

Анатичук Л.І., акад. НАН України ^{1,2}

Вихор Л.М., док. фіз.-мат. наук ¹

Маценко І.Д. ²

¹ Інститут термоелектрики НАН та МОН України,

вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,

вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58012, Україна

e-mail: anatyach@gmail.com

ФІЗИЧНІ МОДЕЛІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ІЧ ДІАПАЗОНУ СПЕКТРУ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ (Огляд)

В роботі розглянуті основні фізичні моделі оптико-електронних систем ІЧ діапазону спектру з термоелектричним охолодженням. Проаналізовані особливості і переваги цих моделей. Встановлено, що найпростішою і такою, що практично застосовується в промислових зразках ІЧ пристроїв, є модель вбудованого в металічний корпус термоелектричного модуля з фоточутливими елементами, які охолоджуються. Така модель з каскадними термоелектричними охолоджувачами (ТЕО) з матеріалів на основі Bi_2Te_3 забезпечує рівень робочих температур ІЧ пристроїв до 195 К. Показано, що розширення діапазону охолодження до температур 140 – 150 К можливе шляхом застосування для ТЕО функціонально-градієнтних матеріалів і додаткових каскадів з низькотемпературних термоелектричних матеріалів, наприклад, з матеріалів на основі BiSb . Встановлено, що енергетична ефективність ТЕО суттєво залежить від оптимізації його конструкції, яка повинна враховувати електричні і теплові опори контактів, комутаційних та ізоляційних пластин, а також вплив теплових опорів корпусу ІЧ приймача, його з'єднань з ТЕО, радіаторів і теплообмінників, які застосовуються в системі для відводу тепла від ТЕО. Отже проектування ТЕО має враховувати всі компоненти системи і вибір фізичної моделі оптико-електронної системи з ТЕО має важливе значення.

Ключові слова: оптико-електронна система, ІЧ пристрій, термоелектричний охолоджувач, фізична модель.

1. Загальні відомості про оптико-електронні системи ІЧ діапазону

Оптико-електронні системи широко застосовуються для реєстрації ІЧ випромінювання й формування ІЧ зображення в сучасній наземній і космічній апаратурі. Але провідне місце серед багатьох використань оптико-електронної техніки ІЧ діапазону займає її застосування у військовій справі. ІЧ системи використовуються для виявлення і стеження за наземними, надводними та підводними цілями, в приладах нічного бачення і теплової розвідки місцевості, в системах переднього огляду летальних апаратів, бойових машин, в міношукачах, дальномірах, в системах керування зброєю і снарядами та багатьох інших інструментах військової техніки, яка необхідна для оборони і безпеки.

Основним елементом ІЧ систем і приладів є фотоприймач, тобто приймач випромінювання з внутрішнім фотоефектом. У загальному випадку найпростішим фотоприймачем є фоточутливий елемент, розміщений в герметичному захисному корпусі з вхідним вікном із прозорого для випромінювання матеріалу. В якості фоточутливого елементу застосовуються фоторезисторні, фотодіодні, фототранзисторні й фототиристорні структури, виготовлені з напівпровідникового матеріалу, чутливого до випромінювання в робочому (для даного приладу) діапазоні спектру. Сучасні фотоприймачі, як правило, багатоеlementні, тобто містять ряд фоточутливих елементів.

Проблема полягає в тому, що для роботи фотоприймачів ІЧ діапазону необхідним є охолодження фоточутливого елементу. Щоб підвищити виявну здатність, треба заглушити власне випромінювання чутливого елементу. Це досягається охолодженням до температур, за яких шум власного випромінювання стає мізерно малим. Окрім того, охолодження маленьких чутливих елементів з малою теплоємністю унеможливає їх надто сильний нагрів під дією інтенсивного опромінення. Охолодження також необхідне для зменшення теплової генерації носіїв заряду в напівпровідниковому фоточутливому елементі. Теплові переходи носіїв конкурують із оптичними, що призводить до великого за величиною темнового шуму в неохолоджених приладах.

