

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.384

В. В. ТАРАСОВ, Ю. Г. ЯКУШЕНКОВ

## ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ИНФРАКРАСНЫХ СИСТЕМ 3-ГО ПОКОЛЕНИЯ

Описываются тенденции совершенствования важнейших элементов инфракрасных систем 3-го поколения — фотоприемных устройств, систем охлаждения, оптических систем.

*Ключевые слова:* инфракрасная система, фотоприемное устройство, оптическая система.

В настоящее время продолжается активное совершенствование инфракрасных систем (ИКС) 3-го поколения, работающих в двух или более спектральных диапазонах и имеющих в своем составе матричные фотоприемные устройства (ФПУ). Наряду с ИКС, работающими на нескольких участках инфракрасного (ИК) спектра, создаются оптико-электронные системы (ОЭС), способные принимать оптические сигналы в ультрафиолетовом (УФ), видимом и ИК-диапазонах. Появилось достаточно много ОЭС круглосуточного действия, при работе которых в дневное время используется канал видимого излучения, а ночью или в условиях плохой видимости — инфракрасный канал. В некоторых системах эти каналы работают одновременно.

Совершенствование оптико-электронных и инфракрасных систем осуществляется в основном за счет новой элементной базы — новых оптических систем, фотоприемных устройств, систем охлаждения, схем обработки сигналов, систем отображения и др.

Ведущие компании США и других стран активно разрабатывают новые ФПУ на базе как традиционных материалов (тройные соединения „кадмий—ртуть—теллур“ — КРТ, структуры с квантовыми ямами — СКЯ, структуры на базе InGaAs), так и структур с квантовыми точками или структур на суперрешетках типа II, которые еще совсем недавно находились на стадии лабораторных исследований [1].

Как известно, уменьшение размеров пикселей ФПУ до пределов, близких к дифракционному разрешению, позволяет увеличить их количество, т.е. повысить геометрооптическое разрешение ФПУ. Исследования, проведенные Директоратом ночного видения и электронных датчиков Армии США (NVESD), как и рядом ведущих фирм, показывают, что с точки зрения современных требований к оптическому (геометрооптическому) и энергетическому разрешению, а также к оптимизации конструкций оптических систем и ФПУ, снижению их стоимости и энергопотребления и уменьшению габаритов целесообразно создавать ФПУ, размер пикселей которых составляет 12...15 мкм. При этом возможное уменьшение площади подложки ФПУ позволяет снизить его стоимость и уменьшить объем дьюара системы охлаждения, а следовательно, и энергопотребление этой системы. Однако следует учитывать

возможное возрастание шума, эквивалентного разности температур ( $H_T$ ) за счет насыщения ячеек схемы накопления и считывания зарядов.

Примером разработок, направленных на уменьшение размеров пикселей ФПУ на базе КРТ, являются созданные компанией AIM Infrarot-Module GmbH КРТ-ФПУ (640×512 пкс размером 24 и 15 мкм), работающие в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах [2]. В типовой конструкции ИКС на их основе применяется охлаждаемая диафрагма (диафрагменное число объектива  $K=4,6$ ). При времени накопления 5 мс в среднем ИК-диапазоне значение  $H_T$  не превышает 25 мК, а в длинноволновом ИК-диапазоне с граничными длинами волн спектральной характеристики  $\lambda_{гр} = 9,2$  мкм (при температуре охлаждения  $T_{охл}=67$  К) или  $\lambda_{гр}=10$  мкм при  $K = 2,05$  и времени накопления 180 мкс величина  $H_T$  не превышает 38 мК. Для охлаждения этих ФПУ используются либо традиционные портативные системы с вращающимся компрессором, обладающие сравнительно небольшим энергопотреблением (Ricor R508), либо новые бесшумные линейные системы с увеличенным сроком безотказной работы — более 20 тыс. часов (5X095). Компания ставит своей задачей создание двухдиапазонных ФПУ (0,9...2,5 и 12...15 мкм) для дистанционного зондирования из космоса. Кроме того, для работы в среднем ИК-диапазоне предполагается создать охлаждаемые до 120 К ФПУ (640×512 пкс размером 12 мкм), что позволит уменьшить габариты, массу, энергопотребление и стоимость систем, в которых они будут использоваться.

