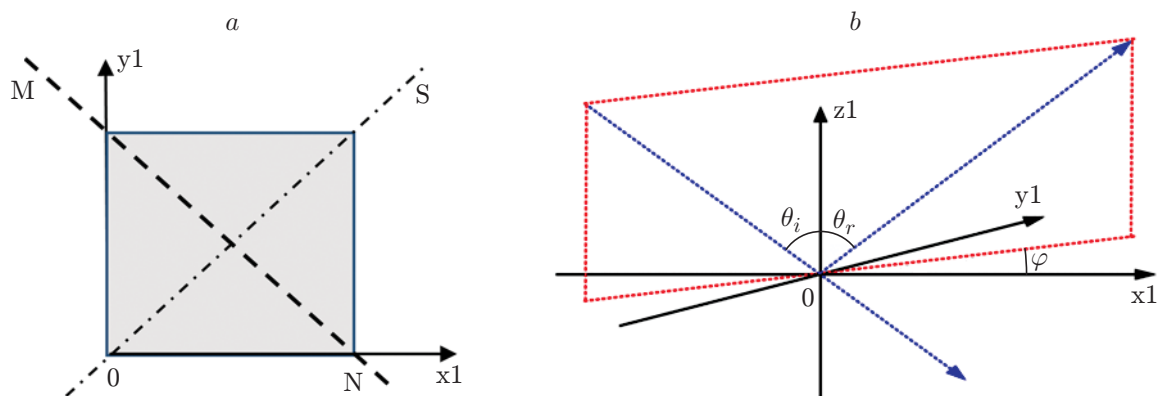


Рис. 12.