Робоча температура фотоприймача пов'язана з робочим діапазоном довжин хвиль ІЧ детектора й залежить від матеріалу й технології фоточутливого елемента. У фотоелементів з різних напівпровідникових матеріалів різною буде і робоча температура, яка може досягати кріогенного рівня [1]. Використовуються чотири способи охолодження:

- зрідженими газами;
- за рахунок ефекту Джоуля-Томсона;
- кріогенні машини;
- термоелектричне охолодження.

Вибір способу залежить від вимог до робочої температури приймача та від оточуючих умов. Зокрема, спосіб зріджених газів використовують в умовах лабораторних досліджень, в промисловості, медицині, але він абсолютно не підходить для військової техніки. Інші способи, навпаки, переважно розроблені для військової справи, але знаходять застосування і в інших галузях.

Для охолодження ІЧ детекторів до кріогенних температур спеціально розроблені й використовуються мікрокріогенні системи на основі газової машини Стірлінга [2], яка сполучається з фотоприймачем у єдину конструкцію. Вони забезпечують температуру охолодження фотоприймача на рівні 75 – 150 К. Це енергоефективні охолоджувачі. За холодопродуктивності в інтервалі 100 – 600 мВт їх холодильний коефіцієнт досягає величин 10^{-2} – $3 \cdot 10^{-2}$. Основний недолік таких систем – їх висока вартість. Такі механічні системи охолодження роблять оптико-електронні пристрої громіздкими, дорогими й малонадійними, що перешкоджає широкому практичному використанню ІЧ приладів.

Але не всі ІЧ пристрої потребують такого глибокого охолодження. Наприклад, середньохвильові (3 – 5 мкм) і довгохвильові (5 – 30 мкм) ІЧ детектори, які потрібні для багатьох важливих практичних застосувань, як правило, працюють без кріоохолодження [1]. Наукові дослідження показали, що достатньо високі характеристики сенсорів середньо- і довгохвильового ІЧ діапазону забезпечуються за робочих температур фотоприймачів суттєво вищих від кріогенних [3, 4]. Ці температури досягаються за допомогою термоелектричного

оохолодження [5, 6], яке в цьому випадку є раціональнішим порівняно з машинним способом одержання холоду.

Термоелектричне оохолодження достатньо широко використовується для забезпечення необхідної робочої температури ІЧ детекторів [1]. Робочі температури ІЧ приймачів до 190 К досягаються за допомогою термоелектричних оохолоджувачів [1, 5, 6], які не мають рухомих частин, компактні, надійні, мають великий ресурс роботи. Робоча температура таких пристроїв пов'язана з робочим діапазоном ІЧ детектора і залежить від матеріалу і технології виготовлення фоточутливого елемента. Найбільш поширеними елементами для ІЧ детекторів є фоторезистори на основі PbS і $PbSe$, фотодіоди із $InGaAs$, фотодіоди і фоторезистори на основі $InSb$ і $HgCdTe$. Сучасними матеріалами для ІЧ приймачів є, наприклад, матеріали з квантовими ямами $GaAs/AlGaAs$ [7] і надгратки $InAs/GaSb$ [8], які слугують альтернативою до $HgCdTe$, адже використання токсичних елементів Hg і Cd в електронних пристроях обмежується директивами Євросоюзу. Робочі температури фоточутливих елементів з усіх цих матеріалів сумісні з діапазоном температур, який забезпечується термоелектричним оохолодженням. Для стабілізації температури і неглибокого оохолодження ІЧ детекторів використовуються однокаскадні термоелектричні модулі. Двокаскадні модулі застосовуються для ІЧ детекторів з робочою температурою 230 К, трикаскадні оохолоджують до робочої температури 210 К і чотирикаскадні – до 195 К. Промисловим виробником ІЧ приймачів на основі $HgCdTe$ з вбудованими 2, 3 і 4-каскадними термоелектричними модулями є європейська компанія Vigo Photonics [6].

2. Основні фізичні моделі оптико-електронних систем з термоелектричним оохолодженням

Розглянемо фізичні моделі оптико-електронних систем з термоелектричним оохолодженням. Найпростіша модель містить фотоприймальний пристрій, розміщений на теплопоглинальній грані термоелектричного оохолоджуючого модуля, які, зазвичай, монтуються в герметичний корпус, основа якого перебуває в тепловому контакті з теплообмінником.

