

Специальный выпуск:

**Работы Федерального научно-производственного центра
НПО “Государственный институт прикладной оптики”
в области инфракрасной техники**

СОДЕРЖАНИЕ

- 3 Предисловие выпускающего редактора. К 50-летию со дня основания Государственного института прикладной оптики**
Белозеров А.Ф.

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

- 5 Инфракрасная техника в НПО “Государственный институт прикладной оптики”**
Иванов В.П., Белозеров А.Ф.
- 12 Оптические дефлекторы для современных тепловизионных приборов**
Тевяшов В.И., Шушарин С.Н.
- 17 Фотоэлектрический датчик синхроимпульсов тепловизионных приборов**
Демин А.П., Идрисов А.А., Омелаев А.И., Чугунов Ю.П.
- 21 Модернизированный высокоточный измерительный стенд ВЭ-1227М**
Бугаенко А.Г., Зарипов Р.И.
- 24 Дальность действия активно-импульсных систем низкоуровневого телевидения**
Овсянников В.А., Филиппов В.Л.
- 28 Оптико-электронная активно-пассивная система формирования яркостно-дальностных изображений фоноцелевой обстановки РФ-ЛЛК**
Кадрова Г.Н., Каплан В.Г., Липатов В.В., Непогодин И.А., Семин В.А., Степанов В.А., Яцык В.С.
- 33 Разработка комплекса оборудования для испытания авиационных оптико-электронных приборов**
Берман А.М., Дорофеева М.В., Клочко Н.Ю., Митякин А.С., Муравьев Б.П., Хисамов Р.Ш., Яцык В.С.
- 36 Получение асферических оптических поверхностей вращения в широком диапазоне технологических параметров**
Кукс В.Г., Хуснутдинов А.Г.
- 44 Делительная машина маятникового типа для изготовления нарезных периодических рельефно-фазовых структур**
Мельников А.Н., Мирумянц С.О., Лукин А.В.

ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

- 50 Самолетные исследования динамики аэрозоля, определяющей изменчивость оптической погоды**
Максимюк В.С., Филиппов В.Л.

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

- 55 **Критерии и метод оценки информативности признаков объектов в задачах лазерной локации**
Непогодин И.А.
- 65 **Эффективность работы мультиплексоров/демультиплексоров с дифракционными решетками**
Кулакова Н.А., Мирумьянц С.О.

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

- 70 **Объективы с непрерывно изменяющимся фокусным расстоянием для работы в инфракрасной области спектра**
Иванов В.П., Козлов С.Д., Морозов А.Е., Нигматуллина Н.Г.
- 74 **Метод измерения функции передачи модуляции несканирующих тепловизионных приборов**
Овсянников В.А., Филиппов В.Л., Шушарин С.Н.
- 77 **Согласование размеров кружка рассеяния объектива с элементом фотоприемного устройства тепловизионного прибора**
Овсянников В.А., Филиппов В.Л.

ГОЛОГРАФИЯ

- 80 **Голограммные оптические элементы**
Лукин А.В.

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

- 88 **Зависимость коэффициента поглощения кристаллического германия в ИК области спектра от удельного сопротивления**
Несмелова И.М., Астафьев Н.И., Несмелов Е.А.

ИНФОРМАЦИЯ

- 93 **Информационное сообщение**
- 94 **Коллективная монография “Оптика наноструктур”**

Сдано в набор 16.10.06. Подписано в печать 00.00.06. Формат бумаги 60×84/8.

Бумага офсетная № 1. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.

Заказ № 00. Отпечатано в ООО «ЦТТ». Тираж 300 экз. Цена подписная.

Адрес типографии: 199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия, д. 16.

Качество графических материалов соответствует представленным оригиналам.

Научный редактор **Н.Ф. Соболева**

Корректор **Т.Л. Широкова**

РАБОТЫ ФЕДЕРАЛЬНОГО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦЕНТРА “ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ОПТИКИ” В ОБЛАСТИ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕХНИКИ

ПРЕДИСЛОВИЕ ВЫПУСКАЮЩЕГО РЕДАКТОРА

К 50-летию со дня основания Государственного института прикладной оптики

© 2007 г. А. Ф. Белозеров, доктор техн. наук

ФНПЦ НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

12 апреля 2007 года Государственному институту прикладной оптики (ГИПО) исполняется 50 лет. Поколение ученых, инженеров, служащих, рабочих, которые трудились в конце 1950-х – начале 1960-х годов, заложило прекрасные традиции прикладного оптического центра в г. Казани: глубокая теоретическая проработка каждой проблемы, их техническая новизна, практическая направленность решаемых задач, ответственность за принятые технические решения, четкость и обязательность во взаимоотношениях с коллегами из других предприятий, широкое внедрение результатов работ в военной технике и гражданских отраслях хозяйства страны.

К своему 50-летию НПО ГИПО пришло на новом этапе научно-технического и экономического развития. Для научной стороны характерен переход к созданию инфракрасных оптико-электронных систем новых поколений, использующих в качестве приемников излучения субматрицы и матрицы. Важную роль начинают играть комплексированные, многоспектральные системы. Для обеспечения этих работ необходимо выполнить новый цикл физических исследований окружающей среды, атмосферы, метрологических разработок. Необходимо получить исходные данные с гораздо более высокими значениями геометрического и температурного разрешения на метрологически обеспеченной спектрорадиометрической аппаратуре. Аппаратура должна иметь возможность получения многоспектральных и гиперспектральных исходных данных. Будут широко использоваться новые технологии автоматизированной и автоматической об-

работки изображений, в перспективе необходимые для создания роботизированных оптико-электронных систем и комплексов. В свою очередь эти разработки потребуют развития новых технологий и новой элементной базы, включающей многоспектральные фотоприемники, миниатюрные системы охлаждения, электронные компоненты с малым энергопотреблением, новые виды оптических покрытий, дифракционную и интегральную оптику, асферическую оптику, изготовленную на новом высокопроизводительном оборудовании. Как никогда становится актуальной необходимость технического перевооружения и оснащения более производительным оборудованием.

В экономическом плане НПО ГИПО сегодня – это экономически стабильная, растущая, самодостаточная организация с большим потенциалом для инновационного развития, с большими экспортными возможностями.

Реализация ранее созданного научного задела, начало работ по новым научно-техническим направлениям, применение нового технологического оборудования вызвали новую волну творческой активности ученых и инженеров НПО ГИПО. Результаты последних исследований и разработок, полученные сотрудниками ГИПО, изложены в статьях двух специальных выпусков “Оптического журнала”, посвященных 50-летию ГИПО. Надеюсь, что читатель получит более полное представление о НПО “Государственный институт прикладной оптики” и направлениях его деятельности, прочитав эти два выпуска.

Белозеров Альберт Федорович – работает в НПО “Государственный институт прикладной оптики” с 1960 года после окончания Московского высшего технического училища им. Н.Э. Баумана. В течение 30 лет (1975–2005 гг.) был научным руководителем ГИПО, работая в должности заместителя директора (генерального директора) по научной работе. В эти годы ГИПО стал признанным оптическим цент-



ром страны, комплексно решающим многие проблемы оптики, оптико-электронного приборостроения и оптической технологии, прежде всего в инфракрасной области спектра.

Области научных интересов: приборы для визуализации газовых потоков в аэродинамических трубах, голография, тепловидение.

Доктор технических наук, профессор. Заслуженный машиностроитель Российской Федерации. Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники. Автор и соавтор более 150 научных работ и изобретений, в том числе 3 монографий. Член-корреспондент Российской академии инженерных наук им. А.М. Прохорова.

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.384.3

ИНФРАКРАСНАЯ ТЕХНИКА В НПО “ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ОПТИКИ”

© 2007 г. **В. П. Иванов**, доктор техн. наук; **А. Ф. Белозеров**, доктор техн. наук
НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Исследования и разработки в области инфракрасной (ИК) техники – стратегически важном научно-техническом направлении оптико-электронного приборостроения – основа деятельности НПО ГИПО. В отличие от других предприятий, решающих, как правило, отдельные проблемы ИК техники, ГИПО, традиционно располагая большим творческим и научно-техническим потенциалом, создав хорошую производственно-технологическую базу, взял на себя комплексное решение проблемы – от изучения физических основ и принципов функционирования объектов вооружения и военной техники, оснащенных современными ИК оптико-электронными системами (ОЭС), создания новых оптических технологий и новой элементной базы ИК техники до пуска опытных образцов и серийного изготовления ОЭС, работающих в ИК диапазоне спектра, а также научно-технического сопровождения при их эксплуатации. Авторы отмечают большую роль ученых Государственного оптического института им. С.И. Вавилова в становлении ИК приборостроения в ГИПО.

Коды OCIS: 000.3110.

Поступила в редакцию 06.07.2006.

Государственный институт прикладной оптики (ГИПО) создавался как центр прикладной оптической науки. До 1966 года он функционировал в качестве филиала Государственного оптического института им. С.И. Вавилова. В 1997 году НПО ГИПО присвоен статус федерального научно-производственного центра.

С первых лет своей деятельности ГИПО стал занимать свою “нишу” в оптической тематике отрасли – “нишу” ночной оптики и новых оптических технологий в ИК области спектра, первые разработки в которой только-только начали появляться в ГОИ им. С.И. Вавилова и нескольких других НИИ. Начало разработки базовых технологий и элементной базы ИК техники в ГИПО было положено такими известными учеными ГОИ, как Тибилев С.П. (полупроводниковое материаловедение), Куманин К.Г. (асферизация оптических поверхностей), Кузнецов А.Я., Крылова Т.Н., Суйковская Н.В. (оптические покрытия), Герасимов Ф.М. (дифракционные решетки).