Для создания двухдиапазонных КРТ-ФПУ (640×512 пкс размером 24 и 20 мкм), работающих в среднем и длинноволновом ИК-диапазонах, компания SELEX Galileo Infrared Ltd. использует эпитаксию паров металлоорганических соединений, что позволяет снизить стоимость, увеличить выход крупноформатных ФПУ с малым процентом дефектных пикселей и уменьшить неоднородность чувствительности отдельных пикселей. Использование подложки из GaAs позволяет объединить фоточувствительный слой и схему накопления и считывания, а также уменьшить, по сравнению с подложками из CdZnTe, остаточные напряжения и потери на отражение. Как сообщается в работе [3], за счет уменьшения размеров пикселей до 24 мкм в среднем ИК-диапазоне удалось достичь значения  $H_T$  порядка 10 мК, а при размерах пикселей 20 мкм — порядка 14 мК. В длинноволновом ИК-диапазоне  $H_T = 23$  и 27 мК для пикселей размером 24 и 20 мкм соответственно. Следует отметить, что достижение значения  $H_T < 20$  мК в среднем ИК-диапазоне для пикселей размером 16 мкм стало возможным при  $T_{охл} \approx 150$  К.

Переход к использованию кремниевых подложек при изготовлении крупноформатных КРТ-ФПУ (1536×1024 пкс размером 15 мкм), работающих в ближнем и среднем ИК-диапазонах при  $T_{охл}=140...160$  К, позволил при диафрагменном числе  $K=3,4$  увеличить  $\lambda_{гр}$  в ближнем ИК-поддиапазоне до 3,7 мкм и в среднем ИК-поддиапазоне до 4,8 мкм при  $T_{охл}=115$  К [4].

Сочетание фоточувствительного слоя из КРТ и кремниевой схемы накопления и считывания позволило компании QinetiQ Ltd. разработать ФПУ с  $H_T \approx 10$  мК при частоте кадров 2 кГц для широкого спектрального диапазона — 2,5...10,5 мкм [5].

Известные достоинства ФПУ на базе структур с квантовыми ямами (ФПУ-СКЯ) послужили основанием для выбора таких устройств при обеспечении работы ряда ИКС в длинноволновом ИК-диапазоне. В работе [6] сообщается о первых испытаниях крупноформатного ФПУ-СКЯ (1024×1024 пкс размером 30 мкм), работающего одновременно в спектральных диапазонах 4,4...5,1 и 7,8...8,8 мкм при температуре 68 К. В этих диапазонах значение  $H_T$  такого мегапиксельного ФПУ составляет порядка 27 и 40 мК соответственно.

Как альтернативу ФПУ на основе КРТ и СКЯ в последние годы все чаще рассматривают фотоприемники на основе суперрешеток с деформированным слоем типа II (Type II Superlattice — T2SL). Такие ФПУ позволяют сравнительно просто получать перестраиваемую длинноволновую границу спектральной характеристики, обладают высокой поглощательной способностью и, как следствие, высокой квантовой эффективностью, более однородны по фоточувствительному слою и имеют малые темновые токи. Сегодня создание крупноформатных ФПУ

на базе T2SL затруднено вследствие ограниченных размеров подложек из GaSb, применяемых при их изготовлении. Лучшие T2SL-ФПУ имеют размер 320×256 пкс. В работе [7] сообщается об изготовлении T2SL-ФПУ на базе гибридных гетероструктур InAs/GaInSb/AlGaInSb (256×256 пкс размером 40 мкм), работающих при температурах 78...80 К и имеющих квантовую эффективность около 40 % на длине волны 8 мкм. Темновые токи этих ФПУ в 10...20 раз меньше, чем у близких по параметрам КРТ-ФПУ. Значение  $\lambda_{\text{гр}}$  таких ФПУ может изменяться от 9 до 11,5 мкм.