Така найпростіша модель була використана в період 1973 – 1975 рр. для ІЧ техніки авіаційного базування [9]. В корпус приладу з об'єктивом, який прокачується в заданому тілесному куті, був встановлений ІЧ приймач з фоточутливим елементом на основі $PbSe$ і однокаскадним термоелектричним оохолоджувачем (ТЕО). Фізична модель приладу показана на рис. 1.

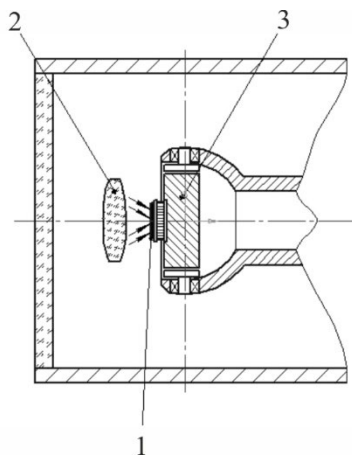


Рис. 1. Найпростіша модель ІЧ пристрою з ТЕО [9].
1 – ІЧ приймач з ТЕО, 2 – об'єктив, 3 – теплоприймаючий цоколь.

Охолоджувач споживав потужність менше 0.6 Вт і знижував температуру чутливого елемента на 35 – 45 К. Забезпечувалася необхідна чутливість і теплостійкість приладу як в режимі бар'яжування, так і за умов пікового значення температури набігаючого на прилад потоку повітря. Прилад застосовувався в бувшому СРСР до 90-х років.

В найпростішій моделі оптико-електронних систем часто використовуються каскадні охолоджувачі. В [10] описано технологію розробки 4-каскадного ТЕО для охолодження ІЧ приймача на основі 2D фокальної матриці чутливих елементів з $HgCdTe$ до температури 200 К. Були використані матеріали на основі Bi_2Te_3 з добротністю $2.95 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ у n -типу провідності і $2.9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ у p -типу. Були виготовлені експериментальні зразки охолоджувача, який містив в каскадах відповідно 2-5-12-31 термопар з кристалами розміром $1.5 \times 1.5 \times 1.8 \text{ мм}$. За температури теплообмінника 333 К середнє значення максимального перепаду температури становило 147 К. В робочому режимі з холодопродуктивністю 100 мВт ТЕО забезпечував охолодження до 200 К. Середнє значення споживаної потужності становило 10.5 Вт, а холодильний коефіцієнт в робочому режимі досягав 0.0093.

В [11] компанією Marlow Industries запропоновано фізичну модель ТЕО, інтегрованого в корпус матриці ІЧ детекторів для стабілізації її температури. Термоелектрична стабілізація температури часто використовується в системах інфрачервоного зображення, що не потребують охолодження, через чутливість до температури матриці детекторів. Ці інфрачервоні системи працюють в умовах зміни температури довкілля. ТЕО використовується для нагрівання чи охолодження масиву детекторів до оптимальної температури.

Масиви інфрачервоних детекторів мають працювати у герметично закритому корпусі. Зазвичай ТЕО монтується у металевий корпус, а масив детекторів монтується безпосередньо зверху ТЕО. Металевий корпус має кілька вхідних/вихідних контактів, через які сигнал, отриманий від детектора, передається на електронні компоненти системи. Вікно кріпиться до верхньої частини корпусу. При такому підході ТЕО, що має дві керамічні пластини, впаюється в корпус, або заливається епоксидною смолою. Виводи від ТЕО кріпляться до контактів живлення на корпусі.

Концепція вбудованого ТЕО полегшує спосіб монтажу. Замість металевого корпусу ТЕО вбудовується в корпус, виготовлений із багатошарової кераміки (рис. 2). В основі корпусу розташовуються майданчики металізації, які дозволяють припаювати p - та n -елементи безпосередньо до основи корпусу. Дроти живлення ТЕО кріпляться до штирів на зовнішній стороні корпусу металізованими перехідними отворами та доріжками, що виключають додатковий процес паяння проводів.

