

УДК 621.37/39-181.5



Аракелов Г.А.

**Аракелов Г.А.**

ВАТ Державний науковий центр РФ «НПО «Оріон»,  
шосе Ентузіастів, 46/2, Москва, 111123, РФ

### **ДЕЯКІ ПИТАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЕРМОСТАБІЛІЗАЦІЇ МІКРОБОЛОМЕТРИЧНИХ МАТРИЦЬ ІНФРАЧЕРВОНИХ ДІАПАЗОНІВ**

---

*Розглянуто технічні особливості приладів на основі неохолоджуваних мікроболометричних матриць інфрачервоних діапазонів. Показано, що найкращим інструментом для прецизійної термостабілізації мікроболометричних матриць є термоелектрична батарея. Визначено конструкційні критерії вибору термоелектричної батареї для приладів з такою архітектурою.*

**Ключові слова:** мікроболометрична матриця, термоелектрична батарея, термостабілізація.

*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.

#### **Вступ**

Аналіз сучасних високотехнологічних напрямків науки й техніки показує, що вони знайшли своє реальне втілення в багатьох видах нової оборонної техніки. До них в першу чергу належать розробки систем далекої космічної тепlopеленгації пусків балістичних ракет, тепловізійних систем керування вогнем танків і літаків, високоточного ракетно-артилерійського озброєння з лазерним наведенням, систем протиракетної оборони, багатоспектральних комплексів протиповітряної оборони, оптичних і волоконно-оптичних систем передачі інформації, розробки обладнань лазерної дальнометрії, особливо на довжинах хвиль, безпечних для людського зору й ін. Роль оптики й інфрачервоної техніки в таких озброєннях є основною, тому що саме оптико-електронні системи визначають дальність дії, енергоспоживання, вагу й габарити оборонних комплексів. У ряді випадків завдання просто не може бути вирішене без використання обладнань, що реєструють власне теплове випромінювання реальної цілі, наприклад, за наявності численних неправильних об'єктів або радіоперешкод, що роблять радіолокацію малоефективною. Тому особливе значення мають повністю пасивні інфрачервоні системи, які самі по собі нічого не випромінюють у радіодіапазоні й, отже, не можуть бути виявлені засобами радіоелектронної розвідки й заглушення [1].

Ключовими елементами практично будь-якої оптико-електронної системи є фотоприймачі (ФП) інфрачервоного (ІЧ) випромінювання. У більшості випадків для забезпечення ефективної роботи цих приладів потрібне охолодження їх напівпровідникових фоточутливих елементів (ФЧЕ), що дає можливість забезпечити перевагу оптичної генерації носіїв заряду перед тепловими переходами [2]. При цьому одним із найбільш затребуваних способів охолодження для зазначених цілей є термоелектрика, що забезпечує досягнення необхідних значень виявної здатності ФП в основному в середньохвильовій (3-5 мкм) області спектра. У той же час необхідно відзначити, що в останні роки подальший розвиток техніки твердотільної фотоелектроніки багато в чому визначається масовим впровадженням в апаратуру мікроболометричних матриць (МБМ) для ІЧ-діапазону 8-14 мкм [3]. Принцип дії МБМ полягає в наступному: оптичне випромінювання, що потрапляє на МБМ поглинається й нагріває чутливий елемент, який має досить великий температурний коефіцієнт опору. Зміна опору через нагрівання перетворюється в напругу, тобто в реєстрований сигнал.

Відмінною рисою конструкцій цих приладів є здебільшого відсутність якої-небудь системи охолодження й, отже, тепловізійний модуль має менші енергоспоживання, габарити й масу. Виробництво МБМ на основі окису ванадію або кремнію значно дешевше, ніж охолоджуваних ФП. У той же час застосування МБМ призводить до необхідності врахування низки факторів, що передбачає наявність у їхній сполучці прецизійного регулятора температури МБМ на основі однокаскадної термоелектричної батареї (ТЕБ). Однак науково-технічні публікації з цієї тематики практично відсутні й унаслідок цього є певна інформаційна прогалина у частині обґрунтованості й необхідності використання для зазначеної мети ТЕБ, а також специфіки приладів з їхнім застосуванням. Пропонована стаття присвячена саме цим аспектам.

