

УДК 535-15

Низкотемпературные миры для настройки тепловизионных систем

© 2021 г. **В. В. Пронин**

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,
г. Сосновый Бор Ленинградской обл.

E-mail: wwp-niiki@rambler.ru

Поступила в редакцию 12.03.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-07-65-69

Представлены конструктивно простые низкотемпературные штриховые тест-объекты (миры), элементы которых находятся при температурах ниже температуры окружающей среды. Эти устройства построены на основе термоэлектрического элемента (Пельтье-модуля) с установленной на нем сменной теплоизолирующей подложкой с прорезями прямоугольной формы и нанесенным на нее тепловыделяющим токопроводящим слоем. Представлены экспериментальные термограммы макетов тест-объектов. Предлагаемые устройства предназначены для настройки тепловизионных систем, расширяют возможности их исследования и могут применяться как самостоятельно, так и в составе инфракрасных коллиматоров.

Ключевые слова: низкотемпературные миры, термоэлектрический элемент (Пельтье-модуль), тепловыделяющее токопроводящее покрытие, теплоизолирующий слой, термограмма, профиль температурного распределения, настройка и исследования тепловизионных систем.

Коды OCIS: 120.3940, 120.4800, 120.6810, 120.6780

Настройка и калибровка тепловизионных систем (ТВС), как правило, проводится в лабораторных условиях. Считается, что параметры, полученные при этих испытаниях, достаточны для оценки работы приборов в реальной обстановке [1]. Однако, основываясь на опыте авторов [2–4], наиболее полную и достоверную оценку работы приборов дают их испытания по таким объектам, температура которых приближена к реальным условиям их применения. Поэтому при настройке ТВС, предназначенных для работы по наземным низкотемпературным объектам, целесообразно применять миры, имеющие сопоставимые с ними температуры.

Задачей работы было построение и исследование конструктивно простого низкотемпературного тест-объекта (миры) для применения в лабораторных условиях.

В работе предлагается два варианта построения мир на базе термоэлектрического элемента с применением тепловыделяющего токопроводящего покрытия и теплоизолирующего слоя. Проводится сравнение предлагаемой миры с традиционно используемой, выполненной по известной схеме [1].

Для настройки и определения параметров ТВС традиционно применяются миры, построенные на базе протяженного излучателя. Температура одного из элементов таких мир, как правило, примерно равна температуре окружающей среды. Ее изменение и контроль приводит к усложнению самого тест-объекта. Так, одно из решений — применение еще одного излучателя, требующее дополнительных оптических элементов и изменения конструкции [1, 5]. Известны методы построения низкотемпературных мир с помощью охлаждения

жидким азотом. Такие миры имеют криогенные температуры, достаточно сложны в изготовлении и используются для проверок систем, работающих по объектам с температурами гораздо ниже достижимых на земной поверхности [6].

Цель проведенной работы — разработка конструктивно простых тест-объектов, все элементы которых находились бы при температурах ниже температуры в лабораторном помещении. При этом абсолютные значения температур должны оперативно задаваться и разница между «горячим» и «холодным» элементами должна быть в пределах нескольких градусов.

Один из вариантов миры создавался в такой последовательности: на одну из поверхностей плоского Пельтье-модуля квадратной формы со стороной 40 мм укладывался кремнийорганический герметик марки ВГО-1. Укладка проводилась в трафарет внутренним размером 30×20 мм и высотой 0,4 мм с последующим выравниванием для создания постоянной толщины слоя. Затем на его поверхность наносился тепловыделяющий токопроводящий слой из клея высокой электропроводности *Kontaktol* с добавлением серебра по той же методике. На получившемся двухкомпонентном основании выполнялись прорезы заданной ширины глубиной до поверхности элемента. Таким способом была образована периодическая структура с чередующимися полосами токопроводящего покрытия и полосами поверхности Пельтье-модуля.