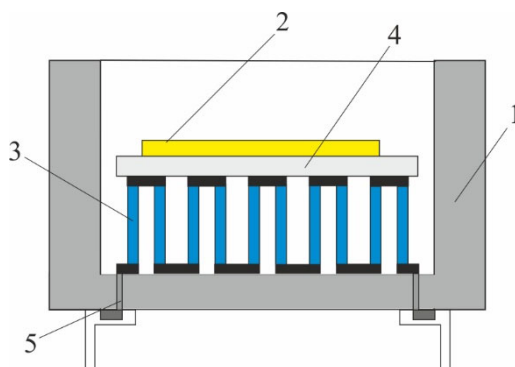


Рис. 2. Модель ТЕО, вбудованого у керамічний корпус [11]. 1 – керамічний корпус, 2 – об'єкт охолодження, 3 – термоелементи, 4 – керамічна пластинка, 5 – металізовані отвори для дротів живлення.

Таким чином, концепція вбудованого ТЕО передбачає впаювання окремих термоелектричних елементів безпосередньо в основу керамічного корпусу з вмонтованими електричними виводами як для ТЕО, так і для масиву детекторів. Інтегрування охолоджувача безпосередньо в корпус дає багато переваг. Це зменшує кількість складових частин у системі, кількість операцій паяння і з'єднання, усуває операцію монтажу ТЕО для виробників детекторів.

В [11] надається огляд теплових, електричних та габаритних вимог, необхідних для ефективної розробки вбудованого охолоджувача для інфрачервоної системи, що не охолоджується. Вбудований ТЕО повинен проєктуватися з урахуванням робочих параметрів, таких як потужність, перепад температур, габарити та надійність. Наведено приклад характеристик вбудованого ТЕО для охолодження до 25 °С масиву детекторів з активним тепловиділенням 0.5 Вт за температури оточуючого середовища 75 °С і теплового опору радіатора 2 °С/Вт. Потужність ТЕО в такому режимі становить 1.89 Вт.

В роботі [12] запропонована фізична модель каскадного ТЕО з окремим живленням каскадів (рис. 3). Таку модель доцільно використовувати для так званих площинних мікроохолоджувачів, які розташовуються в одній площині з мініатюрним оптико-електронним пристроєм, який охолоджується. Для виготовлення таких ТЕО, як правило, використовуються спеціально розроблені технології мікроелектроніки, а саме MEMS технології. Особливістю фізичної моделі є те, що теплове узгодження в каскадах здійснюється за рахунок співвідношення площ каскадів і довжини термоелементів в каскадах.

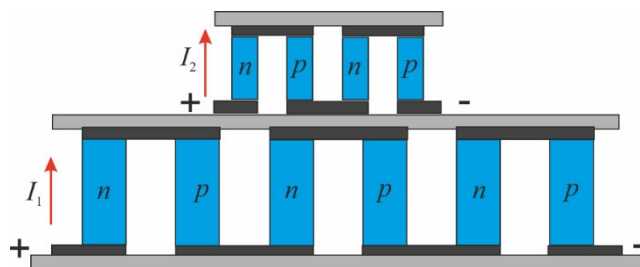


Рис. 3. Модель ТЕО з окремим живленням каскадів.

В [12] запропоновано принцип розрахунку максимального перепаду температури для заданої холодопродуктивності двокаскадного ТЕО з окремим живленням каскадів. Наведено приклад проєктування і розрахунку характеристик площинного двокаскадного ТЕО для ІЧ лазера з тепловиділенням 10 мВт. Також обговорюється проблема теплових втрат, як найбільш важливого механізму погіршення характеристик мініатюрних ТЕО. Зокрема для зменшення теплових втрат, зумовлених наявністю міжкаскадного теплового опору і відведенням тепла по дротах, замість моделі ТЕО, показаної на рис. 3, запропонована фізична модель з паралельним живленням каскадів, конфігурацію якої ілюструє рис. 4. В такій моделі відсутня міжкаскадна ізоляційна пластина і використовується лише одна пара електричних дротів, але обидва каскади можуть працювати за оптимального струму внаслідок адаптації площ каскадів до висоти термоелектричних віток.

