

УДК 535-15.621.383

Тест-объекты для контроля фотоприемных устройств в инфракрасной области спектра*

И.С. ГИБИН¹, В.П. КОТЕНКО²

¹ 630090, РФ, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, Институт автоматики и электрометрии Сибирское отделение Российской академии наук, д. т. н., профессор, e-mail: gibin@iae.nsk.su

² 630049, РФ, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 179/2, Филиал «Урал-СибНИИОС» Уральского оптико-механического завода, ведущий инженер филиала (8-383) 225-18-36, e-mail: dolenko@iae.nsk.su

Рассмотрены вопросы создания тест-объектов для стендов контроля и измерения параметров инфракрасных фотоприемных устройств и тепловизионных систем. Разработаны технологии изготовления и проведены оценки и измерения их параметров. Тест-объекты (Т-О) представляют собой решетку из нескольких щелей, выполненных в непрозрачном материале. Ширина щелей от 60 до 600 мкм, и расположены они с шагом (периодом) от 120 до 1200 мкм соответственно. Точность геометрических размеров и неровность краев элементов топологии тест-объектов не должны быть хуже $5 < 10$ мкм. Толщина, материал и технология должны обеспечивать достаточную равномерность распределения температуры в плоскости тест-объекта при нагреве его при помощи нагревателя, расположенного на его периферии. Одна из поверхностей (обращенная к излучателю) должна иметь максимально высокую отражательную способность для исключения нагрева этим излучателем, другая (обращенная к фотоприемнику) – максимально высокую излучательную способность в спектральной области чувствительности фотоприемника, чтобы обеспечить максимально возможное приближение к спектру излучения «абсолютно черного тела» в этой области. Результаты экспериментов показали, что коэффициент отражения медной фольги существенно зависит (естественно) от степени шероховатости ее поверхности, которая увеличивается с увеличением толщины. Это определяется тем, что расширяется диаграмма направленности отраженного излучения, так и тем, что при многократном отражении увеличивается доля поглощенного излучения. Измерения проводились на инфракрасном спектрофотометре ИКС-29 с приставкой зеркального отражения ИПО-22.

Ключевые слова: тест-объекты, фотоприемные устройства (ФПУ), тепловизоры, инфракрасные системы, контроль параметров, измерительные системы, моделирующие системы, инфракрасный диапазон, контроль и измерения, технологии изготовления

ВВЕДЕНИЕ

При разработке и создании инфракрасных фотоприемных устройств и систем тепловидения важное значение имеют методы и средства их контроля и испытаний. Для этого создаются специализированные контрольно-измерительные стенды [1–7], ключевую роль в которых играют тест-объекты, представляющие собой решетку из нескольких щелей, выполненных в непрозрачном материале [9]. Данная работа посвящена технологии изготовления и контроля параметров тест-объектов инфракрасных систем.

1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕСТ-ОБЪЕКТА

Толщина, материал и технология должны обеспечивать достаточную равномерность распределения температуры в плоскости тест-объекта при нагреве его при помощи нагревателя, расположенного на его периферии. Одна из поверхностей (обращенная к излучателю) должна

* Статья получена 14 ноября 2013 г.

иметь максимально высокую отражательную способность для исключения нагрева этим излучателем, другая (обращенная к фотоприемнику) – максимально высокую излучательную способность в спектральной области чувствительности фотоприемника, чтобы обеспечить максимально возможное приближение к спектру излучения «абсолютно черного тела» в этой области. Кроме того, предъявлялось требование не использовать в конструкции тест-объекта материалов, содержащих органические вещества (лаки, краски ...), в связи с возможным выделением при их нагреве паров, имеющих полосы поглощения в используемой спектральной области.

В качестве материала для тест-объекта было предложено использовать медную фольгу, а чтобы получить максимальную излучательную способность – производить чернение одной стороны теста.