В начале 1960-х годов тематика лабораторий филиала ГОИ формировалась головными лабораториями ГОИ. Ход выполнения НИОКР контролировался кураторами ГОИ, которые, казалось, иногда “соревновались” между собой в скорейшей передаче без лишних формальностей молодым и талант-

ливым ученикам в филиале своего научного задела. М.М. Мирошников, С.Я. Эмдин, В.Г. Вафиади, Н.С. Шестов, Е.Г. Яхонтов, Ф.И. Хайтун, А.А. Иванов, А.Я. Кузнецов, Б.Е. Смолянский, А.И. Лазарев, М.П. Ванюков, А.А. Забелин и другие, сами еще сравнительно молодые или далеко не старые ученые, большими группами выезжали в свой филиал для обучения на месте молодых коллег основам ИК техники и конструирования. Все известные методы обучения – многомесячные стажировки нескольких десятков молодых людей в научных лабораториях ГОИ, учеба в аспирантуре, лекции и доклады известных ученых ГОИ в Казани, их статьи и книги, передача личных практических навыков работы в ИК области спектра – были использованы в этой работе в течение нескольких лет. Технологией обучения сотрудников филиала управлял заместитель директора ГОИ по научно-технической части Евгений Николаевич Царевский, ежегодно многократно приезжавший в Казань “для разбора полетов”.

Ответ молодого филиала ГОИ, а затем и самостоятельного ГИПО не заставил себя долго ждать: научная и техническая отдача началась немедленно. ГИПО все более уверенно становился центром прикладных исследований и разработок новых оптико-электронных приборов и новых оптических технологий в ИК области спектра. Основные, дей-

ствующие и сегодня научно-технические направления НПО ГИПО были заложены в первые годы его функционирования.

В ГИПО в первые 25 лет деятельности разработаны и внедрены на оптических предприятиях страны около 200 новых технологических процессов современного оптического производства. Среди них такие наукоемкие технологии, применимые в ИК области, как неразъемное соединение оптических элементов методом глубокого оптического контакта, изготовление асферических оптических деталей с большим отступлением от ближайшей сферы, комплекс оборудования для метрологического обеспечения разработки, выпуска и эксплуатации тепловизионных приборов на всех этапах их жизненного цикла, высокопрочные лазерные покрытия крупногабаритной оптики, зеркала с малыми потерями на рассеяние и поглощение для лазерных гироскопов. Многие из этих технологий не потеряли актуальности и сегодня.

В эти же годы были достигнуты серьезные успехи по созданию новых полупроводниковых материалов, чувствительных к излучению в ИК области спектра: монокристаллов антимонида индия (InSb) на область спектра 3–5 мкм; твердых растворов тройных соединений кадмий–ртуть–теллур (КРТ), свинец–олово–теллур (СОТ), свинец–олово–селен (СОС) на области спектра 3–5 и 8–14 мкм; германия, легированного ртутью (Ge:Hg) и золотом (Ge:Au) на область спектра 8–14 мкм. Позднее создание таких материалов стало технической основой для разработок в стране тепловизионной техники.

Считая огромной значимость разработки полупроводникового материала КРТ для современной ИК техники, отметим, что серийный выпуск новейших фотоприемников ФС 9Э41 и ФС 9Э46 для ИК приборов также был организован в 1970–1980 гг. в специализированном производстве ГИПО.

Результаты работ ГИПО в области ИК техники в тот период также были достаточно эффективны: созданы многие десятки образцов оптико-электронных приборов – дистанционные датчики, тепловизоры, радиометры, навигационные приборы, уникальные ИК объективы.

В 1970–1980-х годах руководством ГИПО был принят курс на приоритетное выполнение опытно-конструкторских работ. Это потребовало изменения внутренней структуры научно-технических подразделений, а также укрепления конструкторско-технологических служб, создания специализированных подразделений по электронике и микроэлектронике, сильного опытно-экспериментального производства, ставшего в 1992 году Опытным заводом. Правильность такого решения, ориентировавшего ученых, инженеров и рабочих на получение конкретных

результатов работ и выпуск опытных и штатных образцов оптико-электронных приборов, особенно подтвердилась в 1990-е годы: продукция ГИПО была востребована.

Для отработки тепловизионной и тепловизионной техники в НПО ГИПО разработан комплекс унифицированных средств контроля их характеристик. Создана уникальная испытательная база (в состав которой входит, например, тепловизор-радиометр “Искра” (1ПН88)), позволяющая проводить как лабораторные (стендовые), так и натурные (на полигонах) испытания в штатных и предельных условиях эксплуатации.

Переданы в эксплуатацию заказчикам разработанные и изготовленные малой серией ИК средства наблюдения из космоса: аппаратура высокого разрешения “Тавр” (ЦСКБ) и метеорологическая аппаратура “Климат” (ВНИИЭМ), уникальный комплекс наземной обработки получаемой информации, многоспектральная оптико-электронная аппаратура высокого разрешения “МСУ-В” для орбитального комплекса “Ресурс-О” (завод “ЮжМаш”). Прошли испытания и показали высокие характеристики комплексы многоспектральной ИК аппаратуры наблюдения (“Полупудовик”, “Ландыш”, “Осетр”, “Малютка”, “Хризолит”) для авиационных носителей. Созданные в ГИПО спектрофотометры ФКМ-71 и ФКМ-73 использовались в космических комплексах “Марс-2, -3, -4, -5”, а ИРВ-75 – в комплексах “Венера-9, -10”.

Для контроля параметров систем астроориентации, астронавигации и астрокоррекции разработаны средства имитации астрономических источников излучения. Имитаторы звезд И-1, И-2, И-1У, Солнца (ИСТ) и ряд фотометров для этих целей выпускались в отрасли на ряде предприятий (НПО “Геофизика”, ПО “УОМЗ”, ПО “ЗОМЗ”).

Ориентация коллектива ГИПО на выполнение ОКР ни в коей мере не привела к снижению научного потенциала объединения. В течение 1970–1980-х годов (в рамках программы “Перспектива”) выполнено несколько крупных НИР по комплексному освоению ИК области спектра и расширению областей применения ИК техники, приборному освоению УФ области спектра, разработке технологий и технических средств дифракционной и интегральной оптики, использованию явления сверхпроводимости и др. Важнейшей частью этих НИР стала разработка принципиально новой элементной базы и новых оптических технологий.

Выполнение собственных опытно-конструкторских работ позволило ученым, конструкторам, технологам НПО ГИПО с большим пониманием относиться к научно-техническим проблемам, поставленным перед ГИПО, ЦКБ и заводами отрасли.

В последние 20-25 лет инфракрасная техника и ИК технологии являются основой для создания новых, а также модернизации существующих средств вооружения и военной техники, обеспечивающих круглосуточное ведение боевых действий армий. Быстро развиваются области промышленного и гражданского применения ИК средств.

Более подробно остановимся на проблемах тепловидения – приоритетного раздела инфракрасной техники.

Развивая принципы паритетности выполнения опытно-конструкторских, научно-исследовательских работ и серийного производства в одном научно-производственном объединении, коллектив и администрация НПО ГИПО не только не потеряли, но и упрочили позиции объединения в оптической науке и промышленности России. Так, своевременно направив на развитие тепловизионной техники более половины своего научно-технического потенциала (здесь и был в полной мере реализован комплексный подход к решению проблемы), ГИПО стал лидером в стране по этому направлению.

Работы по созданию тепловизионных приборов ведутся в ГИПО с 1978 года. На основе полученного научного задела уже в I квартале 1982 года были разработаны и изготовлены экспериментальные образцы тепловизионного прицела “Тракт” для переносного комплекса ПТУРС “Фагот”, а также миниатюрного прибора наблюдения “Манчак”; начаты ОКР по созданию тепловизоров возимого класса “Тракт-1” и “Термозонд”, оказана необходимая технологическая помощь заводам КОМЗ, НПЗ, КМЗ в разработке первых тепловизоров “Акцепт”, “Пособие”, “Агава”. Успешному развитию этих работ в немалой степени способствовало наличие и постоянное совершенствование собственной технологической базы по обработке оптического германия, оптической керамики и других ИК материалов, по нанесению оптических покрытий на ИК материалы, по созданию асферической оптики.

По заданиям, сформулированным специалистами ГИПО, целый ряд предприятий России стал заниматься разработкой и изготовлением фотоприемных устройств (ФПУ), систем охлаждения различных типов, светодиодных линеек для систем преобразования ИК излучения в видимое, специальных микросхем, миниатюрных электродвигателей, видеоконтрольных устройств, систем обработки сигналов, вторичных источников питания и т. п. На предприятиях оптической отрасли проведены работы по внедрению технологических процессов и специального технологического оборудования, необходимых при изготовлении тепловизоров, комплекса измерительного, испытательного и метрологического оборудования для их контроля и аттестации.

В результате этих усилий в середине 1980-х годов на нескольких заводах был налажен серийный выпуск тепловизоров по разработкам или под научным руководством ГИПО при использовании элементной базы российских производителей. Особенно необходимо отметить организацию работниками ГИПО серийного производства тепловизионного прицела “Тракт” на оптическом заводе-новостройке “Орбита” в г. Ереване (Армения). В цехах и подразделениях завода, начавшего работу “с нуля”, были внедрены все технологические процессы, необходимые для серийного производства тепловизоров.

К настоящему времени научно-технический и производственный потенциал НПО ГИПО многократно возрос, в том числе в значительной степени за счет притока молодых кадров в научные отделы и приема на Опытный завод ГИПО производственных рабочих высокой квалификации. НПО ГИПО сегодня в полной мере располагает всем необходимым для успешного развития в стране тепловизионной техники.