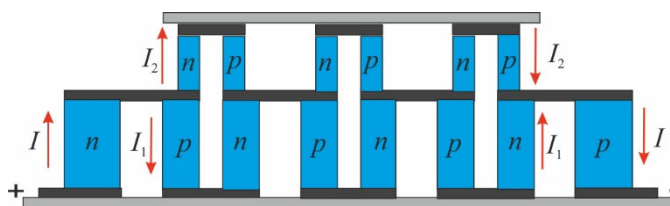


Рис. 4. Модель ТЕО з паралельним живленням каскадів.

В роботі [13] розглядається тривимірна (3D) фізична модель системи, яка складається з оптико-електронного об'єкта, масиву термоелементів з кераміками з холодної та гарячої сторін і тепловідводу (рис. 5).

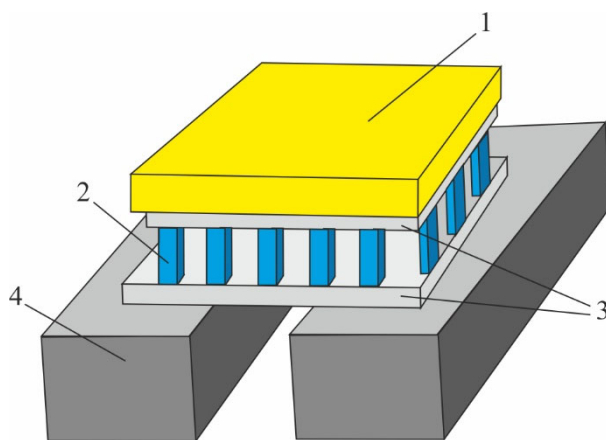


Рис. 5. Структура 3D фізичної моделі системи термоелектричного охолодження оптико-електронного об'єкта. 1 – оптико-електронний об'єкт, 2 – термоелементи, 3 – кераміка, 4 – тепловідвід з отвором.

Одновимірні моделі не дають інформації в напрямках перпендикулярних термоелементам. Тому вони не підходять для систем з тепловідводами з нерівномірним розподілом температури по поверхні, або у випадку неповного контакту кераміки з тепловідводом. В таких випадках застосовуються 3D моделі. В [13] модель враховує перехідні та тривимірні ефекти, залежність характеристик матеріалів моделі від температури, а також конвективний та радіаційний теплообмін між кераміками і використовується для визначення наступних величин: часу і електричної потужності ТЕО для досягнення необхідної температури об'єкта, потужності в стаціонарному режимі для підтримки заданої температури, максимальної потужності ТЕО, за якої досягається максимальна різниця температур між кераміками, температурних градієнтів на об'єкті та інших компонентах системи. Для комп'ютерного моделювання застосовується метод кінцевих елементів з циклом керування зі зворотнім зв'язком для кореляції потужності живлення ТЕО для того, щоб регулювати температуру об'єкта. Описано приклад застосування моделі для розрахунку параметрів системи термоелектричної стабілізації температури ІЧ детектора, який використовується в неохолоджувальних камерах нічного бачення з радіатором, який не повністю дотикається гарячої кераміки ТЕО із-за великого отвору для електричних дрітків.

Серія робіт [14-18] присвячена проблемам охолодження оптико-електронних пристроїв. Як джерела тепла оптико-електронні компоненти можна поділити на три групи. Пристрої першої групи мають малу потужність тепловиділень і малі габарити. Традиційні конфігурації ТЕО успішно вирішують проблему їхнього терморегулювання.

До другої групи належать прилади оптоелектроніки з інтенсивним тепловиділенням (потужні діоди, інфрачервоні лазери тощо). Для забезпечення їхньої надійної роботи потрібні мініатюрні ТЕО з великою холодопродуктивністю. Відомо, що зменшення довжини термоелементів призводить до збільшення холодопродуктивності ТЕО. Однак існують фізичні обмеження, що гальмують мініатюризацію ТЕО. Такими обмеженнями є незворотні втрати зумовлені електричним контактним опором, а також електричним та тепловим опорами комутацій та керамічних пластин ТЕО. Тому фізична модель ТЕО (рис. 6) для таких оптико-електронних приладів має враховувати ці фактори, які в принципі не можуть бути усунені.