Высокие требования к точности формирования топологии обусловили использование фотолитографических процессов [8]. Однако значительная толщина фольги, требуемая для обеспечения высокой температуропроводности, а также высокая шероховатость поверхности, оказавшаяся необходимой, как будет показано далее, для увеличения излучательной способности, ограничивают возможности фотолитографии при простом травлении фольги. Поэтому для изготовления тест-объектов был использован метод гальванопластики. Проводилось наращивание медной фольги на поверхности шаблона из никелевой пленки, нанесенной на подложку из стекла. Никель наносился вакуумным катодным распылением, после чего на этой пленке фотолитографическим способом формировалась топология тест-объекта. Размеры отверстий (щелей) в никелевом шаблоне делались с припуском по отношению к конечным размерам в расчете на их уменьшение за счет дальнейшего наращивания меди, происходящего не только в направлении перпендикулярном плоскости подложки, но и в этой плоскости. Припуск определялся требуемой толщиной фольги, обеспечивающей достаточную излучательную способность и температуропроводность. Контроль за процессом электрохимического осаждения меди осуществлялся наблюдением в измерительный микроскоп. Процесс останавливался в момент достижения заданных размеров щелей. Толщина осажденного слоя меди в этот момент составляла $d_U \approx 40$ мкм.

Такая толщина оказалась близкой к предельной в связи с возрастанием при ее увеличении неровности краев. Поэтому после формирования центральной зоны с расположенными в ней щелями эта зона маскировалась наклейкой кружка из полиэтиленовой ленты с клеящим слоем. После этого процесс осаждения меди продолжался до достижения толщины ее в периферийной зоне $d_n \approx 100$ мкм. Затем маска снималась, а осажденная фольга отделялась от подложки. Никелевая пленка, служившая шаблоном, оставалась на подложке. Поверхность отделенной фольги, которая была обращена к подложке, повторяла ее форму и потому оказывалась гладкой (зеркальной). Поверхность, обращенная к раствору электрохимической ванны, – шероховатая, вид ее определялся составом раствора и режимом осаждения.

Известен ряд неорганических покрытий для чернения металлов [10]. Это, например, «черный хром», «черный никель», оксид меди: они применяются для защитных и декоративных (в видимой области спектра) целей, обычно для покрытия массивных деталей. Первые два покрытия требуют для формирования довольно сложных по составу гальванических ванн и высоких плотностей тока. Поэтому было решено опробовать оксид меди, тем более что это естественно для применяемой при создании тест-объекта медной фольги.

Отмеченная выше необходимость предварительного отделения фольги от подложки вызвана тем, что процесс чернения проводится при повышенной температуре, а это приводит к неконтролируемому отслоению участков фольги от подложки, затеканию раствора под фольгу и окислению поверхности, которая должна оставаться высокоотражающей. Чтобы защитить эту поверхность от окисления, на нее потребовалось перед чернением нанести инертный к используемому электролиту материал. Для этой цели было применено вакуумное покрытие ее катодным распылением никеля.

Для оценки излучательной способности применялось измерение адекватно связанного с ней коэффициента отражения. Измерения проводились на инфракрасном спектрофотометре ИКС-29 с приставкой зеркального отражения ИПО-22. Хотя при этом измерялась лишь зеркальная компонента отраженного излучения, это позволило качественно оценить изготавли-

ваемые тест-объекты, тем более что при использовании в тестируемых с их помощью приборах малоапертурной оптики на фотоприемник попадает часть излучения наблюдаемых объектов, направленная лишь в малых углах вблизи оптической оси [10].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ

Результаты экспериментов показали, что коэффициент отражения медной фольги существенно зависит от степени шероховатости ее поверхности, которая увеличивается с увеличением толщины. Это определяется как тем, что расширяется диаграмма направленности отраженного излучения, так и тем, что при многократном отражении увеличивается доля поглощенного излучения.