- Прежде всего это уникальная база данных (банк данных) по оптическим характеристикам (излучение, поглощение, рассеяние, отражение, пропускание лучистой энергии) объектов и сопутствующих им фонов в диапазоне длин волн от ультрафиолета (0,35 мкм) до 15 мкм, в лазерных диапазонах длин волн 0,53, 1,06, 1,54, 3,39, 10,6 мкм, в любое время года, суток, в любых климатических условиях и в различных географических зонах, на суше, на воде, в воздушной среде. Сюда относятся и данные по пропусканию атмосферы в названных условиях, а также по характеристикам аэрозольных сред, маскирующих завес.

- Разработка и серийное изготовление оптических элементов из современных оптических материалов – все виды стекол, ситаллы, кристаллы, германий, кремний, оптическая керамика, стекла типа ИКС.

- Разработка и освоение современных технологий нанесения оптических покрытий на плоские и неплоские оптические поверхности всех видов оптических материалов:

- просветляющие однослойные, двух- и многодиапазонные, многослойные ахроматические, силовые; защитные и защитно-просветляющие; зеркальные высокоотражающие, на лазерных длинах волн, многодиапазонные (многоспектральные); стойкие к мощному излучению лазеров, полярирующие; фильтрующие отрезающие и полосовые, узкополосные, нейтральные, многоспектральные; микрофильтры; полосовые непрерывные фильтры;

- “управляемые” оптические покрытия;

- покрытия на оптической пластмассе, в том числе антистатические, незапотевающие.

- Разработка новых высокопроизводительных технологий изготовления и контроля всех видов асферических поверхностей, элементов интегральной (плоской) оптики, дифракционной оптики (дифракционные решетки, ИК решетки-поляризаторы, дифракционные решетки резонаторов лазеров, голограммные зеркала, киноформные оптические элементы, синтезированные и компьютерные голограммные оптические элементы) из различных оптических материалов.

- Метрологическое обеспечение работ на базе глубокого теоретического обоснования достигаемых технических параметров. Оно включает в себя разработку и создание вторичных эталонов физических единиц (спектральная плотность энергетической яркости, спектральная плотность силы излучения, спектральная плотность энергетической освещенности, энергетическая яркость в области спектра 0,8–14,0 мкм, сила света, температура по ИК излучению в области спектра 0,8–14,0 мкм, разность радиационных температур и разность энергетических яркостей), военных эталонов – переносчиков физических величин, рабочих эталонов – образцовых калибровочных систем, рабочих средств измерений.

НПО ГИПО обладает развитой метрологической базой в обеспечение тепловизионной техники: 6 вторичных эталонов физических единиц, 7 калибровочных комплексов, фотометрическая трасса длиной 60 м, большое количество ИК коллиматоров для проведения стендовых испытаний, ИК трансиссометры для измерения прозрачности атмосферы, спектрофотометры, “абсолютно черные тела” оригинальной разработки.

Разработана и находится в стадии реализации перспективная система метрологического обеспечения сканирующей и матричной ИК техники.

- Использование базовых оптических систем – важная часть модульного принципа построения тепловизионных приборов (ТВП), успешно реализуемого в ГИПО; в этом случае основные оптические блоки остаются неизменными, меняются их расположение (размещение) и входной объектив. Следует также отметить, что отдельные блоки (узлы) тепловизионного канала интегрируются в тепловизионный модуль, представляющий собой тепловизор без видеоконтрольного устройства. Тепловизионные модули могут встраиваться в различные контейнеры комплексов вооружения и военной техники, или на их основе создавать образцы ТВП.

- Создание производственных мощностей для серийного производства тепловизоров.

- Создание нового научно-технического направления – ИК объективостроения – одной из важнейших составных частей тепловидения.

- Создание специальных (нестандартизованных) измерительных средств, обладающих необходимыми свойствами оценивать заданные характеристики ТВП: рабочее угловое разрешение при нормированном контрасте, спектральный рабочий диапазон, поле зрения, частоту кадров, видимое увеличение, параллельность оптических осей, предельное температурное разрешение, минимально разрешаемую разность температур на заданной частоте, температурно-частотную характеристику, пороговую разность температур и др. Научное направление, созданное в ГИПО по данной проблеме, основано на четком взаимодействии с развернутой в объединении метрологической базой и имеющимися образцовыми средствами измерения и вторичными эталонами физических величин.

Каждая часть созданной инфраструктуры для ведения разработок в области ИК техники становится жизнеспособной только при полном техническом, технологическом и материальном ее обеспечении.

Несмотря на значительное улучшение в последние годы основных характеристик ТВП первого поколения (достигнутое, в основном, за счет совершенствования конструкций ТВП и их элементной базы), еще имеются значительные резервы повышения их эффективности.

Достижимые параметры ТВП второго поколения существенно выше, чем у ТВП первого поколения. ТВП 2-го поколения – это, практически, ИК цифровая видеокамера. Разработка и серийное освоение ТВП 2-го поколения потребовали развития целого ряда новых технологий, новых электронных компонентов, в том числе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

- ТВП третьего поколения создаются на основе так называемых “смотрящих” фокальных матриц – матричных фотоприемников. Их особенность – полное отсутствие механического сканирования. Это приводит к существенному упрощению оптической схемы ТВП. В то же время возрастают требования к качеству оптического изображения, формируемого ИК объективом, поскольку размеры матрицы, устанавливаемой в его фокальной плоскости, могут достигать нескольких десятков миллиметров.

Предельные характеристики ТВП достигнуты сегодня при использовании охлаждаемых матричных ФПУ на основе материалов КРТ и антимонида индия. Для изготовления неохлаждаемых матриц ФПУ используют ферроэлектрики, термоэлектрики и микроболометры. С использованием указанных ФПУ разработана достаточно большая номенклатура приборов. Малогабаритные, легкие, бесшумные, удобные в эксплуатации, автономно работающие с руки, на треноге или на движущихся средствах, эти

ТВП широко используются в гражданских целях. В ближайшее время потребность в ТВП третьего поколения такого типа составит сотни изделий в год. Очень перспективно создание сравнительно простых и недорогих ТВП на болометрических матрицах формата 160×120 элементов для оснащения средств ближнего боя. Потребность в таких ТВП будет исчисляться тысячами изделий в год.

ТВП третьего поколения – это новый этап в разработке тепловизионной техники с реализацией передовых технологий в областях дифракционной оптики, фотоэлектроники, микроэлектроники, микрокриогенных систем, систем отображения информации на миниатюрных дисплеях, композитных конструкционных материалов и др. ТВП третьего поколения можно рассматривать как поколение тепловизоров, которые в недалеком будущем будут доминировать в различных областях деятельности человека.

В настоящее время НПО ГИПО ведет разработку тепловизионных систем всех 3-х поколений.

На основе модификаций существующего модуля ФПУ с числом элементов до 32 удалось повысить в 1,5 раза технические и эксплуатационные характеристики тепловизоров 1-го поколения.

Начатые в 2000 году исследования по разработке тепловизоров 2-го поколения позволяют НПО ГИПО выполнять одновременно несколько опытно-конструкторских работ по созданию тепловизионных каналов для круглосуточных оптико-электронных систем. Во всех приборах используется оригинальная базовая оптическая схема со сканированием по одной координате в сходящихся пучках с применением микросканера, обеспечивающего сдвиг изображения в кадровом направлении на половину размера чувствительной площадки фотодетектора (чересстрочность сканирования).

В последние годы в НПО ГИПО разработана, изготовлена и всесторонне испытана опытная партия тепловизионных наблюдательных приборов 3-го поколения – на основе неохлаждаемой микроболометрической матрицы формата 320×240 фоточувствительных элементов (ФЧЭ). Для комплектования этих тепловизоров создан унифицированный ряд германиевых объективов.

В перспективные программы развития оптики нами предложены несколько ОКР по созданию тепловизионных и тепlopеленгационных каналов третьего поколения, которые можно использовать при разработке и модернизации средств ПВО, создании систем навигации и пилотирования, обнаружения и сопровождения целей, прицеливания. Здесь используются полноформатные матричные ФПУ, в том числе в области спектра 3–5 мкм. Они позволяют в 1,5–2 раза повысить основные характеристики комплексов.

Одной из важных разработок, выполняемых ГИПО, является ОКР по созданию унифицированного (для самолетов всех классов) авиационного тепlopеленгатора для обнаружения, распознавания и сопровождения атакующих ракет класса земля–воздух и воздух–воздух на предельных дальностях пусков и самолетов на рубеже атаки и выдачи их координат в комплексы РЭП.

Принципиально новые оптико-электронные системы и перспективные технологии разрабатываются НПО ГИПО в рамках программы “Национальная технологическая база”. В НИР “Вереск-ЛТ” создана двухканальная (лазерно-локационный и тепловизионный каналы) оптико-электронная система безопасного пилотирования вертолетов, предупреждающая пилотов о наличии препятствий (линии электропередач, мачты) по курсу движения. Эта разработка может стать базовой и использоваться также при создании систем безопасной посадки вертолета на необорудованные площадки, обнаружения замаскированных снайперов. В ОКР “Тревога” создается взрывобезопасная дистанционная система обнаружения малых концентраций метана в шахтах. На первом этапе этой ОКР создан миниатюрный датчик метана “Колодец” для индивидуального оснащения им рабочих, спускающихся в люки колодцев городского хозяйства, работающих в подвальных и закрытых помещениях, тоннелях, проверяющих качество очистки цистерн, трюмов танкеров.