В последнее время обсуждается возможность создания T2SL-ФПУ на подложках из GaAs, хорошо освоенного в электронной промышленности. В работе [8] указывается, что в таких ФПУ уже достигнута удельная обнаружительная способность  $D^* = 1,1 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$  при  $T_{\text{охл}} = 77 \text{ К}$  в диапазоне 8...12 мкм.

Для работы в коротковолновом ИК-диапазоне (1,0...2,5 мкм) часто предлагается использовать фотодиодные ФПУ на базе структур InGaAs/GaAsSb типа II, выращенных на подложке из InP. Системы с InGaAs-фотодиодами чувствительны к ИК-излучению с длиной волны до 1,7 мкм (при рабочей длине волны  $\lambda_0 = 0,53 \text{ мкм}$ ) и до 2,5 мкм (при  $\lambda_0 = 0,8 \text{ мкм}$ ), где велико излучение вспышек выстрелов, детонаций, факелов ракет, а также наблюдается ночное свечение атмосферы, вызванное ионизацией в верхних ее слоях и обеспечивающее работу ИКС в безлунную ночь. Малая инерционность InGaAs-фотодиодов позволяет регистрировать быстропротекающие процессы (например, при быстром взаимном перемещении носителя ФПУ и просматриваемой сцены). Эти системы имеют малые темновые токи и поэтому не требуют криогенного охлаждения; они работают с термоэлектрическими охладителями, необходимыми для коррекции неоднородности чувствительности и темновых токов отдельных пикселей.

Спонсируемая Агентством по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам Армии США (DARPA) компания Goodrich ISR Systems создала на основе InGaAs-ФПУ (640×512 пкс) систему SU640KTSX с массой менее 100 г, частотой кадров 60 Гц и разрядностью видеовыхода 12 или 14 бит [9]. В этой системе имеется блок двухточечной коррекции неоднородности, автоматическая регулировка усиления, блок улучшения изображения и форматирования видеовыхода. Термоэлектрический охладитель используется для стабилизации ФПУ при одном значении температуры — 18 или 23 °С. Аналого-цифровые преобразователи интегрированы в схему накопления и считывания, что обеспечивает небольшие размеры, массу и энергопотребление ФПУ. Так, общая потребляемая мощность устройства составляет менее 1 Вт.

В целях уменьшения потребляемой мощности и перехода к трехточечной системе коррекции неоднородности и компенсации любых температурных изменений авторы [9] предлагают применять так называемую параметризованную систему коррекции. Параметры алгоритма коррекции, включающие степень полинома, знак, величину и число битов, предназначены для кодировки каждого полиномиального коэффициента, характерного для конкретного ФПУ. В результате заводской калибровки ФПУ создается загружаемая в память таблица. При этом появляется возможность отказаться от термоэлектрической системы стабилизации температуры, что уменьшает не только потребляемую мощность, но и массу, и габариты системы, прежде всего, за счет отказа от сравнительно большого и тяжелого герметичного вакуумированного корпуса ФПУ. Это особенно важно для разрабатываемых ФПУ, количество пикселей которых составляет 1280×1024.

Компания RTI International сообщила о новых образцах фотоприемников на базе квантовых точек (ФКТ-ФПУ) с увеличенным по сравнению с ФПУ на базе InGaAs спектральным диапазоном [10]. Квантовая эффективность таких фотодиодов превышает 50 %, а постоянная времени составляет менее 10 нс, что делает их пригодными для использования в быстродействующих ИКС. Линейность входного сигнала наблюдалась в динамическом диапазоне

40 дБ. Такие устройства работают при комнатной температуре и хорошо сочетаются с монолитными интегральными схемами считывания на гибких подложках, что снимает любые ограничения по размеру ФПУ. Технология их изготовления достаточно проста, что позволяет значительно снизить стоимость ФПУ и создавать крупногабаритные многодиапазонные МФПУ с расширенной спектральной характеристикой в диапазоне 0,25...1,8 мкм.