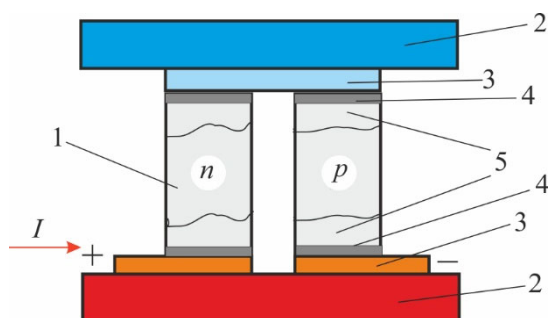


Рис. 6. Фізична модель термоелектричного мініатюрного перетворювача.

1 – термоелектричний матеріал, 2 – ізоляційна керамічна пластина,
3 – комутаційна пластина, 4 – антидифузійний шар металу,
5 – зона контакту.

Якість електричних контактів є найважливішим чинником, який суттєво впливає на роботу каскадних ТЕО. В [18] проаналізовано характеристики низькотемпературних каскадних ТЕО від величини електричного контактного опору. Розглядаються дві ключові характеристики: максимальний холодильний коефіцієнт при заданій різниці температур і максимальне охолодження, яке досягається для ТЕО з фіксованою конфігурацією. Для підтримки холодильного коефіцієнта на прийнятному рівні необхідно забезпечити контактний опір r_c в діапазоні від 10^{-7} Ом·см² до 10^{-6} Ом·см², тоді як при більшому опорі холодильний коефіцієнт ТЕО різко знижується, особливо для ТЕО з термоелектричними вітками висотою 0.5 мм і менше. Проаналізовано також незворотні втрати, спричинені електричним опором комутаційних металевих пластин, та визначено їх товщини, які повинні забезпечити прийнятно низький рівень опору для різних каскадних ТЕО з типовими розмірами термоелектричних віток та відстанню між ними.

У [17] досліджено вплив теплових властивостей ізоляційних керамічних пластин на роботу каскадних ТЕО. Розроблено математичну модель для аналітичного розрахунку термічного опору міжкаскадних керамік, пов'язаного з тривимірною передачею тепла з каскаду меншої площі у більший каскад. Модель використовується для визначення максимального перепаду температур для стандартних багатокаскадних ТЕО з різними кераміками. Розглянуто ТЕО із довжиною термоелектричних віток в діапазоні від 0.3 мм до 2 мм. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів та сформульовано рекомендації щодо вибору відповідного матеріалу для ізоляційних пластин.

До третьої групи відноситься планарні оптоелектронні пристрої великих розмірів, наприклад, багатоселементні матриці ІЧ приймачів та формувачів зображення, прилади з зарядовим зв'язком (ПЗЗ), тощо. Це, як правило, розподілені джерела тепла малої інтенсивності, для яких потрібні низькі робочі температури, зазвичай 200 К і нижче. Тут постає проблема: як забезпечити необхідне глибоке охолодження за умов мінімальної холодопродуктивності. Як правило, у верхньому каскаді зазвичай достатньо кількох термопар. Отже, площа його поверхні мала порівняно з об'єктом, який охолоджується. В результаті важко виконати вимоги однорідності температури та механічної міцності. Необхідний низькотемпературний багатокаскадний ТЕО, в якому збільшені габарити холодного каскаду поєднуються з мінімальною потужністю та механічною міцністю. Традиційні пірамідальні каскади тут не підходять. Потрібні спеціальні низькотемпературні каскадні ТЕО зі збільшеними габаритами холодної поверхні, але з невеликою холодопродуктивністю.