Начинают приносить плоды начатые в 2002–2003 годах технологические разработки. Разработан ряд оптических технологий по созданию элементной базы ИК техники: технология изготовления высокоточных асферических поверхностей зеркал и линз с использованием полноразмерного и полнопрофильного алмазирования инструмента, технология прецизионного копирования асферических поверхностей с применением фотополимеров, отверждаемых при воздействии ультрафиолета, технология нанесения защитного покрытия на оптические элементы со слоем золота для области спектра 8,0–11,5 мкм, технологии изготовления дифракционных решеток на медных подложках для мощных ИК лазеров, технология изготовления высокоэффективных голограммных решеток с использованием неорганических резистов, технология изготовления жаропрочных дифракционных оптических элементов с рельефно-фазовой структурой непосредственно в стекле, работающих при высоких температурах. Разработаны технологии получения высокоэффективных защитных, просветляющих и отражающих покрытий для ИК области спектра.

Перспективное развитие ИК техники немислимо без создания и освоения в производстве совре-

менного комплекса стендов для метрологического обеспечения (метрологический стенд должен воспроизводить разность радиационных температур на уровне 0,005 К с погрешностью не более 0,001 К), разработки и производства оптико-электронных и тепловизионных приборов (ОКР “Дельта-3”).

Для оценки эффективности применения разрабатываемых оптико-электронных систем используются технологии имитационного моделирования фоноцелевой обстановки. Для их реализации необходимо включать в проблемно-ориентированную базу (банк) исходные данные:

- спектральноэнергетические изображения аэродинамических объектов, объектов техники, промышленной инфраструктуры, фоновых образований;
- конструкционные характеристики объектов;
- спектральные, угловые, поляризационные оптические характеристики конструкционных материалов, моделей объектов, рельефа, растительности, природных и антропогенных образований в различных географических и климатических районах;
- оптико-физические характеристики тропосферы, облаков, туманов, дымок, пограничного слоя Земля–атмосфера для различных климатических зон и сезонов года;
- спектральнозональные и пространственные характеристики оптических помех (средства маскировки, ЛПЦ, пыледымовые образования, пожары, помехи пилотированию).

Эти данные получают экспериментальным путем с помощью созданных в ГИПО многих комплексов спектрометрических приборов различного базирования.

Изучение и моделирование сигнатур объектов и окружающей среды являются важнейшей частью многих научно-технических программ и проектов ГИПО, в том числе при проведении экологического мониторинга.

Основой разработок современных оптико-электронных приборов в ГИПО служат новые оптические технологии. К таким технологиям, разработанным в последние 10–15 лет, можно отнести:

- контроль с интерференционной точностью оптических сферических и асферических поверхностей диаметром до 10–15 м на основе применения синтезированных компьютерных голограмм;
- все виды оптических покрытий на оптических элементах из различных материалов в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра: просветляющие (коэффициент остаточного отражения менее 0,1% в видимой области спектра, менее 0,5% – в ИК области), просветляющие и фильтрующие одновременно на нескольких длинах волн, дихроичные, теплоотражающие, селективные зеркала для лазеров, а также кольцевые перемен-

ные фильтры, представляющие собой миниатюрный монохроматор;

– “силовые” зеркальные и просветляющие оптические покрытия на крупногабаритных оптических деталях для использования в перспективных комплексах для исследований в области управляемого термоядерного синтеза;

– голограммные узкополосные фильтры для лазерной спектроскопии и использования в качестве средств защиты органов зрения операторов и ФПУ от воздействия мощных лазерных пучков (достигается ослабление лазерного излучения на 5–6 порядков величины);

– киноформы, наносимые на ИК оптические поверхности объективов для существенного повышения их абберационных характеристик;

– унифицированный ряд объективов для тепловизионных систем с фокусными расстояниями 22, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 500 мм.

Учеными НПО ГИПО определена перспектива развития ИК технологий в ГИПО – разработки многоспектральных, многоканальных, комплексированных оптико-электронных систем на основе охлаждаемых и неохлаждаемых матричных ФПУ с числом ФЧЭ до 1024×1024 , использующих современные принципы обработки и синтеза изображений, получаемых различными каналами, для применения на земле, в воздухе, в космическом пространстве, и миниатюризация оптических систем на основе применения новых технологий интегральной, дифракционной, асферической, голограммной и градиентной оптики. Одновременно учеными ГИПО, как и ранее, выполняются работы фундаментального характера, рассчитанные на более далекую перспективу:

- создание сверхвысокочувствительных лазерных интерференционных методов для детектирования гравитационных волн,
- лазерное охлаждение твердых тел на основе использования антистоксова эффекта,
- создание твердотельного преобразователя для прямого наблюдения ИК изображений в видимой области спектра,
- создание нанодатчиков на основе технологий интегральной и дифракционной оптики.

В состав НПО ГИПО входит уникальный, не имеющий аналогов в мире, научно-производственный комплекс по разработке технологий и серийному изготовлению всех видов нарезных и голограммных дифракционных решеток (спектроскопических, эшелле, эшелеттов, решеток для лазеров, измерительных решеток, решеток-поляризаторов излучения и др.), включающий подземную лабораторию (1200 м^2), где сосредоточена 1/4 часть всех делительных машин для нарезания решеток, имею-

щихся в мире. Мощность этого комплекса – десятки тысяч дифракционных решеток и голограммных оптических элементов в год. Возможности поставок дифракционных решеток, в том числе на экспорт, пока используются не полностью.

ФГУП “НПО ГИПО” сегодня – уникальный научно-производственный центр федерального значения, сохранивший и успешно развивающий свой

научно-технический, производственный и кадровый потенциал по важнейшим современным направлениям оптики и высоких оптических технологий. Выполненные и выполняемые в настоящее время разработки ФГУП “НПО ГИПО” в области ИК техники направлены на решение крупномасштабных проблем в военной оптике и гражданских отраслях промышленности страны.

ОПТИЧЕСКИЕ ДЕФЛЕКТОРЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ© 2007 г. **В. И. Тевяшов**, канд. техн. наук; **С. Н. Шушарин**

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Приведены результаты разработки однокоординатных оптических дефлекторов с пьезокерамическим приводом, используемых в тепловизионных приборах (ТВП) второго поколения. Обсуждаются вопросы создания двухкоординатных дефлекторов для ТВП третьего поколения.

Коды OCIS: 230.1150.

*Поступила в редакцию 15.06.2006.***Введение**

В тепловизионных приборах (ТВП) второго поколения используется чересстрочное сканирование, которое позволяет повысить пространственное разрешение ТВП за счет смещения изображения в фокальной плоскости проекционного объектива на половину размера чувствительного элемента приемника излучения. В этом случае осуществляется сдвиг изображения на половину периода многоэлементного приемника излучения. Устройство, выполняющее эту операцию, является по существу оптическим дефлектором. Разработано множество способов и устройств для реализации этой задачи. Так, в работе [1] рассмотрены электрооптические, ультразвуковые, магнитоэлектрические, электромагнитные, пьезоэлектрические и другие методы управления лучом в пространстве. Однако для ТВП, используемых в жестких эксплуатационных условиях и прежде всего в авиационных комплексах, большинство перечисленных методов малоприменимы. В последние два-три десятилетия широкое распространение получил метод управления с помощью пьезокерамического привода [2].

Привлекательность применения пьезокерамического привода в оптических дефлекторах обусловлена рядом особых свойств пьезокерамики. Диэлектрические свойства пьезокерамики, функционирование за счет электрического поля (а не тока проводимости), практическое отсутствие тока и связанных с этим тепловыделений в диапазоне низких частот (ток утечки до 6×10^{-8} А) обеспечивают этому материалу качество взрывобезопасного элемента, коэффициент полезного действия которого близок к единице. Кроме того, пьезокерамика имеет высокую прочность в пределах допустимых изгибов (модуль Юнга в среднем $0,9 \times 10^{11}$ Н/м²).

Пьезокерамические приводы могут быть построены по различным схемам, которые обеспечивают превращение изгибных или крутильных перемещений пьезоэлектрических элементов в линейное или вращательное движение исполнительного звена.

Наибольшее перемещение можно получить от элементов, работающих на изгиб, к ним в первую очередь относятся биморфные элементы (БЭ), которые могут быть выполнены по классической схеме [2].

Особенности конструкций оптических дефлекторов

Для ТВП второго поколения, используемых в авиационных комплексах, характерны жесткие требования по эксплуатации, которые обусловлены существующими стандартами на оборудование для летательных аппаратов.

В многочисленных публикациях, в первую очередь в патентных материалах [3–7], предложены различные технические решения оптических дефлекторов с пьезокерамическим приводом, однако проведенный анализ показал, что большинство предложенных схем и конструкций не смогут обеспечить требуемых характеристик в жестких эксплуатационных условиях.

Авторами разработаны и исследованы оптические дефлекторы, которые обладают требуемыми эксплуатационными характеристиками – виброустойчивостью, вибропрочностью, стабильностью угла отклонения в широком диапазоне температуры окружающей среды.

На рис. 1 показана часто используемая схематическая конструкция биморфного пьезоэлемента. Поскольку частота переключения оптического дефлектора низкая (25 Гц), в БЭ использована сегнетомягкая пьезокерамика типа ЦТС-19 отечественного производства (зарубежные прототипы PZT-5Y, РСМ-33А и др.). Наряду со многими положительными свойствами, пьезокерамические материалы имеют и существенные недостатки.

Коротко остановимся на оценке погрешностей, возникающих в приводах с использованием БЭ.

Основные погрешности – аддитивные и мультипликативные. К аддитивным относятся погрешности, связанные с пьезоэлектрическим гистерезисом

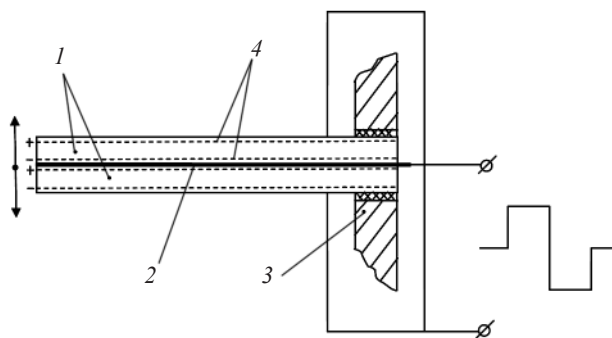


Рис. 1. Схематическая конструкция биморфного пьезоэлемента. 1 – пьезокерамические пластины, 2 – соединительный шов с прокладкой из латунной фольги, 3 – узел крепления БЭ, 4 – металлизация пьезокерамических пластин.