Как известно, один из недостатков высокочувствительных ФПУ — необходимость снабжения их криогенными охлаждающими устройствами, что увеличивает стоимость, массу, габариты и энергопотребление ИКС в целом, ограничивает срок службы системы, увеличивает шумы и вибрации. В этой связи все большее распространение в ИКС нового поколения находят импульсно-трубочные криогенные устройства с линейным перемещением регенератора. Такие устройства хотя и уступают устройствам с вращающимся компрессором по габаритам, массе и потребляемой мощности, однако более удобны в размещении, создают меньший акустический шум и вибрации, а главное, обладают значительно большим временем безотказной работы. Уменьшение объема и гидравлического диаметра регенератора, а также увеличение среднего давления позволяет обеспечить высокую эффективность работы криогенных устройств. В экспериментах, описанных в работе [11], хорошая эффективность достигалась при частоте импульсов 100...140 Гц. Увеличение рабочего давления и рабочих частот привело к заметному сокращению времени выхода на требуемый температурный режим и уменьшению габаритов системы охлаждения. Миниатюрное импульсно-трубочное криогенное устройство обеспечивает температуру 80 К и частоту 150 Гц при среднем давлении 5 МПа. Диаметр и длина регенератора составляют 4,4 и 27 мм соответственно. Наименьшая достигнутая температура равнялась 97 К. Время установления температуры 80 К составило 5,5 мин.

Компанией Ricog создано криогенное устройство, работающее на частотах до 200 Гц и обеспечивающее температуру 95 К при хладопроизводительности 1 Вт. В этом устройстве используется поршневой компрессор с подшипниками на подвижных магнитах и пневматически управляемый расширитель, соединенные между собой обратной связью [12].

В связи с постоянным стремлением снизить стоимость и массу системы охлаждения ФПУ, увеличить срок ее службы и избежать применения движущихся деталей не пропадает интерес к термоэлектрическим охладителям. Сегодня лучшие из них, имеющие четыре ступени охлаждения, обеспечивают перепад температур порядка 110 К. Как указывается в работе [13], с их помощью для ФПУ на базе КРТ удастся обеспечить рабочую температуру 210 К и значение  $H_T$  порядка 30 мК при  $K=2$ .

Компаниями BAE Systems, Vectronix, DRS, Raytheon Vision Systems, Ulis, L-3 Infrared Products, FLIR Systems ведутся перспективные разработки тепловизионных систем с неохлаждаемыми приемниками на базе микроболометров, размер пикселей которых составляет 15...17 мкм. Количество пикселей разработанных ФПУ составляет 640×480 и 1024×768, а  $H_T \leq 45$  мК. В настоящее время Директорат ночного видения и электронных датчиков Армии США (NVESD) финансирует исследования и разработки, имеющие целью довести размеры пикселей микроболометров до 12 мкм.

Если раньше в зарубежной научно-технической литературе сведения о панорамных оптических системах приводились в виде общих схем и патентных описаний, то в 2010 г. появились публикации о разработках промышленных образцов ОЭС с панорамными объективами в виде моноблоков.

Так, в работе [14] описывается панорамный ИК-датчик, работающий в спектральном диапазоне 3,4...4,9 мкм и имеющий угловое поле 360° (по азимуту) и 60° (по углу возвышения). В датчике используется ФПУ (640×512 пкс размером 20 мкм) на базе InSb. Угловое разрешение датчика близко к 6 мрад, но изменяется по углу возвышения. Частота кадров достигает 120 Гц. Датчик имеет цифровой 14-битовый выход. Габариты датчика — 228 мм (длина)

и 218 мм (диаметр); масса — менее 9 кг, потребляемая мощность — от 30 до 50 Вт в зависимости от режима эксплуатации.