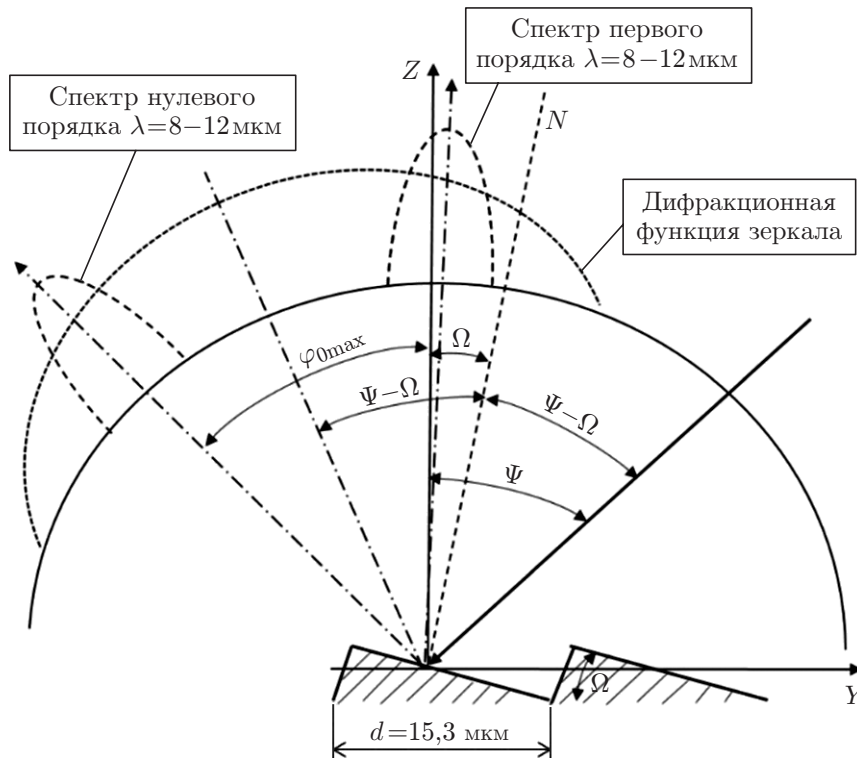


Рис. 13

области 8–12 мкм. Напомним, что размер микрозеркал  $\sim 12$  мкм и отражение зеркалами длинноволнового света весьма специфично. При таком соотношении длины волны и размера микрозеркал геометрия системы освещения и системы считывания радикальным образом отличается от тех, которые используются при длине волны 3–5 мкм, что следует учитывать при конструировании ПИКС для 8–12 мкм. Эта ситуация проанализирована в работах [13] и [14]. Поскольку обе публикации посвящены одной и той же проблеме (причём она исследована как теоретически, так и экспериментально), будем рассматривать их параллельно и проводить сравнительный анализ. Однако сначала остановимся подробнее на геометрии освещения и дифракции на DMD-элементе. На рис. 12, *a* представлено отдельное микрозеркало DMD-матрицы. Оси  $x_1$  и  $y_1$  параллельны его сторонам. Качание микрозеркала происходит вокруг оси MN. А в плоскости, перпендикулярной зеркалу в неактивном состоянии и проходящей через диагональ OS, лежат падающий и отражённый пучки света, если его длина волны существенно меньше размера зеркала.

Чтобы проанализировать геометрию светового освещения, рассмотрим рис. 12, *b*. Система координат соответствует рис. 12, *a*, добавлена ось  $z_1$ , красным пунктиром обозначена плоскость падения пучка, её угол  $\varphi$  с осью  $x_1$  будем называть азимутальным углом, а угол  $\theta$  линии падения пучка света с осью  $z_1$  — зенитным углом. Заметим, что нас интересует единственное направление отражённого или дифрагированного света — по оси  $z_1$  (в направлении проецирующей системы).

В работе [13] массив микрозеркал представлен как дифракционная решётка, исходя из этого рассчитаны дифрагирующие пучки в зависимости от углов падения освещающего пучка. Результаты расчёта сведены в табл. 1, 2, причём, как следует из теории, дифракционная решётка разлагает падающий световой поток на несколько порядков, из которых нулевой является самым интенсивным. В работе [14] принята другая концепция, согласно которой матрица микрозеркал приведена как эшелетт — дифракционная решётка с



Таблица 1

Incident Angle ( $\phi_i, \theta_i$ )	Diffraction Angles ( $\phi_r, \theta_r$ ) and Efficiencies ( $\eta$ ) for Different Orders			
	(-1, -1)	(-1, 0)	(0, -1)	(0, 0)
(0°, 48°)	(-89°, 47°; 2%)	(0°, 0°; 21%)	—	(0°, 48°; 77%)

Таблица 2

Incident Angle ( $\phi_i, \theta_i$ )	Projector Contrast (C)	Incident Angle ( $\phi_i, \theta_i$ )	Projector Contrast (C)
(0°, 38°)	0,51	(90°, 38°)	0,48
(0°, 42°)	0,70	(90°, 42°)	0,62
(0°, 46°)	0,74	(90°, 46°)	0,66
(0°, 50°)	0,52	(90°, 50°)	0,42



Рис. 14

пилообразным профилем. В этом случае интенсивность света, отражённого матрицей в определённом направлении, задаётся произведением двух функций дифракции: на отдельном зеркале и на пилообразной решётке. Это показано на рис. 13.

В соответствии с этим представлением часть светового потока уходит в нулевой порядок, но приблизительно столько же перекачивается в первый порядок, формируя изображение. Из таблицы в работе [13] (фрагмент этой таблицы для углов падения луча азимутального  $\phi = 0^\circ$  и зенитного  $\theta = 48^\circ$ , обеспечивающих близкий к максимальному контраст изображения, представлен в табл. 1) видно, что подавляющая часть света (77 %) уходит в нулевой порядок и только 21 % — в минус первый.

Что касается экспериментального нахождения углов, обеспечивающих максимальный контраст, то результаты получились очень близкими. Экспериментальные результаты работы [13] представлены в табл. 2.