и остаточными деформациями. Одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на гистерезис, является процесс старения пьезоэлементов. В настоящее время на заводах-изготовителях пьезокерамики используется технологический процесс искусственного старения в переменном электрическом поле, который позволяет сократить время старения. В целом погрешность, обусловленная гистерезисом и остаточными деформациями, колеблется в пределах 0,3–0,5% [2]. Мультипликативные погрешности делятся на случайные и систематические. Случайные погрешности определяют степень изменения чувствительности БЭ под действием внешних факторов, в первую очередь температуры. По данным [2], суммарная погрешность БЭ, обусловленная случайными и систематическими погрешностями в самых неблагоприятных условиях, не превышает 15–20%, в нормальных эксплуатационных условиях эта погрешность не превышает 1–1,5%.

Результаты наших исследований для пьезопластин, изготовленных на разных заводах (завод “Аврора”, г. Волгоград и завод в г. Гусь Хрустальный), отличаются от приведенных выше.

В диапазоне температур от 60 до –60 °С пьезомодуль изменялся в 1,8 раза по сравнению с его значением при нормальной температуре. Что касается систематической погрешности, то она возникает при изгибах, близких к критическим. В нашем случае прогиб БЭ мал по сравнению с его длиной и его можно рассматривать как линейную функцию напряжения. Сильная температурная зависимость пьезомодуля, а также гистерезис требуют внимательного их учета. Гистерезис обязательно учитывается при разработке сканирующих устройств с приводом в виде БЭ, где требуется контроль траектории движения оптического элемента. В этом случае сканирующее устройство обязательно дол-

жно иметь датчик положения оптического элемента [5] и замкнутую систему автоматического регулирования.

Для оптического дефлектора, не требующего контроля траектории движения оптического элемента, этот фактор не столь существен. Здесь важно то обстоятельство, что конечные положения зеркала определяются узловыми точками кривой гистерезиса, которые в свою очередь зависят от приложенного напряжения.

В доступной нам литературе мы не нашли данных, которые свидетельствовали бы о стабильности БЭ с точки зрения произвольных отклонений его свободного конца при изменении температуры окружающей среды.

Наши исследования показали, что произвольные отклонения БЭ при изменении температуры могут превышать амплитуду полезных колебаний в несколько раз, а это приводит к недопустимой температурной нестабильности ТВП, поскольку зеркало дефлектора (или преломляющий элемент) является элементом его оптической схемы.

Такого рода нестабильность объясняется в первую очередь несимметричностью склейки БЭ. В то же время некоторые экземпляры БЭ, возможно, более симметричные, имели совершенно незначительные отклонения, что говорит в пользу такого предположения.

Для повышения стабильности была изменена технология изготовления БЭ. Вместо склейки пьезокерамических пластин (рис. 1) была применена пайка, которая проводилась в туннельной печи при температуре значительно ниже точки Кюри пьезокерамики ЦТС-19. Эта операция позволила улучшить симметрию БЭ с одновременным увеличением его чувствительности за счет уменьшения расстояния между пьезокерамическими пластинами. Снизить произвольные отклонения БЭ до приемлемых удалось за счет применения достаточно жесткого подвеса зеркала дефлектора.

Авторами разработаны оптические дефлекторы, отличающиеся высокой виброустойчивостью [8, 9]. В первом варианте [8] для гашения навязанных колебаний используется демфирующее устройство. На рис. 2 приведена конструкция этого дефлектора. Из рисунка достаточно ясен принцип повышенной виброустойчивости устройства. Необходимо отметить, что жесткость пружины подвеса зеркала достаточна, чтобы частота собственных колебаний подвижной системы дефлектора находилась выше 500 Гц.

Второй вариант оптического дефлектора [9] имеет специфическую схему подвеса зеркала, которая и определяет высокую частоту собственных колебаний подвижной системы дефлектора.

На рис. 3 приведена конструкция этого варианта.

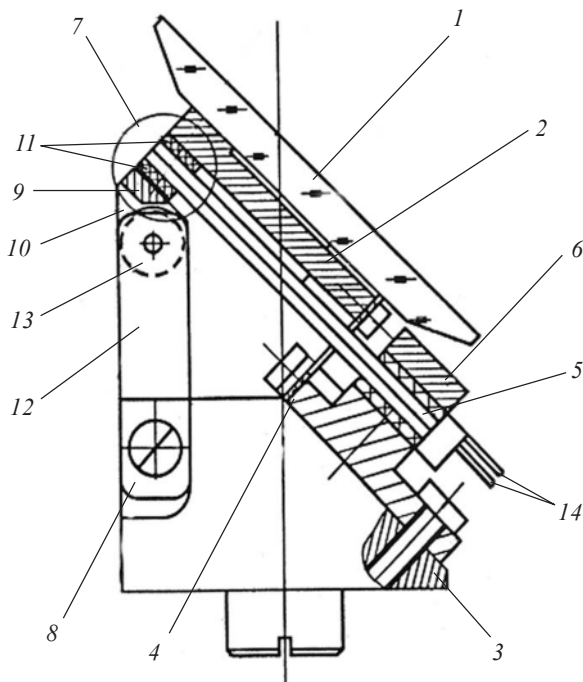


Рис. 2. Оптический дефлектор (вариант 1). 1 – зеркало, 2 – оправка зеркала, 3 – корпус дефлектора, 4 – плоская пружина подвеса зеркала с окном для размещения БЭ параллельно плоскости зеркала, 5 – БЭ, 6 – скоба для крепления БЭ к корпусу, 7 – узел защемления свободного конца БЭ, 8 – узел крепления демпфера, 9 – скоба узла защемления, 10 – выступ скобы, находящейся между пластинами демпфера; 11 – диэлектрические прокладки, обеспечивающие работу узла защемления и выполненные в виде сегмента цилиндрической формы, 12 – плоские пружины демпфера, 13 – бобышки пластин демпфера, 14 – выводы БЭ для подключения системы управления.

При меньшей суммарной жесткости пружин частота собственных колебаний подвижной системы превышает 1500 Гц.

Упругий подвес зеркала в этой конструкции выполнен в виде двух пар плоских пружин, расположенных с противоположных сторон зеркала симметрично относительно продольной оси БЭ, а плоские пружины в каждой паре установлены симметрично относительно оси качания зеркала под углом $90^\circ \pm 10^\circ$ друг к другу, при этом линия пересечения плоскостей установки плоских пружин совпадает с осью качания и проходит через центр масс зеркала с оправой.

Управление дефлекторами первого и второго типа осуществляется с помощью унифицированного узла, построенного по схеме без обратных связей по положению зеркала.

На рис. 4 приведена структурная схема узла управления. Остановимся на некоторых его особенностях.

Поскольку, как это отмечалось выше, величина пьезомодуля керамики зависит от температуры, одна обратная связь в этом узле существует.

Эта связь выполняет функцию регулятора выходного напряжения преобразователя, которое поступает на ключевую схему. Осуществляется это путем регулировки выходного напряжения стабилизатора, питающего преобразователь напряжения. Датчик температуры окружающей среды в виде терморезистора включен в делитель входной цепи стабилизатора.

При увеличении температуры выходное напряжение стабилизатора уменьшается, соответственно уменьшается и высокое напряжение преобразователя, которое подается на ключевую схему.

С понижением температуры выходное напряжение стабилизатора увеличивается. При этом терморезисторы типа ММТ-1, используемые в узле

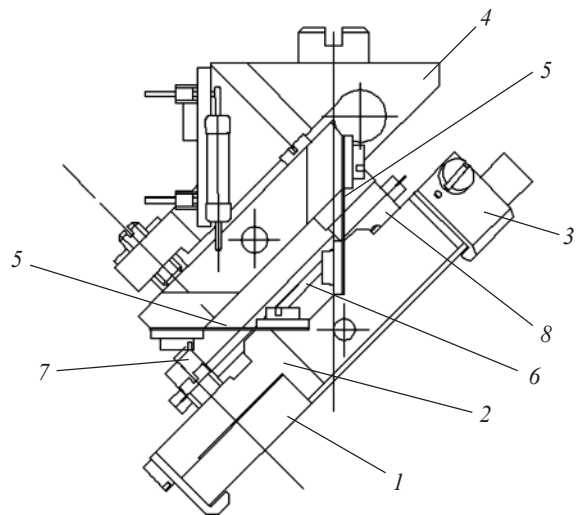


Рис. 3. Оптический дефлектор (вариант 2). 1 – зеркало, 2 – оправка зеркала, 3 – скоба крепления зеркала, 4 – основание (корпус дефлектора), 5 – плоские пружины подвеса зеркала (4 шт.), 6 – БЭ, 7 – скоба крепления БЭ к корпусу, 8 – узел защемления свободного конца БЭ.

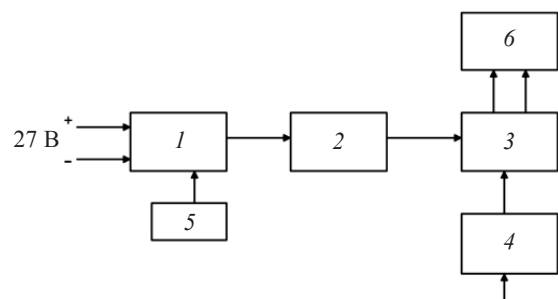


Рис. 4. Структурная схема узла управления. 1 – регулируемый стабилизатор напряжения, 2 – преобразователь напряжения, 3 – ключевая схема, 4 – схема управления ключами, 5 – термодатчик, 6 – оптический дефлектор.