Для перископов подводных лодок была разработана панорамная ИКС с угловым полем  $360 \times 40^\circ$  ( $-10 \times +30^\circ$ ), работающая в среднем ИК-диапазоне [15]. В ней использовано охлаждаемое до 80 К ФПУ ( $2048 \times 2048$  пкс размером 15 мкм) на базе InSb. Система охлаждения обеспечивает хладопроизводительность порядка 750 мВт при комнатной температуре и потребляемой мощности 50 Вт. Испытания системы показали, что она обеспечивает величину  $H_T \approx 30$  мК по всей площади ФПУ при остаточной неоднородности по всему изображению менее 0,3 %. Частота кадров при различном времени накопления зарядов составляет 30 Гц. Габариты системы — около 200 мм (высота) и 166 мм (диаметр).

Наряду с созданием панорамных систем с объективом в виде единого моноблока продолжается разработка ИКС с комбинированием отдельных широкопольных объективов в единую систему с азимутальным угловым полем  $360^\circ$ . Примером может служить противоракетная корабельная инфракрасная следающая система ARTEMIS, предназначенная для автоматического обнаружения низколетящих воздушных и надводных целей по их собственному излучению и для слежения за ними [16]. Система состоит из трех сопряженных по азимуту (расположенных вокруг одной вертикальной оси) датчиков, объективы которых имеют угловые поля  $120 \times 26^\circ$ . Система работает в спектральном диапазоне 3...5 мкм с частотой кадров 10 Гц.

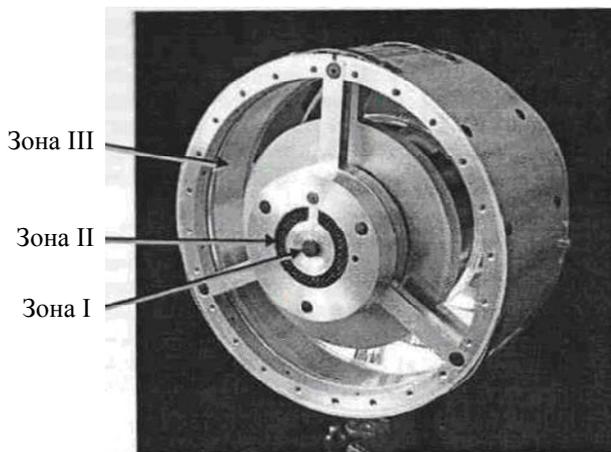


Рис. 1

Агентство DARPA спонсирует программу MONTAGE по разработке компактной ОЭС, работающей одновременно в видимом и ИК-диапазонах спектра [17]. Уменьшение продольного габарита оптической системы достигается за счет использования сложного двустороннего зеркала с несколькими отражательными концентрическими кольцевыми зонами различной кривизны на каждой стороне зеркала и деления входного зрачка объектива на три концентрические зоны (рис. 1). Центральная зона I (в виде круга), заменяющая обычную для зеркальных и зеркально-линзовых систем зону затенения, используется для размещения широкопольного

линзового объектива, работающего в видимом диапазоне. Следующая за ней кольцевая зона II используется для работы в видимом диапазоне зеркального объектива с трехкратным отражением лучей. Третья, периферийная кольцевая зона III работает в длинноволновом ИК-диапазоне как зеркальный объектив с четырехкратным отражением лучей, собирающихся на чувствительном слое приемника—микроболометра ( $640 \times 480$  пкс). Концентрические кольцевые асферические поверхности на обеих сторонах зеркала выполнены с помощью алмазного точения.

Так как все три объектива (зоны) имеют общую оптическую ось, в системе отсутствует параллакс создаваемых ими изображений, что особенно важно для просмотра сцен с большой глубиной поля.

Как известно, одним из способов повысить геометрическое разрешение ОЭС без увеличения габаритов ФПУ и количества пикселей, является микросканирование. Наиболее часто амплитуда принудительного перемещения изображения по поверхности фоточувствительного слоя ФПУ равна размеру двух пикселей по каждой из декартовых координат. Это позволяет удвоить эффективное количество пикселей ФПУ, т.е. повысить в два раза разрешение, не увеличивая размеры устройства, а также удвоить частоту Найквиста, определяющую предельную пространственную частоту в спектре изображения, передаваемую без искажений.