### Технічні особливості приладів

Конструктивно МБМ являють собою набір мікромістків. Кожний з них опирається на кремнієву пластину за допомогою двох діелектричних опор з мінімальною теплопровідністю. Така організація МБМ забезпечує великий її тепловий опір відносно підложки. Для цього ж МБМ монтується в вакуумовані корпуси. Таким чином, запобігається витік від МБМ накопиченої теплової енергії поглиненого ІЧ-випромінювання [3]. Строго кажучи, для функціонування МБМ не потрібно її охолодження по відношенню до температури навколишнього середовища. У той же час виставляються досить тверді вимоги до стабільності робочої температури  $T_s$  МБМ. Ці вимоги визначаються оптичною схемою приладу, у якому вона використовується, площею МБМ, її температурним коефіцієнтом опору й величиною теплового зв'язку з підложкою, а також іншими факторами (4).

Розрахунки, проведені автором, показують, що для МБМ на основі плівки ванадію фіксація зміни температури спостережуваного об'єкта ( $\Delta T_{\text{об}}$ ) на  $1,5 \cdot 10^{-1}$  К можлива тільки в разі точності її термостабілізації ( $\Delta T_B$ ) на рівні  $\pm 5 \cdot 10^{-3}$  К.

Точність підтримки температури в інтервалі  $\pm 5$ -10 мК визначається тим, що збільшення  $\Delta T_B$  температури болометра зі зміною  $\Delta T_{\text{об}}$  температури об'єкта відповідає виразу

$$\Delta T_{B(\Delta T_{\text{об}})} \approx R_T K_{\Delta\lambda} \mu_{\Delta\lambda} \Delta T_{\text{об}} A_B (\partial M_{\Delta\lambda} / \partial T_{\text{об}}) / 4F_{\#}^2,$$

де  $R_T$  — тепловий опір болометра, К/Вт;

$K_{\Delta\lambda}$  — ефективне значення коефіцієнта поглинання випромінювання мікроболометра в спектральному інтервалі  $\Delta\lambda$ ;

$\mu_{\Delta\lambda}$  — ефективне значення коефіцієнта пропускання об'єктива в тому ж інтервалі;

$A_B$  — площа мікроболометра,  $\text{см}^2$ ;

$M_{\Delta\lambda}$  — густина потужності випромінювання об'єкта в інтервалі довжин хвиль  $\Delta\lambda$ ,  $\text{Вт}/\text{см}^2$ ;

$F_{\#}$  — величина, обернена до відносного отвору об'єктива.

У розглянутому випадку величини, що входять у вираз, мають наступні орієнтовні значення:  $R_T \leq 1 \cdot 10^7 \text{ К}/\text{Вт}$ ;  $K_{\Delta\lambda} \approx 0,7$ ;  $\mu_{\Delta\lambda} \approx 1$ ;  $A_B \approx 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ ;  $\partial M_{\Delta\lambda} / \partial T_{\text{об}} \approx 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$  ( $\Delta\lambda = 8\text{-}14 \text{ мкм}$ );  $F_{\#} = 0,7$ .

Тоді за  $\Delta T_{\text{об}} = 0,15 \text{ К}$  точність термостабілізації  $\Delta T_B(0,15) \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ К}$ .

## Термоелектрична термостабілізація МБМ

Загалом кажучи, обладнання термостабілізації діляться на пасивні й активні. Пасивні обладнання не мають у своєму складі яких-небудь джерел тепла або холоду, що визначає неможливість реалізації високої точності термостабілізації в широкому діапазоні температури навколишнього середовища  $T_0$ .

Напроти, активні обладнання включають до свого складу джерела тепла або холоду (порізно або разом). При цьому залежно від рівня  $T_s$  активна термостабілізація зі зміною температури  $T_0$  від  $T_0^{\min}$  до  $T_0^{\max}$  може бути трьох типів.

Низькотемпературна термостабілізація, коли  $T_s < T_0^{\min}$ , характеризується наявністю надлишків тепла й у напівпровідниковім приладобудуванні знаходить обмежене застосування.

Нормальна термостабілізація, коли  $T_0^{\min} < T_s < T_0^{\max}$ , відрізняється тим, що в різний час потрібно або підводити тепло, або його відводити. Цей метод знаходить найбільш широке застосування за  $T_s = 283 - 298 \text{ К}$ .

Високотемпературна термостабілізація, коли  $T_s > T_0^{\max}$ , вимагає постійного підведення тепла до шуканого об'єкта.