Характеристики оптических дефлекторов

Параметр	Дефлектор первого типа	Дефлектор второго типа
Тип пьезопривода	БЭ из керамики ЦТС-19	БЭ из керамики ЦТС-19
Размеры пьезопривода, мм		
длина	36	36
ширина	8	8
толщина двух пластин	2	2
Размеры зеркала, мм	34×17	30×51 (возможны модификации формы и размеров)
Частота колебаний зеркала, Гц	25	25
Диапазон углов отклонения зеркала	от 20" до 3'–4'	от 15" до 2,5'–3'
Диапазон изменения напряжения питания ключевой схемы узла управления, В	20–160	45–260
Частота резонанса подвижной системы, Гц	более 550	более 1500
Система управления	Незамкнутая, ключевая, с гальванической развязкой (оптронами) от системы синхронизации тепловизора	Незамкнутая, ключевая, с гальванической развязкой (оптронами) от системы синхронизации тепловизора
Точность поддержания амплитуды колебаний зеркала в диапазоне температур ±60 °С	±3"	

управления, позволяют учесть нелинейность, которая начинает проявляться при температурах ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Экспериментально установлено, что температурный коэффициент составляет $0,2\text{ В}/^{\circ}\text{C}$ (на выходе преобразователя напряжения). Этот коэффициент сохраняется в диапазоне температур от $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. С понижением температуры коэффициент растет нелинейно, достигая значения $0,26\text{ В}/^{\circ}\text{C}$ при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В таблице приведены некоторые характеристики рассмотренных выше оптических дефлекторов, которые осуществляют в ТВП второго поколения функцию микросканирования по одной координате.

В ТВП третьего поколения, так называемых системах “смотрящего” типа [10], микросканирование используется для улучшения разрешения систем, а также устранения ложных низкочастотных составляющих в спектре дискретизированного сигнала.

Кроме того, использование микросканирования позволяет получить сравнительно простыми техническими средствами те же результаты, которые могли бы быть получены путем увеличения количества элементов в матрице.

В работе [11] показана целесообразность использования микросканирования в приборах типа FLIR, причем авторы утверждают, что изображение, полученное с применением этой операции, всегда лучше изображения без микросканирования для одной и той же матрицы. Кроме того, микросканирование особенно полезно применять на подвижных и вибрирующих платформах и оно может быть исполь-

зовано для улучшения стабилизации платформ [11]. Для ТВП третьего поколения требуются двухкоординатные дефлекторы, так как смещение изображения выполняется последовательно либо по контуру квадрата, образуемого линиями, соединяющими центры четырех чувствительных элементов матрицы, либо по более сложной траектории. Для точного позиционирования двухкоординатные дефлекторы должны выполняться с замкнутой системой регулирования, о чем свидетельствуют и авторы работы [11].

Выводы

1. Разработаны оптические дефлекторы, обладающие высокой виброустойчивостью, вибропрочностью и стабильностью угла отклонения зеркала в широком диапазоне температуры окружающей среды.

2. Дефлекторы используются в тепловизионных приборах второго поколения, устанавливаемых на вибрирующих платформах (летательные аппараты, корабли и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ребин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. М.: Сов. радио, 1977.
2. Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1986.

3. *Орелкин Н.Ф., Киселева Т.П.* Устройство для отклонения светового луча. А. с. СССР № 1108381 // Бюл. изобр. 1984. № 30.
4. *Слободян С.М., Яковлев А.Р.* Устройство углового отклонения. А. с. СССР № 1485188 // Бюл. изобр. 1989. № 21.
5. Устройство развертки фокальной плоскости. Заявка РСТ W085/05464. 1985.
6. *Медведев А.В., Гундяк М.Н.* Пьезобиморфное сканирующее устройство тепловизионного прибора // Заявка на изобретение РФ 20030102958/28 от 31.01.2003. Публикация заявки 27.08.2004.
7. *Федосеенко О.Ф., Федосеенко В.О., Савицкий О.А., Пилипенко Н.П., Агабекян С.М.* Однокоординатный сканирующий дефлектор // Свидетельство на полезную модель, заявка 99123609/20 от 5.11.1999. Публикация 20.04.2001.
8. *Иванов В.П., Марков Ю.В., Тевяшов В.И.* Оптический дефлектор // Патент РФ № 2258947. 2005.
9. *Иванов В.П., Марков Ю.В., Тевяшов В.И.* Оптический дефлектор // Патент РФ на полезную модель № 49289. 2005.
10. *Тарасов В.В., Якушенко Ю.Г.* Инфракрасные системы “смотрящего” типа. М.: Логос, 2004. С. 235–240.
11. *Wiltse J.M., Miller J.L.* Imagery improvements in staring infrared imagers by employing subpixel microscan // Opt. Eng. 2005. V. 44. № 5. P. 056401-1–056401-9.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК СИНХРОИМПУЛЬСОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

© 2007 г. А. П. Демин; А. А. Идрисов; А. И. Омелаев, канд. техн. наук; Ю. П. Чугунов

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Для поэлементной синхронизации двумерного тепловизионного изображения с последующим отображением на мониторе разработан малогабаритный фотоэлектрический датчик синхроимпульсов, вырабатывающий 6250 импульсов за один оборот сканирующего элемента.

Приведены блок-схема устройства и функциональная схема канала строчной синхронизации, показана форма сигналов в характерных точках, описан тип модулятора-прерывателя. Отмечены конструктивные и технологические особенности. Изготовлен и испытан в диапазоне температур ± 60 °С опытный образец.

Коды OCIS: 100.1160, 100.2000.

Поступила в редакцию 15.06.2006.

В сканирующих тепловизионных приборах, в частности, прицелах для переносных противотанковых ракетных комплексов (ПТРК) в основном используется принцип формирования наблюдаемого через окулярное устройство изображения объекта в поле зрения оператора с помощью разворачивающейся сканирующей системы светодиодной линейки, включенной на выходе цепи фотоприемник–усилитель. Для современных возимых комплексов такой принцип построения изображения не удовлетворяет ряду требований, предъявляемых к тепловизионному прицелу. Из-за необходимости наблюдения за объектом не только оператором, но и командиром, из-за пространственного разнесения индикатора и приемной части прицела и необходимости передачи информации в единую систему управления огнем (СУО) более предпочтительным становится наблюдение изображения на мониторах в телевизионном (ТВ) стандарте. Для этого в цепь обработки сигнала (приемник–усилитель–монитор) между усилителем и монитором включается преобразователь информации. В этом случае и появляется необходимость поэлементной синхронизации двумерного оптического изображения, формируемого линейчатый фотоприемником и сканером, с двумерным изображением, которое выводится для наблюдения на монитор.

Для реализации такого преобразования разработан, изготовлен и испытан в широком диапазоне температур фотоэлектрический датчик синхронизации, вырабатывающий n импульсов за один оборот сканирующего элемента (сканирующим элементом может быть призма, зеркало, пирамида и т. д.). Чем большее число импульсов может сформировать датчик, тем больше возможности по выборке и обработке сигнала. Однако число n ограничено габаритными размерами устройства (диска) и технологией изготовления.

На рис. 1 представлена блок-схема фотоэлектрического датчика с $n = 6250$ и механической связью со сканирующим устройством. Датчик состоит из электродвигателя 1, сканирующей призмы 2, модулятора-преобразователя (подвижный диск 3, неподвижный 4), излучающего диода 5 и фотодиода 6, составляющих пару для получения строчных синхроимпульсов; излучающего диода 7 и фотодиода 8 – пары для получения кадровых синхроимпульсов; формирователя прямоугольных импульсов 9.

Модулятор-прерыватель (рис. 2) состоит из двух частей – подвижного диска (а) в виде круга диаметром 45 мм и неподвижного диска (маски) (б) в форме круга или сегмента меньшего размера, толщина дисков около 2 мм. Габаритные размеры подвижного диска определяются общим числом чередующихся участков, зависящим от требуемого числа импульсов за один полный оборот диска, время которого равно времени формирования кадра изоб-

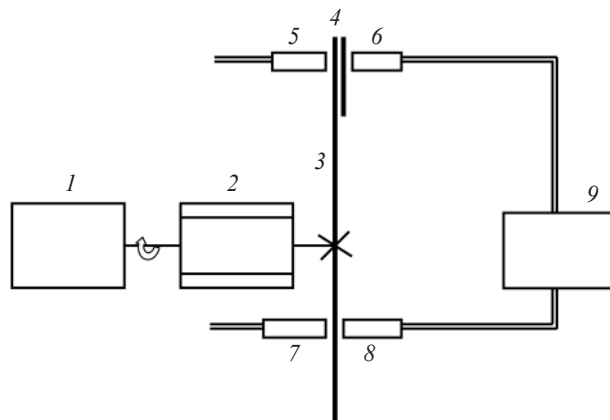


Рис. 1. Блок-схема фотоэлектрического датчика со сканирующим устройством. 1 – электродвигатель, 2 – сканирующая призма, 3, 4 – модулятор-прерыватель; 5, 7 – излучающие диоды; 6, 8 – фотодиоды; 9 – формирователь прямоугольных импульсов.