Зависимости коэффициентов отражения от толщины фольги, т. е. от степени шероховатости ее поверхности для неокисленной и для оксидированной (черненной) поверхностей, приведены на рис. 1. Из этого рисунка видно, что после оксидирования отражение уменьшается в 2...20 раз, в частности, для $d = 40$ мкм – примерно в 4 раза на длине волны $\lambda \approx 12$ мкм.

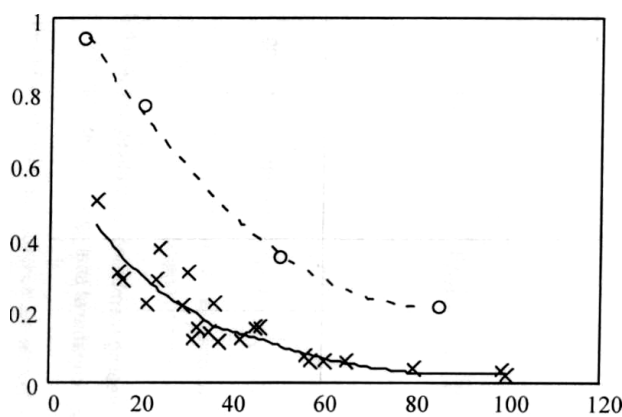


Рис. 1. Зависимости коэффициента отражения R от толщины d для неокисленной – о – и оксидированной – х – фольги

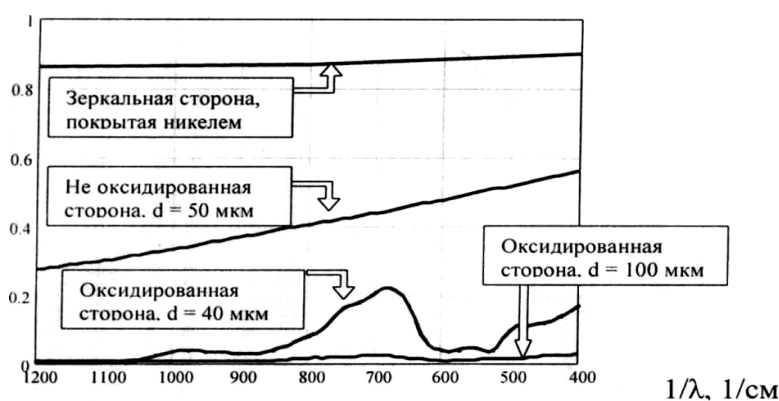


Рис. 2. Спектры отражения различных поверхностей медной фольги

Здесь видно, что отражение в более коротковолновой области уменьшается еще значительнее и составляет менее 5 % для 40 микронной фольги и менее 1 % для 100 микронной. Отражение покрытой никелем противоположной (зеркальной) поверхности превышает 90 %. Спектральные характеристики отражения даются на рис. 2.

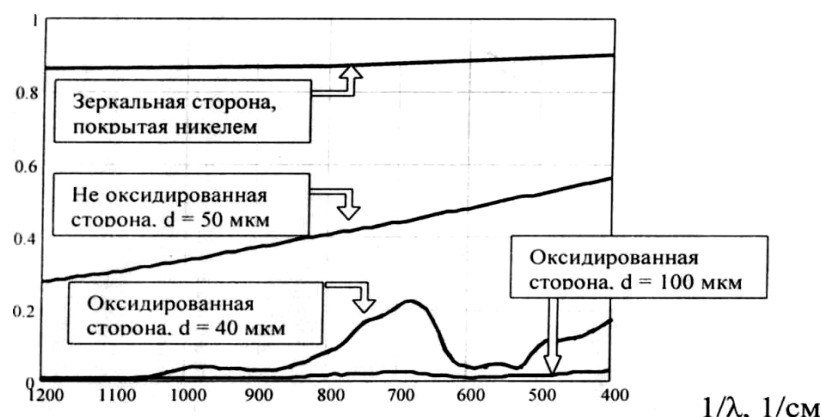


Рис. 3. Эскиз тест-объекта

Далее приводится табл. 1, включающая технологический маршрут изготовления тест-объекта с указанием основного оборудования, материалов и технологических режимов, основных требований, предъявленных параметрам тест-объектов.