Работают миры следующим образом: на модуль подается напряжение такой полярности, чтобы сторона с нанесенным токопроводящим покрытием охлаждалась. От нагретой стороны целесообразно организовать теплоотвод, например, установив модуль на радиатор с воздушным охлаждением. После охлаждения поверхности до требуемой температуры к токопроводящему покрытию прикладывают напряжение и увеличивают его до значения, необходимого для создания требуемой температуры. Для более глубокого охлаждения поверхности Пельтье-модуля можно применять многокаскадное охлаждение, позволяющее обеспечивать такой режим работы, при котором температура горячей стороны элемента поддерживается равной температуре окружающей среды. В этом режиме обеспечивается

наиболее эффективное охлаждение [7]. Мира может использоваться как самостоятельно, так и устанавливаться в фокальную плоскость инфракрасного коллиматора и применяться в качестве низкотемпературного тест-объекта.

На рис. 1 схематично представлена конструкция описанного выше тест-объекта. Между поверхностью радиатора и горячей стороной Пельтье-модуля для улучшения теплоотдачи наносилась теплопроводная кремнийорганическая паста КПТ-8.

При построении этой миры слои герметика и токопроводящего покрытия последовательно наносились на поверхность Пельтье-модуля. Для организации отвода тепла от нагретой стороны конструкция с мирой устанавливалась на дополнительный радиатор, и создавался обдув с помощью вентилятора. Обдув необходим также для удаления образующейся на мире влаги при установке отрицательных температур. Измерения проводились в следующих режимах: напряжение питания на Пельтье-модуль подавалось такой полярности, чтобы сторона с нанесенным токопроводящим покрытием охлаждалась. Прикладываемое напряжение в эксперимен-

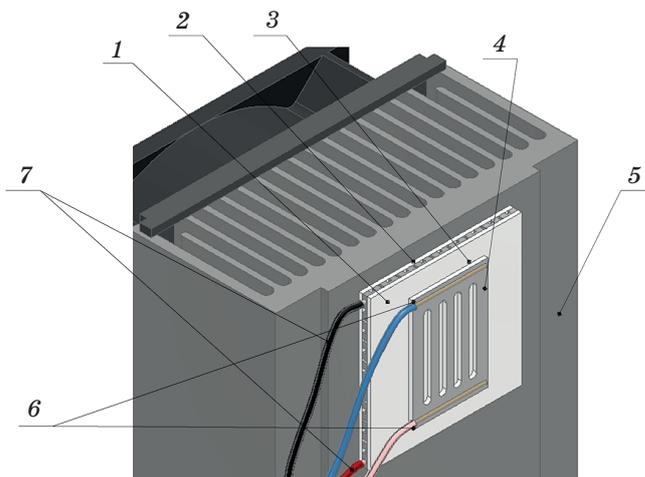


Рис. 1. Схема миры с подложкой из герметика. 1 — холодная сторона Пельтье-модуля, 2 — горячая сторона Пельтье-модуля, 3 — теплоизолирующий слой (подложка из герметика), 4 — тепловыделяющее токопроводящее покрытие, 5 — радиатор охлаждения с вентилятором обдува, 6 — провода подвода напряжения питания к тепловыделяющему токопроводящему покрытию, 7 — провода подвода напряжения питания к Пельтье-модулю.

тах варьировалось от 2 до 11 В. Напряжение, прикладываемое к токопроводящему слою, изменялось от 0,5 до 1,6 В.

Измерения температуры и последующая обработка термограммы проводились с использованием поверенного тепловизора *Testo-882* и программного обеспечения *IRSoft*. Спектральный диапазон работы тепловизора — 8–14 мкм, порог чувствительности по температуре — 60 мК.

Коэффициенты излучения токопроводящего покрытия и поверхности Пельтье-модуля определялись экспериментально на поверенном спектрометре ФСМ-2201, укомплектованном приставкой диффузного отражения, в диапазоне 8–14 мкм согласно методике, описанной в работе [8].

Кроме того, температура элементов микротемпературной камеры контролировалась с помощью двух идентичных термопар DS18S20, ошибка измерения температуры которых составляла 0,5 °С. Обе термопары подключались через адаптер DS240164 к компьютеру с программой *OneWireViewer* для мониторинга и записи значений температуры.