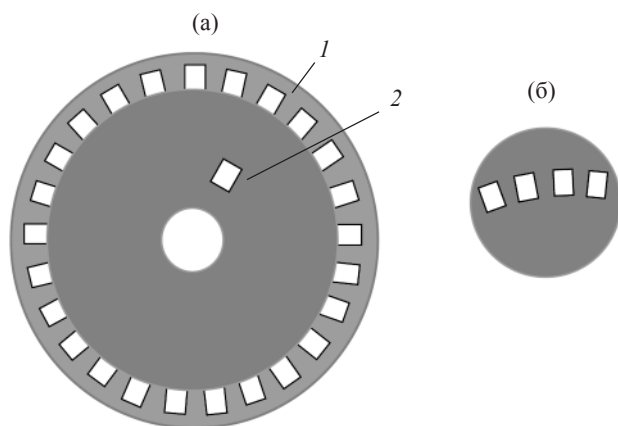


Рис. 2. Диски модулятора-прерывателя. а – подвижный диск с дорожкой 1 строчных импульсов, б – неподвижный диск.

ражения. На подвижном диске по всей окружности с радиусом, немного меньшим его радиуса, нанесена дорожка 1 из чередующихся прозрачных и непрозрачных участков (окон). На неподвижном диске такие же окна идентичного размера должны располагаться по дуге окружности, радиус которой равен радиусу окружности, по которой расположены окна на подвижном диске. Протяженность этой дуги должна быть не менее диаметра фотоприемника датчика.

В экспериментальном образце датчика диски (рис. 2) были изготовлены по следующей технологии: на стеклянный диск наносилось металлическое покрытие, а светлые участки формировались протравливанием. На дорожке 2 диска (рис. 2а) (на окружности с меньшим радиусом, чем у дорожки 1), вытравливается одно окно шириной 1–2 мм для кадрового синхроимпульса.

Такие узлы датчика синхроимпульсов, как излучатель, приемник и модулятор-прерыватель, являются типовыми элементами фотоэлектрических датчиков угла или угловых перемещений и широко используются при разработке этого класса приборов, см., например, устройство [1], в котором модулятор-прерыватель оптического потока состоит из подвижной и неподвижной круговых решеток. Однако эти известные устройства не позволяют решать задачу поэлементной синхронизации, так как предназначены для решения другой задачи – отсчета угла поворота, причем, как правило, для малых скоростей угловых перемещений. Так, в известных быстродействующих тепловизорах с выводом информации на монитор, например, в тепловизоре “Радуга МТ” [2] используется кодовый синхронизирующий диск с отверстиями.

Этот диск, на наш взгляд, имеет ограниченные возможности как по генерированию большого чис-

ла импульсов за оборот сканера, так и по точности временного положения импульсов.

Фотоэлектрический датчик синхроимпульсов (рис. 1) работает следующим образом. При вращении сканирующей зеркальной призмы, с осью вращения которой жестко связан подвижный диск 3, поток излучения от светодиода 5 периодически прерывается в моменты, когда на его пути оказываются непрозрачные участки дисков 3 и 4, т. е. осуществляется модуляция потока. Максимальное значение потока излучения, проходящего через модулятор, будет отмечаться в моменты, когда непрозрачные и прозрачные участки дисков 3 и 4 занимают одинаковые угловые положения в плоскости вращения, т. е. когда открыто “окно” на пути потока. Модулированный поток излучения принимается фотодиодом 6, преобразующим его в электрический сигнал. Далее этот сигнал усиливается и на выходе формирователя 9 представляет собой последовательность импульсов прямоугольной формы, частота следования которых зависит от скорости вращения вала электродвигателя, определяющего скорость сканирования, и протяженности периода повторения прозрачных и непрозрачных участков дорожки 1 (рис. 2а).

На дорожке 1 подвижного диска (рис. 2а) размещено 6250 окон прозрачности (непрозрачности) размером около 10 мкм каждое. В этом случае при скорости вращения сканирующего элемента 3000 об/мин частота сформированных импульсов для синхронизации строк составит $6250 \times 50 \text{ Гц} = 312,5 \text{ кГц}$, а частота импульсов, сформированных с помощью кадрового окна 2 (рис. 2а) и предназначенных для синхронизации частоты кадров, будет равна $1 \times 50 \text{ Гц} = 50 \text{ Гц}$. Импульсы частотой 312,5 кГц используются также для поэлементной выборки тепловизионного сигнала синхронно со сканированием изображения местности (объекта) и последующего ввода в запоминающее устройство с целью дальнейшего преобразования изображения в телевизионный стандарт и наблюдения на мониторе.

Особенностью рассматриваемого датчика по сравнению с известными является то, что он имеет малые габариты (определяющиеся диаметром подвижного диска модулятора 45 мм), не требует оптических фокусирующих элементов, точность временного положения формируемых им импульсов не зависит от торцевого и осевого биений диска, а определяется только точностью нанесения рисунка на диске. Временные погрешности (сдвиги) при синхронной выборке тепловизионного сигнала, записи его в запоминающее устройство (ЗУ), последующем считывании из ЗУ и отображении на мониторе устраняются за счет жесткой механической связи сканирующей призмы и подвижного диска датчика.

Достаточно большое значение отношения сигнал/шум обеспечивается без применения дополнительных оптических деталей, только с помощью основных подвижного–неподвижного дисков и пары излучающий диод–фотодиод. При этом фотодиод должен быть с достаточно большой площадью, соразмерной с шириной зоны рисунка на неподвижном диске. В результате увеличение отношения сигнал/шум или увеличение глубины модуляции сигнала достигается только путем уменьшения зазора между дисками и точного сведения их рисунков как по окружности, так и по радиусу. Чем меньше зазор между дисками, тем больше степень перекрытия потока излучения от диода при закрытии “окон”, близком к полному, и приближения потока излучения к максимуму при их открытии, а стало быть, тем больше и глубина модуляции.

Приемлемым минимальным зазором, с учетом требований по условиям эксплуатации и конструктивных особенностей, не требующих сложной технологии изготовления, является зазор около 50 мкм при торцевых и осевых биениях подвижного диска в динамике не более 2–5 мкм.

Изготовлен опытный образец фотоэлектрического датчика, встроенного в сканер одного из выпускаемых НПО ГИПО возимых телевизионных прицелов. В диапазоне температур окружающей среды ± 60 °С при зазорах между дисками от 50 до 200 мкм он эксплуатировался в течение 3-х лет и показал удовлетворительные результаты. “Ложные” высокочастотные (ВЧ) импульсы и паразитная низкочастотная (НЧ) модуляция (т. е. изменение глубины модуляции сигнала по мере вращения диска), возникающая в результате механических биений, устраняются выделением и усилением сигнала в узкой полосе частот. При этом НЧ и ВЧ составляющие сигнала, приводящие соответственно к НЧ модуляции и появлению ложных ВЧ импульсов, оказываются существенно ослабленными и не приводят к дополни-

тельной погрешности синхронизации. Изменения положения (временной сдвиг) импульсов относительно элементов разложения оптического изображения объекта не происходит, так как сканирующее зеркало и диск датчика связаны жестко (посажены на одном валу).

Функциональная схема формирователя импульсов канала строчной синхронизации приведена на рис. 3. Схема состоит из предварительного усилителя 1, полосового усилителя (фильтра) 2 и порогового устройства 3. Предварительный усилитель 1 служит для выделения и усиления сигнала с выхода фотоприемника. В случае использования в качестве фотоприемника фотодиода КФДМ (как в описываемом датчике) предусилитель построен по известной схеме преобразователя фототока в напряжение. Для этого применен операционный усилитель серии 544УД2 с большим входным сопротивлением и согласующийся по шумам с указанным фотодиодом. С выхода предварительного усилителя сигнал далее поступает в полосовой усилитель с определенными коэффициентом усиления и полосой пропускания. Резонансная (центральная) частота усилителя должна соответствовать частоте выходных импульсов в номинальном режиме вращения сканирующего элемента со скоростью 3000 об/мин. Центральная частота при этом составляет $6250 \times 3000 \text{ об/мин} = 312,5 \text{ кГц}$. Скорость вращения сканера выбрана исходя из удобства преобразования сигнала в телевизионный стандарт, при этом, как видно, частота считывающих импульсов 312,5 кГц кратна частоте строк телевизионного сигнала.

Ширина полосы пропускания, с одной стороны, определяется необходимостью устранения паразитных НЧ составляющих в сигнале, возникающих при непостоянстве потока за счет механических биений и случайных переотраженных потоков, с другой – необходимостью устранения ВЧ шумовых составляющих. В конечном счете все вышесказанное приводит

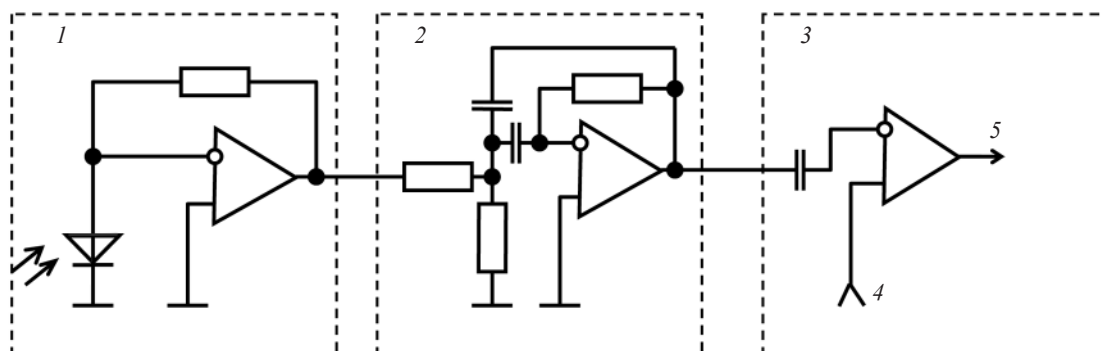


Рис. 3. Функциональная схема формирователя импульсов. 1 – предварительный усилитель, 2 – полосовой усилитель (фильтр), 3 – пороговое устройство, 4 – вход опорного сигнала, 5 – выход порогового устройства.