В работе [18] описывается телевизионная ИКС с зеркально-линзовым объективом, построенным по схеме Кассегрена с коэффициентом затенения 0,5, на базе микроболометра (640×480 пкс размером 25 мкм). Микросканирование в этой системе обеспечивается путем колебания второго зеркального компонента объектива (контррефлектора) с амплитудой 50" по двум осям, совпадающим с осями матрицы ФПУ. Наклоны контррефлектора приводят к перемещениям изображения на два пиксела по каждой оси, т.е. эффективный размер ФПУ становится равным 1280×960. Это позволило отказаться от увеличения вдвое фокусного расстояния объектива в целях повышения разрешения и, собственно, от увеличения его массы и габаритов.

Система работает в спектральном диапазоне 7...14 мкм, фокусное расстояние объектива равно 50 мм, а угловое поле 22,6°. Эффективное диафрагменное число — не менее 1,5. Поверхности первичного и вторичного зеркал, а также полевой линзы, помещаемой перед микроболометром, выполнены асферическими. Падение освещенности для углов в 6° не превышает 15 %. Объектив снабжен блендами, снижающими засветку. Диаметр объектива 75 мм, а длина 100 мм; его масса не превышает 250 г. Подбор материалов зеркал и их оправ позволяет осуществить атермализацию для диапазона окружающих температур от -30 до +60 °С. Глубина изображаемого пространства — от 25 м до бесконечности. Размер чувствительного слоя микроболометра 16×12 мм<sup>2</sup>. Значение  $H_T$  при эффективном относительном отверстии объектива 1:1 и частоте кадров 60 Гц составляет около 60 мК. Переход от одного пиксела к другому при микросканировании не превышает 1,5 мс, что гораздо меньше постоянной времени микроболометра (7,5 мс). В системе имеется ручная механическая система фокусировки с разрешением 5 мкм в диапазоне 2,5 мм. Общая длина оптического блока, включая бленду, составляет 114 мм. Микросканирование повышает разрешение системы до 40 лин/мм. Наибольшее разрешение достигается в центре углового поля. Виньетирование из-за затенения части пучка лучей контррефлектором на краю поля составляет около 69 %. Этот эффект устраняется путем калибровки системы, при которой между полевой линзой и микроболометром периодически вводится затвор-шторка. Дисторсия на краю поля не превышает 2 %. Механизм микросканирования, потребляющий мощность порядка 1 Вт, может быть отключен, если не требуется высокое пространственное разрешение.

При разработке двухдиапазонных систем все чаще применяются оптические системы с переменным диафрагменным числом объектива, в состав которого входит охлаждаемая диафрагма. При меньшем диафрагменном числе  $K$  лучше решается задача обнаружения излучающих целей в длинноволновом ИК-диапазоне, а при большем  $K$  — задача идентификации целей в среднем ИК-диапазоне. Так, разрабатываемые компанией AIM Infrarot-Module GmbH системы имеют охлаждаемые диафрагмы, что позволяет изменять диафрагменные числа: от  $K=3$  и менее в длинноволновом ИК-диапазоне до  $K=6$  и более в среднем ИК-диапазоне [2].

Для ослабления или исключения вредного влияния собственного излучения оптических деталей на работу высокочувствительных ФПУ, охлаждаемых до криогенных температур, продолжаются разработки ИКС, в которых оптическая система помещается вместе с ФПУ в единый охлаждаемый объем — DDCA (Detector-Dewar-Cooler Assembly). Достоинствами таких систем являются:

- отсутствие механической или электронной системы коррекции расфокусировки, возникающей при изменении температуры окружающей объектив среды;
- снижение требований к системе коррекции неоднородности чувствительности пикселей ФПУ, также возникающей при изменении температуры окружающей среды; кроме того, за счет уменьшения количества и длительности этапов калибровки ФПУ при такой коррекции уменьшается „нерабочее“ время функционирования системы, когда, например, перед ФПУ помещается равномерно излучающая шторка;

— снижение уровня фона от внутриприборного излучения, т.е. собственного излучения оптических деталей и их оправ, имеющих стабилизированную криогенную температуру охлаждения.