Термопары подвергались предварительной калибровке с целью определения разницы в показаниях при измерении на объекте, имеющем одинаковую температуру по поверхности. Для этого обе термопары монтировались с помощью теплопроводящего клея ВК-9 с добавлением серебряной пудры на массивную медную пластину, установленную на поверхность Пельтье-модуля. Температура поверхности регулировалась в пределах от 0 до 25 °С. Измерение температуры поверхности осуществлялось с помощью паспортизованного АЧТ-7 следующим образом: тепловизор *Testo-882* наводился на излучатель и массивную медную пластину с установленными на ней термопарами. Используя меню экрана, измерялись температуры АЧТ-7 и пластины. Если они различались, то изменением приложенного к Пельтье-модулю напряжения достигалось равенство температур. Таким образом определялась температура пластины. Мониторинг показаний термопар проводился при использовании программного обеспечения, наибольшая разница в показаниях составляла 0,1 °С.

Абсолютные значения температур сравнивались с показаниями поверенного термо-

гигрометра ИВА-6Н-Д. Для этого обе термопары, установленные на массивную медную пластину, выдерживались в течение 3 ч при комнатной температуре, а затем их показания сравнивались с показаниями термогигрометра. Здесь разница между показаниями поверенного прибора и термопар составила 0,5 °С. Такая же процедура проводилась в холодильной камере при температуре +5 °С: разница составила 0,4 °С.

Таким образом, максимальная ошибка в определении абсолютного значения температуры не превышала 0,5 °С, разница в показаниях термопар составила 0,1 °С, при этом показания обеих термопар отличались всегда в одну сторону от показаний поверенного термогигрометра.

Температура окружающей среды была в пределах 20–24 °С, относительная влажность — в пределах 33–35%.

На рис. 2 представлены фотографии низкотемпературной микротемпературной камеры, установленной на дополнительный радиатор и ее термограмма, полученная с помощью тепловизора *Testo-882*.

Для сравнения предлагаемой микротемпературной камеры с традиционно используемой был собран тест-объект (мика) на основе протяженного излучателя и маски с прорезями, изображение которого представлено на рис. 3а. Прорези маски сделаны с такой же пространственной частотой, что и полосы токопроводящего покрытия предлагаемой микротемпературной камеры. Температура находящегося под маской излучателя была установлена на 4 °С выше температуры окружающей среды и составляла 25 °С. Термограмма этой микротемпературной камеры представлена на рис. 3б.

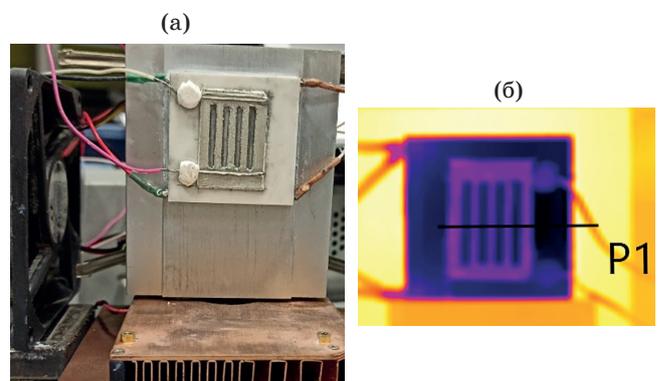


Рис. 2. Фотография микротемпературной камеры с теплоизолирующим слоем из герметика (а) и ее термограмма (б).

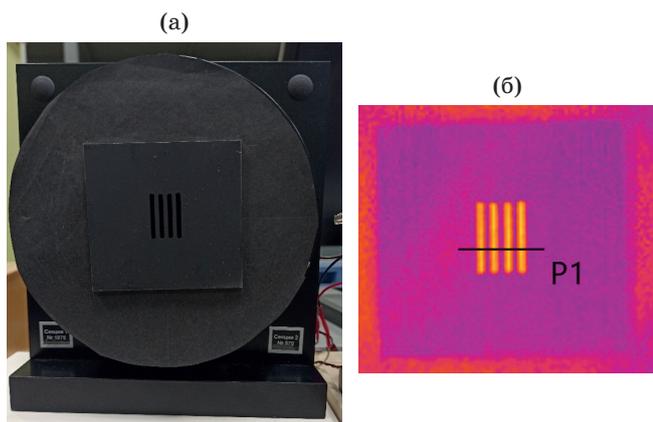


Рис. 3. Фотография миры на основе протяженного излучателя (а) и ее термограмма (б).