Таблица 1

Технологический маршрут с указанием оборудования

	Наименование операции	Материалы	Оборудование	Режимы	Примечания
1	Подготовка подложек	Стекло 76-76-3 мм ³ . Ацетон. Дистиллированная вода. Вата, батист		Протирка, промывка, сушка	
2	Нанесение никеля на подложку	Никелевая мишень	Установка вакуумного катодного распыления УРМ.3.279.014.	Напряжение на мишени $U/M = 3$ кВ. Токи анодов 1а -1А. Давление аргона в камере $p = 5 \cdot 10^{-4}$ Торр время напыления $t = 20$ мин	
3	Фотолитография	Фоторезист. Азотная кислота. Ацетон. Дистиллированная вода. Едкое кали	Центрифуга. Термошкаф. Установка экспонирования. Измерительный микроскоп		
4	Электрохимическое осаждение меди	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (220г)+ $+\text{H}_2\text{SO}_4$ (66мл) на 1 л раствора. Медь анодная – пластина	Гальваническая ванна. Источник стабилизированного постоянного тока. Измерительный микроскоп	Ток ванны $I = 1.4$ А/дм Температура (17...24) °С. Скорость осаждения $w \sim 0.35$ мкм/мин. Время осаждения $t \sim 2$ часа	Осаждение контролируется наблюдением в микроскоп. Останавливается в момент достижения заданных размеров
5	Промывка, сушка	Вода водопроводная дистиллированная			
6	Наклейка маски на центральную зону	Лента с клеящим слоем	Приспособление для центрирования и приклейки маски		
7	Электрохимическое осаждение меди на периферийную зону тест-объекта.	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (220г)+ $+\text{H}_2\text{SO}_4$ (66мл) на 1 л раствора. Медь анодная – пластина	Гальваническая ванна. Источник стабилизированного постоянного тока	Ток ванны $I = 1.4$ А/дм. Температура (17...24) °С. Скорость осаждения $w \sim 0.35$ мкм/мин. Время осаждения $t \sim 3$ часа	

Окончание табл. 1

	Наименование операции	Материалы	Оборудование	Режимы	Примечания
8	Промывка, сушка	Вода водопроводная, вода дистиллированная			
9	Снятие маски				
10	Нанесение никеля на зеркальную сторону фольги	Никелевая мишень	Установка вакуумного катодного распыления УРМ.3.279.014	Напряжение на мишени $UM = 1.5$ кВ. Токи анодов $I = 1$ А. Давление аргона в камере $p = 5 \cdot 10^{-4}$ Торр Время напыления $t = 20$ мин	
11	Анодное окисление	Дистиллированная вода NaOH (100 г) на 1 л раствора. Пластина из стали нержавеющей – катод	Гальваническая ванна. Источник стабилизированного постоянного тока. Вольтметр	Ток ванны $I = 0.35$ А/дм Время окислирования $t = (15 \dots 40)$ мин	Процесс останавливается в момент резкого повышения напряжения между анодом и катодом ванны (начало выделения пузырьков кислорода на аноде)
12	Промывка, сушка	Вода водопроводная, вода дистиллированная			

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение проведенной работы выбрана технологическая схема изготовления тест-объектов, применяемых для контроля фотоприемных устройств, работающих в инфракрасной области спектра, разработаны технологические режимы операций, составляющих технологический процесс: изготовлены макетные технологические приспособления. В результате изготовлены 10 тест-объектов с заданными размерами и характеристиками, проведены измерения этих характеристик.

Для дальнейшего воспроизводимого изготовления тест-объектов требуется изготовление удобного и надежного технологического оборудования и обеспечение технологической гигиены.