Интересной представляется конструкция ИКС со встроенной в сосуд Дьюара оптической системой, состоящей из трех линз и спектрального фильтра (рис. 2) [19]. Перед дьюаром расположен неохлаждаемый защитный оптический компонент — обтекатель, представляющий собой тонкий выпуклый мениск с одинаковыми внешним и внутренним радиусами, т.е. имеющий нулевую оптическую силу. Охлаждаемая до 80 К система с диафрагменным числом  $K=2$  и угловым полем  $105 \times 135,5^\circ$  предназначена для получения изображения дальнего поля при фокусировке на бесконечность или на другое фиксированное большое расстояние. В связи с разными углами падения лучей на поверхности компонентов использованы просветляющие покрытия двух типов (для малых и больших углов падения). Масса системы не превышает 5 г, а габариты невелики, что делает незначительной тепловую нагрузку (охлаждаемую массу) системы охлаждения.

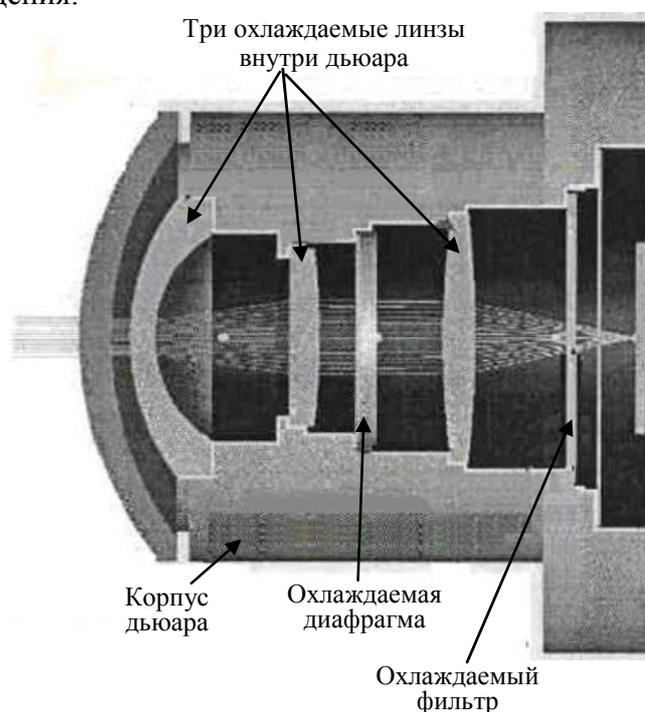


Рис. 2

Исследования этой системы показали, что качество изображения точечного объекта, полученного с ее помощью, близко к дифракционному пределу — значение функции передачи модуляции не снижалось менее 0,66...0,7 от максимума для угла визирования  $72^\circ$  и пространственной частоты 24 ед./мм. В кружке рассеяния радиусом 7 мкм содержалось 70...75 % от всего потока, собираемого системой. Изменение облученности чувствительного слоя ФПУ не превышало 10 % на краю поля размером  $65^\circ$ .

Одним из направлений развития современных ОЭС является создание адаптивных систем, способных изменять свои параметры и характеристики при изменении внешних условий. Простейшими являются системы, в которых автоматически изменяется величина потока при облученности на фоточувствительном слое ФПУ, что предотвращает насыщение ячеек схемы считывания зарядов с пикселей ФПУ или растекание зарядов по соседним пикселям, т.е. снижение разрешающей способности всей системы.

