

УДК 621.37/39-181.5



Аракелов Г.А.

Аракелов Г.А.

ОАО Государственный научный центр РФ «НПО «Орион»,
шоссе Энтузиастов, 46/2, Москва, 111123, РФ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ ИНФРАКРАСНЫХ ДИАПАЗОНОВ

Рассмотрены технические особенности приборов на основе неохлаждаемых микроболометрических матриц инфракрасных диапазонов. Показано, что наилучшим инструментом для прецизионной термостабилизации микроболометрических матриц является термоэлектрическая батарея. Определены конструкционные критерии выбора термоэлектрической батареи для приборов с такой архитектурой.

Ключевые слова: микроболометрическая матрица, термоэлектрическая батарея, термостабилизация.

Technical features of devices based on uncooled microbolometric arrays of infrared ranges are considered. A thermopile is shown to be the best tool for precision thermal stabilization of microbolometric arrays. Construction criteria for selection of a thermopile for devices with such architecture are defined.

Key words: microbolometric array, thermopile, thermostabilization.

Введение

Анализ современных высокотехнологичных направлений науки и техники показывает, что они нашли свое реальное воплощение во многих видах новой оборонной техники. К ним в первую очередь относятся разработки систем дальней космической тепlopеленгации пусков баллистических ракет, тепловизионных систем управления огнем танков и самолетов, высокоточного ракетно-артиллерийского вооружения с лазерным наведением, систем противоракетной обороны, многоспектральных комплексов противовоздушной обороны, оптических и волоконно-оптических систем передачи информации, разработки устройств лазерной дальнометрии, особенно на длинах волн, безопасных для человеческого зрения и др. Роль оптики и инфракрасной техники в таких вооружениях является основополагающей, так как именно оптико-электронные системы определяют дальность действия, энергопотребление, вес и габариты оборонных комплексов. В ряде случаев задача просто не может быть решена без использования устройств, регистрирующих собственное тепловое излучение реальной цели, например, при наличии многочисленных ложных объектов или радиопомех, понижающих эффективность радиолокации. Поэтому особое значение имеют полностью пассивные инфракрасные системы, которые сами по себе ничего не излучают в радиодиапазоне и, следовательно, не могут быть обнаружены средствами радиоэлектронной разведки и подавления [1].

Ключевыми элементами практически любой оптико-электронной системы являются фотоприемники (ФП) инфракрасного (ИК) излучения. В большинстве случаев для обеспечения

эффективной работы этих приборов требуется охлаждение их полупроводниковых фоточувствительных элементов (ФЧЭ), что позволяет обеспечить преимущество оптической генерации носителей заряда перед тепловыми переходами [2]. При этом одним из самых востребованных способов охлаждения для указанных целей является термоэлектричество, обеспечивающее достижение необходимых значений обнаружительной способности ФП в основном в средневолновой (3 – 5 мкм) области спектра. В то же время необходимо отметить, что в последние годы дальнейшее развитие техники твердотельной фотоэлектроники во многом определяется массовым внедрением в аппаратуру микроболометрических матриц (МБМ) для ИК-диапазона 8 – 14 мкм [3]. Принцип действия МБМ заключается в следующем: оптическое излучение, попадающее на МБМ, поглощается и нагревает чувствительный элемент, который имеет достаточно большой температурный коэффициент сопротивления. Изменение сопротивления из-за нагрева преобразуется в напряжение, т.е. в регистрируемый сигнал.

Отличительной особенностью конструкций этих приборов является, как правило, отсутствие какой-либо системы охлаждения и, следовательно, тепловизионный модуль имеет меньшие энергопотребление, габариты и массу. Производство МБМ на основе окиси ванадия или кремния значительно дешевле, чем охлаждаемых ФП. В то же время применение МБМ ведет к необходимости учета ряда факторов, что вызывает необходимость наличия в их составе прецизионного регулятора температуры МБМ на основе однокаскадной термоэлектрической батареи (ТЭБ). Однако научно-технические публикации по этой тематике практически отсутствуют и, вследствие этого, существует определенный информационный пробел в части обоснованности и необходимости использования для указанной цели ТЭБ, а также специфики приборов с их применением. Настоящая статья посвящена именно этим аспектам.