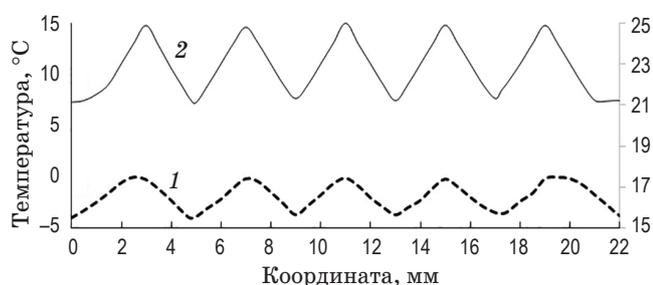


Рис. 4. Профили температурного распределения низкотемпературной миры (1) и миры с прорезями на основе протяженного излучателя (2). Значения температуры по основной оси ординат (слева) относятся к профилю предлагаемой миры, по вспомогательной (справа) — к традиционной.

На рис. 4 на одном графике приведены два профиля температурного распределения сравниваемых мир.

Видно, зависимости температуры от пространственной частоты имеют сходный характер, разница температур между элементами практически одинакова, однако абсолютные значения температур элементов миры различаются примерно на 25 °С. Согласно рекомендациям, приведенным в литературе [1, 2], настройку ТВС предпочтительней проводить по объектам, имеющим температуру, близкую к температуре реальных объектов, по которым система будет работать.

На рис. 5 представлены профили температурного распределения предлагаемой миры при разных управляющих напряжениях Пельтье-модуля и токопроводящего слоя.

Получившийся температурный профиль имеет квазисинусоидальный характер, что

предпочтительней для оценок параметров качества ТВС [9]. Профиль традиционно используемой миры на основе протяженного АЧТ и маски с прорезями ближе к пилообразной форме, что менее удобно для этих оценок.

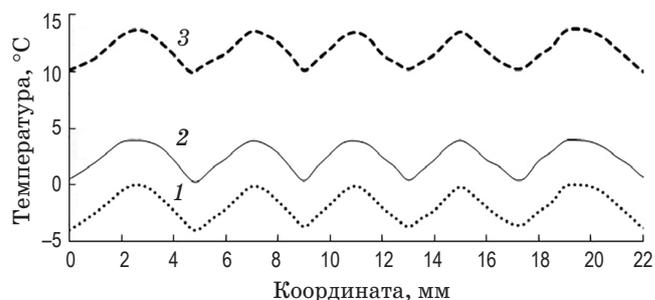


Рис. 5. Температурные профили при разных управляющих напряжениях. Кривые 1, 2, 3 — различные температурные режимы при трех комбинациях приложенного к Пельтье-модулю и тепловыделяющему слою напряжениях.