Авторы выражают благодарность В.Л. Шурману за помощь при проведении физико-технологических измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Экспериментальные исследования матричных фотоприемных устройств инфракрасного диапазона для систем обнаружения малоразмерных объектов / А.Н. Галянтич, И.С. Гибин, В.В. Золотцев, М.В. Киселев, Г.В. Колесников // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 1. – С. 95–101.
- [2] Курт В.И. Аппаратно-методический комплекс метрологического обеспечения средств измерений и контроля характеристик тепловизионных приборов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13. – Казань, 2007. – 260 с.
- [3] Гладышев А.М. Стенд и методика оперативной проверки тепловизионных приборов // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники (БГУИР). – 2006. – №1 (33). – С. 35–45.
- [4] Бугаенко А.Г., Курт В.И., Ленина В.А. Инфракрасный измерительный комплекс для определения параметров тепловизионных приборов различного назначения // Прикладная оптика–98: тез. докл. междунар. конф. – СПб., 1998. – С. 81.
- [5] Физические основы и техника измерений в тепловидении / А.Г. Бугаенко, В.П. Иванов, А.Н. Омелаев, В.И. Тевяшов, В.Л. Филиппов. – Казань: Отечество, 2003. – 200 с.
- [6] Бугаенко А.Г. Методы и средства контроля характеристик тепловизионных приборов и систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.07. – Казань, 2005. – 300 с.
- [7] Алешко Е.И., Курт В.И., Рахимова Л.Р. Калибровка дифференциальных коллиматорных стендов по разности радиационных температур // Оптич. журн. – 2007. – Т. 74, № 3. – С. 13–15.

- [8] Введение в фотолитографию / под ред. В.П. Лаврищева. – М.: Энергия, 1977. – 400 с.
 [9] Инженерная гальванотехника в приборостроении / под ред. А.М. Гинберга. – М.: Машиностроение, 1977. – 512 с.
 [10] Технология тонких пленок: (справочник) / под ред. Л. Майссела, Р. Гленга. – М.: Сов. радио, 1977. – Т. 1. – С. 664.

Гибин Игорь Сергеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института автоматизации и электрометрии СО РАН. Основное направление научных исследований – опτικο-электронные системы хранения и обработки информации, инфракрасные системы. Имеет более 150 публикаций. E-mail: gibin@iae.nsk.su

Котенко Виктор Петрович, ведущий инженер филиала «Урал СибНИИОС» Уральского оптико-механического завода. Основное научное направление – физико-технологические проблемы опτικο-электронных систем. Имеет 20 научных публикаций. E-mail: dolenko@iae.nsk.su

Test-objects for measuring of photoreceivers in the infrared spectrum range*

I.S. GIBIN¹, V.P. KOTENKO²

¹ *Novosibirsk Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, I, Prospekt Akademian Koptuge, Novosibirsk, 630090, Russian Federation, D.Sc., professor, e-mail: gibin@iae.nsk.su*

² *Novosibirsk "Ural-Sibniios" branch of Ural Optical-Mechanical plant, 179/2, D.Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049. Russian Federation, leading engineer, the Ural-Sibniios branch*

Test-objects constitute a lattice of several slots made in an opaque material. The width of the slots is 60-600 μm . They are arranged with a period of 120-1200 μm respectively. Thickness, material, and technology should provide a sufficient uniformity of temperature distribution in the test-object plane when heating it with a heater situated on its periphery. One of the surfaces (turned towards the radiator) should have a maximally high reflecting ability in order to avoid heating by this radiator, the other one (turned towards the photoreceiver) should have a maximally high radiating ability in spectral area of the photoreceiver sensibility in order to provide the greatest possible approach to the radiation range of an 'absolutely black object' in this area. The results of the experiments have shown that the reflection coefficient of copper foil sufficiently depends on the degree of its surface roughness which grows as the thickness grows. It is determined both by the extension of the directorial pattern of the reflected radiation and by the increase in a share of the absorbed radiation at repeated reflections. Measurements were made on the infrared spectrophotometer 9ISP-29 with the specular reflection device ADR-22. The article addresses some aspects of creating test-objects for stands of the control and measuring parameters of infrared thermal imaging devices and photoreceiving systems. Manufacturing technologies have been developed and parameters measurements have been carried out.