Технические особенности приборов

Конструктивно МБМ представляют собой набор микромостиков. Каждый из них опирается на кремниевую пластину с помощью двух диэлектрических опор с минимальной теплопроводностью. Такая организация МБМ обеспечивает большое ее тепловое сопротивление относительно подложки. Для этого же МБМ монтируются в вакуумированные корпуса. Таким образом, предотвращается утечка от МБМ накопленной тепловой энергии поглощенного ИК-излучения [3]. Строго говоря, для функционирования МБМ не требуется ее охлаждения относительно температуры окружающей среды. В то же время предъявляются весьма жесткие требования к стабильности рабочей температуры T_s МБМ. Эти требования определяются оптической схемой прибора, в котором она используется, площадью МБМ, ее температурным коэффициентом сопротивления и величиной тепловой связи с подложкой, а также другими факторами [4].

Расчеты, проведенные автором, показывают, что для МБМ на основе пленки ванадия фиксация изменения температуры наблюдаемого объекта ($\Delta T_{\text{Об}}$) на $1.5 \cdot 10^{-1}$ К возможна только при точности ее термостабилизации ($\Delta T_{\text{Б}}$) на уровне $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ К.

Точность поддержания температуры в интервале $\pm 5 - 10$ мК определяется тем, что приращение $\Delta T_{\text{Б}}$ температуры болометра при изменении $\Delta T_{\text{Об}}$ температуры объекта соответствует выражению:

$$\Delta T_{\text{Б}}(\Delta T_{\text{Об}}) \approx R_T K_{\Delta\lambda} \mu_{\Delta\lambda} \Delta T_{\text{Об}} A_{\text{Б}} (\partial M_{\Delta\lambda} / \partial T_{\text{Об}}) / 4F_{\#}^2,$$

где R_T – тепловое сопротивление болометра, К/Вт; $K_{\Delta\lambda}$ – эффективное значение коэффициента поглощения излучения микроболометра в спектральном интервале $\Delta\lambda$; $\mu_{\Delta\lambda}$ – эффективное значение

коэффициента пропускания объектива в том же интервале; A_B – площадь микроболометра, см^2 ; $M_{\Delta\lambda}$ – плотность мощности излучения объекта в интервале длин волн $\Delta\lambda$, $\text{Вт}/\text{см}^2$; $F_{\#}$ – величина, обратная относительному отверстию объектива.

В рассматриваемом случае величины, входящие в выражение, имеют следующие ориентировочные значения: $R_T \leq 1 \cdot 10^7 \text{ К}/\text{Вт}$; $K_{\Delta\lambda} \approx 0.7$; $\mu_{\Delta\lambda} \approx 1$; $A_B \approx 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$; $\partial M_{\Delta\lambda} / \partial T_{\text{Об}} \approx 2.6 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ ($\Delta\lambda = 8 - 14 \text{ мкм}$); $F_{\#} = 0.7$.

Тогда при $\Delta T_{\text{Об}} = 0.15 \text{ К}$ точность термостабилизации $\Delta T_B (0.15) \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ К}$.

Термоэлектрическая термостабилизация МБМ

Вообще говоря, устройства термостабилизации делятся на пассивные и активные. Пассивные устройства не имеют в своем составе каких-либо источников тепла или холода, что определяет невозможность реализации высокой точности термостабилизации в широком диапазоне температуры окружающей среды T_0 .

Напротив, активные устройства включают в свой состав источники тепла или холода (порознь или вместе). При этом в зависимости от уровня T_s активная термостабилизация при изменении температуры T_0 от T_0^{\min} до T_0^{\max} может быть трех типов.

Низкотемпературная термостабилизация, когда $T_s < T_0^{\min}$, характеризуется наличием избытков тепла и в полупроводниковом приборостроении находит ограниченное применение.

Нормальная термостабилизация, когда $T_0^{\min} < T_s < T_0^{\max}$, отличается тем, что в различное время требуется либо подводить тепло, либо его отводить. Этот метод наиболее широко применяется при $T_s = 283 - 298 \text{ К}$.

Высокотемпературная термостабилизация, когда $T_s > T_0^{\max}$, требует постоянного подвода тепла к искомому объекту.

Ввиду того, что для МБМ $T_s = 283 - 298 \text{ К}$, в дальнейшем рассматривается только вариант нормальной термостабилизации. С учетом этого фактора необходимо признать, что ТЭБ является наилучшим инструментом для прецизионной термостабилизации МБМ. Являясь одновременно возможным источником как тепла, так и холода, ТЭБ обладает целым рядом технических преимуществ, в том числе малыми габаритами, массой, энергопотреблением и временем выхода на режим, простотой конструкции, высокой надежностью, бесшумностью при эксплуатации, отсутствием микрофонного эффекта, независимостью от ориентации в пространстве и т. д. Вышеприведенный комплекс отличий для ТЭБ является совершенно тривиальным, что делает ее наиболее предпочтительной для реализации указанной цели [5].