Через те, що для МБМ  $T_s = 283 - 298 \text{ К}$ , надалі розглядається тільки варіант нормальної термостабілізації. З урахуванням цього фактора необхідно визнати, що ТЕБ є найкращим інструментом для прецизійної термостабілізації МБМ. Будучи одночасно можливим джерелом як тепла, так і холоду, ТЕБ володіє цілим рядом технічних переваг, у тому числі малими габаритами, масою, енергоспоживанням і часом виходу на режим, простотою конструкції, високою надійністю, безшумністю під час експлуатації, відсутністю мікрофонного ефекту, незалежністю від орієнтації в просторі і т.д. Вищенаведений комплекс відмінностей для ТЕБ є зовсім тривіальним, що робить її найкращою для реалізації зазначеної мети [5].

Активна нормальна термостабілізація за допомогою ТЕБ може бути здійснена одним з наступних способів: чисто термоелектричним, коли нагрівання й охолодження забезпечується відповідною полярністю живлячої напруги ТЕБ, термоелектричним охолодженням і електропідігріванням; термоелектричним охолодженням або підігрівом з додатковим електропідігріванням).

Другий спосіб знаходить застосування за термостабілізації об'єктів у широкому діапазоні температур зі значенням  $T_s$ , близьким, але меншим  $T_0$ . З енергетичної точки зору він поступається першому способу й конструктивно складніший від нього.

Третій спосіб є комбінацією попередніх. Він призначений для термостабілізації в умовах, характерних для другого способу в разі форсування режиму нагрівання. Енергетично, порівняно з іншими способами, він менш вигідний, а конструктивно аналогічний попередньому.

Серед способів активної нормальної термостабілізації за звичайних до неї вимог оптимальним є чисто термоелектричний. Ця теза дійсна й у випадку приладів із МБМ.

Вибір ТЕБ у таких і аналогічних приладах визначається як заданим рівнем термостабілізації МБМ, так і її геометричними розмірами. У той же час у таких приладах, як правило, необхідно додатково забезпечувати високий ступінь однорідності термостабілізації по площі МБМ ( $\leq 2 \cdot 10^{-2}$  К). Настільки тверда вимога відповідно визначає конструкцію й загальну архітектуру ТЕБ. Очевидно, що ТЕБ повинна містити підвищену кількість термоелементів з відносно високим їхнім упакуванням, тобто з мінімальними відстанями між собою. Тим самим на робочій площадці ТЕБ організує велику кількість розташованих поблизу один від другого дискретних джерел холоду або тепла, що об'єктивно сприяє реалізації поставленого технічного завдання. Додаткове вирівнювання температурного поля забезпечується виготовленням робочої площадки ТЕБ з керамічного матеріалу з високою теплопровідністю, наприклад, окису берилію або нітриду алюмінію. У деяких випадках для тієї ж мети використовується мідна пластина, змонтована на робочій поверхні ТЕБ.

Необхідні точність підтримки й контроль температури МБМ здійснюються за допомогою відповідної елементної бази й апаратного забезпечення, у тому числі термодатчиком. В [4] описані результати випробувань розробленої системи термостабілізації МБМ на базі однокаскадної ТЕБ, яка забезпечила вибір  $T_s$  у діапазоні 283 - 298 К з точністю підтримки  $\pm 2.5 \cdot 10^{-3}$  К при  $T_0 = 288 - 303$  К. Ці дані цілком відповідають сформульованим вище технічним вимогам до систем термостабілізації МБМ.

## Висновки

Ця стаття не претендує на всеосяжне й детальне висвітлення всіх тих проблем, з якими стикаються розробники ІЧ-техніки при створенні систем термостабілізації МБМ. Автор відзначив тільки деякі ключові аспекти, які підлягають урахуванню в обов'язковому порядку, і планує продовжити публікації з цієї тематики.

## Література

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 фотоэлектроники. / А.М. Филачев, И.И. Таубкин, М.А. Трищенко // – М.: Физматкнига. 2010 – 128 с.
4. Система стабилизации температуры неохлаждаемой микроболометрической матрицы / А.Б. Козлов, Ю.В. Куликов, В.Г. Маляров [и др.] // Оптический журнал. – 2001. – Т.68. - №1. – С.70-73.
5. Аракелов Г.А. Состояние работ и перспективы развития термоэлектрического охлаждения для фотоэлектрических полупроводниковых приемников излучения / Г.А. Аракелов // Прикладная физика. – 2002. - №6. – С.78-84.

Надійшла до редакції 21.10.2014