Keywords: test-objects, photoreceiving devices, thermovision, thermovision systems, infrared systems, parameters control, measuring systems, modeling systems, infrared range, control and measurements, manufacturing technologies

REFERENCES

- [1] Galiantich A.N., Gibin I.S., Zolottsev V.V., Kiselev M.V., Kolesnikov G.V. Eksperimental'nye issledovaniia matrichnykh fotopriemnykh ustroystv infrakrasnogo diapazona dlia sistem obnaruzheniia malorazmer-nykh ob"ektov [Experimental Studies of Infrared Photodetector Arrays For Detection of Small Objects]. *Avtometriia – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 95-101.
 [2] Kurt V.I. Apparato-metodicheskii kompleks metrologicheskogo obespecheniia sredstv izmerenii i kontroliia kharakteristik teplovizionnykh priborov. Diss. dokt. tekhn. nauk [Hardware and methodical complex of metrological providing of measuring instruments and characteristics measuring of thermovision devices. Dr. tech. sci. diss.]. Kazan', 2007. 260 p.
 [3] Gladyshev A.M. Stend i metodika operativnoi proverki teplovizionnykh priborov [Stand and methodics of quick checking of thermovision devices]. *Doklady Belorusskogo Gosudarstvennogo universiteta informatics and radioelectronics (BGUIR)* [Proceedings of the Belarusian State Universitet of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)], 2006, №1 (33), pp. 35-45.
 [4] Bugaenko A.G., Kurt V.I., Lenina V.A. Infrakrasnyi izmeritel'nyi kompleks dlia opredeleniia parametrov televizionnykh priborov razlichnogo naznacheniiia [Infrared measuring complex for determining defining parameters thermovision devices for various purposes]. *Prikladnaia optika-98: tezisy dokladov mezhdunarodnoi konferentsii* [Applied optics-98. Proceedings of the international conference]. Sankt-Peterburg, 1998, p. 81.

* Manuscript received November 14, 2013.

- [5] Bugaenko A.G., Ivanov V.P., Omelaev A.N., Teviashov V.I., Filippov V.L. *Fizicheskie osnovy i tekhnika izmerenii v teplovidenii* [Physical bases and measuring technics in thermovision]. Kazan', Fatherland Publ., 2003. 200 p.
- [6] Bugaenko A.G. *Metody i sredstva kontrolya kharakteristik telovizionnykh priborov i system*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methods and means of thermovision devices and systems characteristics control. Dr. tech. sci. diss.]. Kazan', 2005. 300 p.
- [7] Aleshko E.I., Kurt V.I., Rakhimova L.R. Kalibrovka differentsial'nykh kollimatorynykh stendov po raznosti radiatsionnykh temperatur [Calibration of differential collimator stands on a difference of radiation temperatures]. *Opticheskii zhurnal – Russian Journal of Optical Technology*, 2007, vol. 74, no. 3, pp. 13-15.
- [8] Lavrishev V.P., ed. *Vvedenie v fotolitografiyu* [Introduction photolithography]. Moscow, Energy Publ., 1977. 400 p.
- [9] Ginberg A.M., ed. *Inzhenernaia gal'vanotekhnika v priborostroenii* [Galvanotechnics in instrument engineering]. Moscow, Mashinostroenie, 1977. 512 p.
- [10] Maissel L.I., and Clang R. (eds.). *Handbook of Thin Film Technology*. Vol. 1. New York, McGraw-Hill, 1970. (Russ. ed.: *Tekhnologiya tonkikh plenok*. Vol. 1. Moscow, Sov. Radio Publ., 1977, 664 p.).