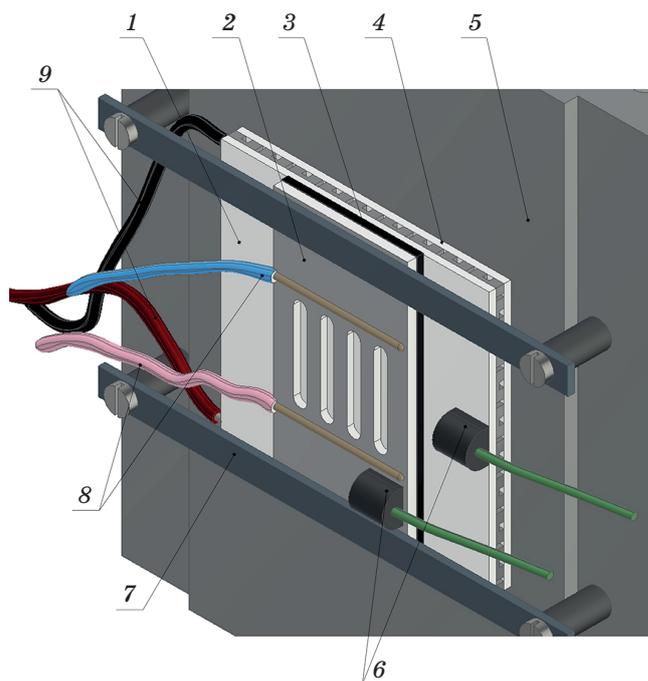


Рис. 6. Схема построения низкотемпературной миры со сменной пластиной с прорезями. 1 — холодная сторона Пельтье-модуля, 2 — тепловыделяющее токопроводящее покрытие, 3 — сменная теплоизолирующая пластина с прорезями, 4 — горячая сторона Пельтье-модуля, 5 — радиатор с вентилятором охлаждения, 6 — цифровые датчики температуры, 7 — прижимная пластина, 8 — провода подвода напряжения питания токопроводящего слоя, 9 — провода подвода напряжения питания Пельтье-модуля.

Другой вариант построения низкотемпературной миры — применение пластины из диэлектрика с нанесенным токопроводящим покрытием и проделанными с равными промежутками прорезями. Такая пластина играет роль теплоизолятора вместо герметика, примененного в предыдущем варианте построения, и устанавливается на охлаждаемую сторону Пельтье-модуля через теплопроводящую пасту. Такой вариант построения позволяет использовать один модуль при сменных пластинах с разными типоразмерами элементов и при тех же возможностях регулировок температур. На рис. 6 схематично представлен вариант построения такой миры. Для улучшения охлаждения всей конструкции между теплоизолирующей пластиной и холодной стороной модуля наносилась теплопроводящая паста.

В ходе проведения работы температура холодной поверхности Пельтье-модуля достигала $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дальнейшее ее понижение оказалось затруднительным из-за трудностей с обеспечением отвода тепла от горячей стороны элемента. Максимально достижимые температуры охлаждения поверхности модуля составят порядка $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ при условии отвода тепла

от его горячей стороны и поддержания ее температуры на уровне окружающей среды [7].

Представленные в работе миры построены в лабораторных условиях без применения специального оборудования как макеты для экспериментальной проверки идеи такого конструктивного решения. При применении специального оборудования, например, камеры для вакуумного напыления токопроводящего слоя или станка для лазерной резки материалов, можно изготовить миры гораздо более высокого качества.

Выводы

Описанные конструкции позволяют устанавливать температуры элементов миры ниже температуры окружающей среды и оперативно их задавать. Диапазон задаваемых температур определяется диапазоном регулировок Пельтье-модуля и теплоотдачей токопроводящего слоя. Описанные тест-объекты просты в изготовлении, имеют невысокие стоимость и трудозатраты и могут применяться для лабораторного тестирования тепловизионных систем, работающих по низкотемпературным наземным объектам.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chrzanowski K.* Testing thermal imagers. Practical guidebook. Warsaw, Poland: Military University of Technology, 2010. 164 p.
2. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 410 с.
3. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. Пер с франц. М.: Мир, 1988. 416 с.
4. *Бетенски Э., Хопкинс Р., Шеннон Р. и др.* Проектирование оптических систем. Пер. с англ. / Под ред. Шеннона Р., Вайанта Дж. М.: Мир, 1983. 432 с.
5. *Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И.* Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993. 128 с.
6. *Zhenqi Liu, Zhonghui Hu, Chao Wang, et al.* Optimal refrigerating plate for low-temperature infrared target source // Patent of China № CN 103983363A. 2014.
7. *Шостаковский П.* Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники // Компоненты и технологии. 2009. № 12. С. 40–46.
8. *Пронин В.В., Сидоровский Н.В., Старченко А.Н.* Комплекс для измерения спектральных характеристик материалов и покрытий в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тр. XIV Всерос. научно-практ. конф. РАРАН. 2011. С. 141–145.
9. *Шульман М.Я.* Измерение передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение, Л. отд., 1980. 208 с.