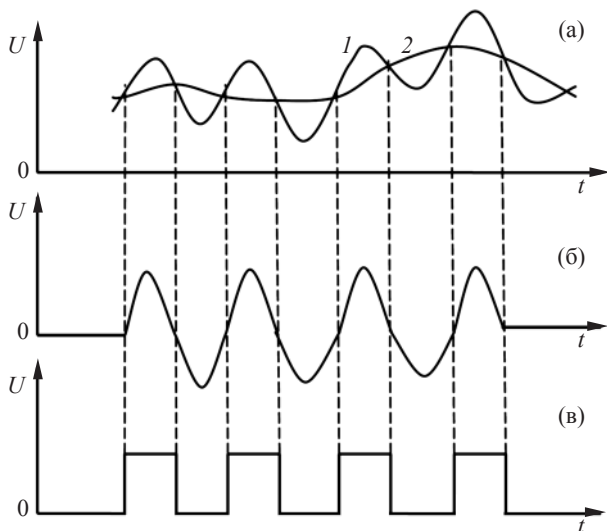


Рис. 4. Эпюры напряжений. а – форма сигнала на выходе предусилителя, 1 – полезный сигнал, 2 – НЧ составляющая; б – форма сигнала на выходе полосового усилителя; в – форма сигнала на выходе порогового устройства.

к увеличению отношения сигнал/шум. Схема полосового усилителя реализована на операционном усилителе 544УД2, имеет полосу 100 кГц при резонансной частоте 312,5 кГц и коэффициенте усиления 10.

Такая схема позволила устранить появление любых случайных и пропуск полезных импульсов на выходе формирователя.

Далее сигнал с выхода полосового усилителя поступает на вход порогового устройства, реализованного на компараторе 521 САЗ. Порог срабатывания компаратора выбирается близким к нулевому уровню. Это позволяет исключить “смазывание” фронтов импульсов. Особенности работы схемы наглядно видны на эпюрах рис. 4. На рис. 4а показана форма сигнала с выхода предусилителя. Полезный сигнал с частотой 312,5 кГц промодулирован паразитной НЧ составляющей из-за изменения постоянной составляющей при вращении сканирующего элемента и диска датчика. Причины этого объяснены выше. Непосредственное подключение

порогового устройства к выходу предусилителя привело бы к нестабильности его работы, т. е. к пропуску импульсов или к появлению ложных импульсов различной длительности и частоты. Это наглядно видно из рис. 4а, так как уровень НЧ составляющей в некоторые моменты времени может выйти за предел срабатывания порогового устройства.

Чтобы исключить это явление, между предусилителем и пороговым устройством включен полосовой фильтр-усилитель, который устраняет НЧ модуляцию и ВЧ составляющие шумов. Форма сигнала на выходе полосового усилителя показана на рис. 4б. Как видно из диаграммы, сигнал симметричен относительно нулевого уровня при отсутствии НЧ составляющей, а его фаза может совпадать или не совпадать с фазой сигнала с выхода предусилителя. Так как пороговое устройство представляет собой фактически “нуль-орган” (порог срабатывания близок к нулю), то временное положение импульсов и их длительность не изменяются, несмотря на возможную паразитную модуляцию сигнала по амплитуде. Форма сигнала на выходе порогового устройства показана на рис. 4в.

При испытаниях формирователь импульсов обеспечил надежную работу всего устройства без пропуска основных и появления ложных импульсов.

Таким образом, сочетая удачно выбранную технологию разработки дисков датчика, а именно нанесение рисунка, конструктивные особенности соединения сканера и дисков и специфическую обработку сигнала в формирователе, удалось создать малогабаритный фотоэлектрический датчик синхрои́мпульсов с достаточно высокой надежностью, не зависящей от механических биений, неизбежно сопутствующих работе сканера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерус П.С. и др. Фотоэлектрический датчик угла поворота. А. с. № 323651. 1972.
2. Криксунов Л.З., Падалко Г.А. Тепловизоры. Справочник. Киев: Техника. 1987.

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ВЫСОКОТОЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ВЭ-1227М

© 2007 г. А. Г. Бугаенко, доктор техн. наук; Р. И. Зарипов

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Одной из важнейших задач в области разработки, серийного изготовления и эксплуатации тепловизионных систем различного назначения является задача создания специальных измерительных средств для оценки характеристик тепловизионных приборов. В статье представлены новые научно-технические решения, обеспечивающие возможность модернизации измерительного стенда ВЭ-1227 в части автоматизации процессов измерения, стабилизации разностей радиационных температур на выходе коллиматора при одновременном улучшении точностных и эксплуатационных характеристик измерительного комплекса.

Коды OCIS: 120.0120.

Поступила в редакцию 15.06.2006.

Для оценки параметров тепловизионных приборов в процессе разработки, изготовления и проведения стендовых (заводских) испытаний в отрасли начиная с 1980-х годов были созданы специальные измерительные комплексы [1].

Одним из таких лабораторных измерительных комплексов стал стенд ВЭ-1227, разработанный и изготовленный малой серией в НПО ГИПО и централизованно поставленный на ряд предприятий отрасли, таких как ПО “КОМЗ” (г. Казань), ПО “Красногорский завод им. Зверева” (г. Красногорск Московской обл.), ПО “Орбита” (г. Ереван).

Лабораторный стенд ВЭ-1227 имел высокие для 80–90-х годов характеристики: однолинзовый ИК объектив со световым диаметром 190 мм и фокусным расстоянием 3840 мм, поле зрения 12°; фоновый источник излучения размером 400 × 500 мм с коэффициентом излучения ϵ не менее 0,95 и градиентом температурной неравномерности по поверхности не более 1 К/м; набор пассивных тестовых четырехштриховых миры с пространственной частотой от 0,17 до 3,7 мрад⁻¹, с адекватными фоновому излучателю характеристиками ϵ не менее 0,95 и градиентом температурной неравномерности по поверхности не более 1 К/м; диапазон измеряемых разностей радиационных температур между фоновым излучателем и мирой ΔT_m от нуля до 25 К.

Вместе с тем стенд ВЭ-1227 обладал рядом недостатков, к которым в первую очередь следует отнести регулировку температуры фонового излучателя вручную, относительно невысокую стабильность поддержания ΔT_m (среднее квадратическое отклонение 0,2 К), необходимость достаточно строгого обеспечения условий стабильности температуры окружающей среды T_a , длительность эксперимента, выражавшуюся в часах, для приведения температуры миры T_k к температуре T_a .

Появление в начале 2000-х годов тепловизионных приборов 2- и 3-го поколений предъявило к измерительным комплексам более жесткие требования в части стабильности поддержания, точности измерения, возможности создания как положительных, так и отрицательных значений ΔT_m , а также автоматической обработки результатов измерений.

Стабильность ΔT_m на выходе стенда зависит как от оптических характеристик его объектива, фонового излучателя и миры, которые можно считать постоянными в период между метрологическими поверками измерительного стенда при соблюдении правил и условий его эксплуатации, так и от выбранного способа регулирования разности термодинамических температур между фоновым излучателем и мирой ΔT и корректности его реализации. На величину T_k также влияет температура окружающей среды и фонового излучателя.

Для сохранения постоянного уровня ΔT_m необходимо при нерегулируемом изменении T_a и T_k по определенному закону изменять ΔT . Закон изменения может быть получен либо расчетным путем (что весьма приблизительно из-за разброса характеристик материалов покрытий, наличия трудно учитываемых внутренних переотражений в коллиматоре и т. д.), либо путем использования данных, полученных в результате калибровки (градуировки) стенда по уровням ΔT_m в пределах его рабочего диапазона при заданных значениях T_a и T_k , что может быть осуществлено компарированием стенда с образцовым ИК коллиматором.

В настоящее время разработан и создан универсальный электронный модуль, который совместно с современным персональным компьютером образует систему, позволяющую автоматически поддерживать любое заданное (в пределах рабочего диапазона) значение ΔT_m при изменении T_a и T_k . Исполь-

Сравнительные характеристики стендов ВЭ-1227 и ВЭ-1227М

Характеристика (параметр)	ВЭ-1227	ВЭ-1227М
Среднеквадратическое отклонение поддержания ΔT_m	0,2	0,01
Дискретность задания ΔT_m	0,2	0,01
Диапазон поддерживаемых значений ΔT_m , К	0–25	–5...+10
Индикация текущего значения ΔT_m	нет	есть
Возможность автоматического изменения ΔT_m по заданному закону	нет	есть
Автоматическая обработка результатов измерений	нет	есть
Хранение результатов измерений	нет	есть

Сравнительные характеристики стендов ВЭ-1227 и ВЭ-1227М приведены в таблице.

Анализ таблицы показывает, что модернизация стенда при сравнительно небольших материальных затратах позволила значительно улучшить его характеристики и получить измерительный комплекс, обеспечивающий контроль и измерение параметров современных и перспективных тепловизионных приборов с большой точностью и высоким уровнем автоматизации.

Технические решения, использованные при создании стенда ВЭ-1227М, защищены патентами РФ [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаенко А.Г. Аппаратура для оценки характеристик тепловизионных систем при испытаниях и эксплуатации // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 4. С. 19–25.
2. Бугаенко А.Г., Дедюхин Е.Ф., Зарипов Р.И., Иванов В.П., Кадыров И.И. Инфракрасный коллиматорный комплекс // Патент России на изобретение № 2244950. 2003.
3. Бугаенко А.Г., Зарипов Р.И., Иванов В.П., Курт В.И. Инфракрасный коллиматорный комплекс // Патент России на полезную модель № 51758. 2005.