Как видно из таблицы, максимальный контраст изображения получается при азимутальном угле  $\phi = 0^\circ$  и зенитном угле  $\theta = 46^\circ$ . В [14] максимальный контраст был достигнут при  $\phi = 0^\circ$  и  $\theta = 48^\circ$ . Теоретически вычисленные в этой работе углы для максимального контраста также близки к этим значениям. Изображения в области 8–12 мкм из [13] представлены на рис. 14, а, из [14] — на рис. 14, б.

**Заключение.** Из данной работы следует, что DMD-технологии — очень перспективный метод формирования ИК-изображений, поскольку он базируется на принципе отражения от зеркал с алюминиевым покрытием в широком спектральном диапазоне. Временные характеристики этой технологии позволяют обеспечить высокий динамический

диапазон генерируемых изображений; если осуществить охлаждение DMD-матриц, можно значительно уменьшить шумовую составляющую генерируемых изображений, а также повысить их световую мощность, например для проекции ИК-изображений на светоотражающие экраны. При использовании нескольких источников света и нескольких DMD можно генерировать ИК-изображения в различных спектральных диапазонах, что позволяет сгенерировать сцены, максимально приближенные к реальным.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (государственная регистрация № АААА-А17-117052410034-6).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С.** Источники излучения для проекторов инфракрасных сцен // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 67–73.
2. **Pape D. R., Carter J. A.** Digital mirror device infrared scene projector // Proc. SPIE. 1994. **2223**. DOI: 10.1117/12.177950.
3. **Lu J., Fu Y., Liu Zh., Li Y.** Optical system design of dynamic infrared scene projector based on DMD // Proc. SPIE. 2014. **9282**. 928224. DOI: 10.1117/12.2069561.
4. **Barnard K. J., Voreman G. D., Pape D. R.** Crosstalk model of a deformable-mirror-based infrared scene projector // Opt. Eng. 1994. **33**, Iss. 1. DOI: 10.1117/12.153159.
5. **Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С. и др.** Микрозеркальный модулятор для инфракрасных имитационно-моделирующих стендов // Науч. вестн. НГТУ. 2018. **71**, № 2. С. 75–84.
6. **Beasley D. B., Bender M., Crosby J., Messer T.** Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD // Proc. SPIE. 2009. **7210**. 72100I. DOI: 10.1117/12.808329.
7. **Technical Documents Texas Instruments.** DLP5500 DLPR 0.55 XGA Series 450 DMD. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp5500.pdf> (дата обращения: 9.07.2019).
8. **Jia X., Xing T.** Optical design for digital-micromirror device-based infrared scene projector // Proc. SPIE. 2007. **6722**. 67220Q. DOI: 10.1117/12.782890.
9. **Dupuis J. R., Mansur D. J., Grant S., Newbry S. P.** Contrast analysis for DMD-based IR scene projector // Proc. SPIE. 2012. **8356**. 835603. DOI: 10.1117/12.917686.
10. **Qiao Y., Xu X., Pan Y., Li Y.** Research on DMD infrared scene projector with a high contrast ratio infrared prism design // Optik — Intern. Journ. Light and Electron Opt. 2014. **125**, N 22. P. 6854–6859. DOI: 10.1016/j.ijleo.2014.07.115.
11. **Folks W. R., López-Alonso J. M., Voreman G. D. et al.** Characterization of digital-micromirror device-based infrared scene projector // Opt. Eng. 2005. **44**, Iss. 8. 086402.
12. **Mansur D. J., Vaillancourt R., Benedict-Gill R. et al.** High-dynamic range DMD-based infrared scene projector // Proc. SPIE. 2013. **8707**. 870707. DOI: 10.1117/12.2014390.
13. **Han Q., Zhang J., Wang J., Sun Q.** Diffraction analysis for DMD-based scene projectors in the long-wave infrared // Appl. Opt. 2016. **55**, Iss. 28. P. 8016–8021.
14. **Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С.** Генерация динамических сцен для тестирования тепловизионных приборов в дальнем ИК-диапазоне // Автометрия. 2018. **54**, № 1. С. 10–16.

*Поступила в редакцию 09.07.2019*

*После доработки 07.08.2019*

*Принята к публикации 15.08.2019*