Примером таких систем является устройство, работающее в видимом и ближнем ИК-диапазонах и названное динамическим солнечным фильтром (DSF — Dynamic Sunlight Filter) [20]. В исходном (нормальном) состоянии, когда облученность не превышает некоторого заданно-

го уровня, фильтр полностью прозрачен. После устранения внешней мощной засветки фильтр восстанавливает свое первоначальное пропускание. Фильтр создан с использованием новых наноструктур и наночастиц, применяемых для формирования нелинейных рассеивающих сред. Такие среды при малых мощностях проходящего через них сигнала только поглощают поток, но рассеивают его. Авторы [20] предполагают, что время отклика (постоянная времени фильтра) не превышает 50 мс.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарасов В. В., Торшина И. П., Якушенков Ю. Г.* Инфракрасные системы 3-го поколения. М.: Логос, 2011. 240 с.
2. *Breiter R., Ihle T., Wendler J. et al.* MCT IR detection modules with 15 mcm pitch for high reliability applications // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766039-1...11.
3. *Abbott P., Pillans L., Knowles P., McEwen R. K.* Advances in dual-band IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766035-1...11.
4. *Melkonian L., Bangs J., Elizondo L. et al.* Performance of MWIR and SWIR HgCdTe-based focal plane arrays at high operating temperatures // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602W-1...11.
5. *Gordon N. T.* Thermo electrically cooled focal plane arrays based on MCT // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602X-1...8.
6. *Gunapala S. D., Bandara S. V., Liu J. K. et al.* Demonstration of 1024 [ 1024 pixel dual-band QWIP focal plane array // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76603L-1...8.
7. *Hood A., Evans A. J., Ikhlassi A. et al.* LWIR high performance focal plane arrays based on type-II strained layer superlattices (SLS) materials // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76601M-1...8.
8. *Razeghi M., Huang E. K., Pour B.-M.N.S.A., Delaunau P.-Y.* Type II antimonide-based superlattices for the third generation infrared focal plane arrays // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76601F-1...14.
9. *Battaglia J., Burzi V., Moyer B. et al.* Parameterized nonuniformity corrections (NUC) for non-temperature stabilized InGaAs SWIR sensing // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76600J-1...12.
10. *Klem E. J., Lewis J. S., Temple D.* Multispectral UV-Vis-IR imaging using low-cost quantum dot technology // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602E-1...9.
11. *Radebaugh R., Garaway I., Veprik A. M.* Development of miniature, high frequency pulse tube cryocoolers // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602J-1...11.
12. *Veprik A., Zehnter S., Pundak N.* Split Stirling linear cryogenic cooler for a new generation of high temperature infrared images // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602K-1...13.
13. *Gordon N. T.* Thermoelectrically cooled focal plane arrays based on MCT // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76602X-1...11.
14. *Bjork C., Wan W.* Mid-wave infrared (MWIR) panoramic sensor for various applications // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76600B-1...9.
15. *Nichols J. M., Waterman J. R.* Performance characteristics of a submarine panoramic infrared sensor // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766005-1...9.
16. *Fontanella J.-C., Delacourt D., Klein Y.* ARTEMIS: first naval staringIRST in service // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766006-1...11.
17. *Morrison R., Stack R., Athale R. et al.* An alternative approach to infrared optics // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76601Y-1...11.
18. *Le Noc L., Tremblay B., Martel A. et al.* 1280 x 960 pixel microscanned infrared imaging module // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 766021-1...10.
19. *Singer M.* Design of a cryogenic IR detector with integrated optics // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 76601Z-1...9.
20. *Donval A., Fisher T., Blecher G., Oron M.* Dynamic sunlight filter (DSF) – a passive way to increase the dynamic range in visible and SWIR cameras // SPIE Proc. 2010. Vol. 7660. P. 7660024-1...8.

**Сведения об авторах****Виктор Васильевич Тарасов**

— д-р техн. наук, профессор; Московский государственный университет геодезии и картографии, кафедра оптико-электронных приборов;  
E-mail: doctortarasov@yandex.ru

**Юрий Григорьевич Якушенко**

— д-р техн. наук, профессор; Московский государственный университет геодезии и картографии, кафедра оптико-электронных приборов;  
E-mail: yakush@miigaik.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию  
30.08.11 г.