Активная нормальная термостабилизация с помощью ТЭБ может быть осуществлена одним из следующих способов:

чисто термоэлектрическим, когда нагрев и охлаждение обеспечивается соответствующей полярностью питающего напряжения ТЭБ;

термоэлектрическим охлаждением и электроподогревом;

термоэлектрическим охлаждением или подогревом с дополнительным электроподогревом.

Второй способ находит применение при термостабилизации объектов в широком диапазоне температур со значением T_s , близким, но меньшим T_0 . С энергетической точки зрения он уступает первому способу и конструктивно сложнее его.

Третий способ является комбинацией предыдущих. Он предназначен для термостабилизации в условиях, характерных для второго способа при форсировании режима нагрева. Энергетически по сравнению с другими способами он менее выгоден, а конструктивно аналогичен

предыдущему.

Среди способов активной нормальной термостабилизации при обычных к ней требованиях оптимальным является чисто термоэлектрический. Этот тезис действителен и в случае приборов с МБМ.

Выбор ТЭБ в таких и аналогичных приборах определяется как заданным уровнем термостабилизации МБМ, так и ее геометрическими размерами. В то же время в таких приборах, как правило, необходимо дополнительно обеспечивать высокую степень однородности термостабилизации по площади МБМ ($\leq 2 \cdot 10^{-2}$ К). Столь жесткое требование соответственно определяет конструкцию и общую архитектуру ТЭБ. Очевидно, что ТЭБ должна содержать повышенное количество термоэлементов с относительно высокой их упаковкой, т. е. с минимальными расстояниями между собой. Тем самым на рабочей площадке ТЭБ организуется большое количество расположенных вблизи друг от друга дискретных источников холода или тепла, что объективно способствует реализации поставленной технической задачи. Дополнительное выравнивание температурного поля обеспечивает изготовление рабочей площадки ТЭБ из керамического материала с высокой теплопроводностью, например, окиси бериллия или нитрида алюминия. В некоторых случаях для той же цели используется медная пластина, смонтированная на рабочей площадке ТЭБ.

Необходимые точность поддержания и контроль температуры МБМ осуществляются с помощью соответствующей элементной базы и аппаратурного обеспечения, в том числе термодатчиком. В [4] описаны результаты испытаний разработанной системы термостабилизации МБМ на базе однокаскадной ТЭБ, которая обеспечила выбор T_s в диапазоне 283 – 298 К с точностью поддержания $\pm 2.5 \cdot 10^{-3}$ К при $T_0 = 288 – 303$ К. Эти данные вполне соответствуют сформулированным выше техническим требованиям к системам термостабилизации МБМ.

Выводы

Настоящая статья не претендует на всеобъемлющее и детальное освещение всех тех проблем, с которыми сталкиваются разработчики ИК-техники при создании систем термостабилизации МБМ. Автор обозначил только некоторые ключевые аспекты, которые подлежат учету в обязательном порядке, и планирует продолжить публикации по этой тематике.

Литература

1. Пономаренко В.П. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений (1946 – 2006) / В.П. Пономаренко, А.М. Филачев. – М.: Физматкнига. – 2006. – 336 с.
2. Анатычук Л.И. Пределы термоэлектрического охлаждения для фотоприемников / Л.И. Анатычук, Л.Н. Вихор // Термоэлектричество. – 2013. – № 5. – С. 62 – 68.
3. Филачев А.М. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотозлектроники / А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко – М.: Физматкнига, 2010. – 128 с.
4. Козлов А.Б. Система стабилизации температуры неохлаждаемой микроболометрической матрицы / А.Б. Козлов, Ю.В. Куликов, В.Г. Маляров, И.А. Хребтов // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68. – №1. – С. 70 – 73.
5. Аракелов Г.А. Состояние работ и перспективы развития термоэлектрического охлаждения для фотозлектрических полупроводниковых приемников излучения / Г.А. Аракелов // Прикладная физика. – 2002. – № 6. – С. 78 – 84.

Поступила в редакцию 21.10.14.