Для вирішення проблеми використовують дві фізичні моделі ТЕО. Перша модель, традиційна, полягає в рівномірному розподілі термоелектричних віток у холодних каскадах для збільшення площі. Ця модель застосовується тільки в тому випадку, коли загальна необхідна кількість термоелектричних віток у холодному каскаді є достатньою, щоб витримати прикладені механічні та термічні навантаження. Друга модель – це використання збільшеної кількості віток у холодних каскадах при їх змішаному послідовно-паралельному з'єднанні. Таким чином, дві або більше віток розташовуються паралельно, утворюючи окрему термоелектричну вітку, висота якої збільшується пропорційно для збереження оптимальної геометрії віток. Таким чином можна значно збільшити кількість віток та отримати ТЕО з практично однаковими площами каскадів. Ця модель має переваги підвищеної густини упаковки віток, а значить, підвищеної механічної міцності. У роботах [15, 16] наведено результати тестування таких модулів. Незважаючи на сильно збільшені розміри верхніх каскадів, ці ТЕО забезпечують значення $\Delta T_{\max}$ на рівні найкращих пірамідних модулів.

У [15, 16] розглядається фізична модель оптико-електронного пристрою з ТЕО, які розміщені в малогабаритному металевому корпусі, власні теплові характеристики якого впливають на роботу ТЕО. Корпус із ковару має значний тепловий опір і впливає на температуру гарячої поверхні ТЕО. Окрім того, через кришку корпусу надходить додаткове тепло. В результаті фактичні характеристики ТЕО можуть значно відрізнятись від очікуваних.

На рис. 7 показана фізична модель пристрою з термоелектричним охолодженням. На холодній поверхні ТЕО монтується підкладка з оптико-електронним елементом нагорі. Конструкція розташована всередині металевого корпусу на його цокольній пластині, яка закріплена на радіаторі. Уся система закрита кришкою, яка термічно пов'язана із цоколем.

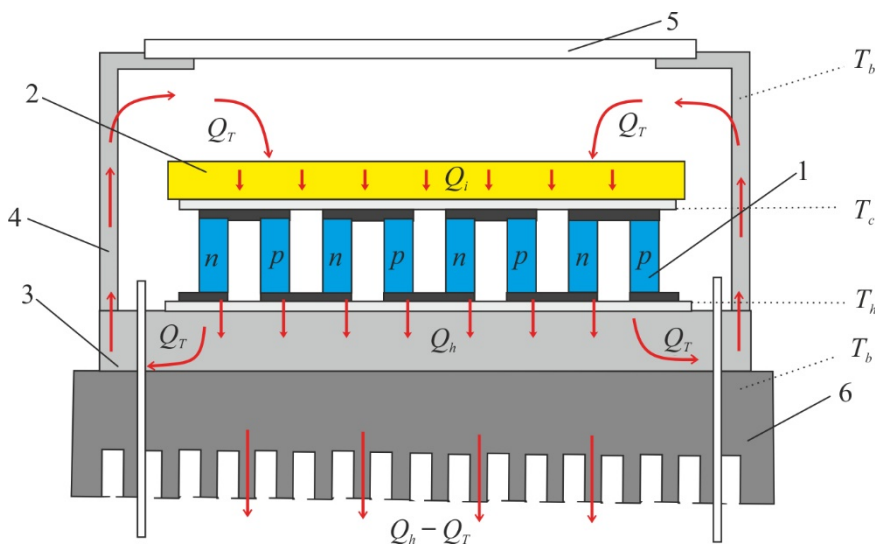


Рис. 7. Фізична модель оптико-електронного пристрою з ТЕО в металевому корпусі [16].
 1 – ТЕО, 2 – оптико-електронний елемент, 3 – цокольна пластина корпусу, 4 – кришка корпусу,
 5 – вікно, 6 – основа теплообмінника.

Стаціонарна теплова модель системи описується наступними рівняннями:

$$Q_c = A(\alpha T_c i - 0.5 i^2 (\rho + 2r_c / L))L - \frac{\kappa}{L}(T_h - T_c), \quad (2.1)$$

$$Q_h = A(\alpha T_c i + 0.5 i^2 (\rho + 2r_c / L))L - \frac{\kappa}{L}(T_h - T_c), \quad (2.2)$$

$$Q_c = Q_i + Q_T, \quad (2.3)$$

$$T_h - T_b = R_h Q_h, \quad (2.4)$$

$$T_b - T_a = R_{hs} (Q_h - Q_T), \quad (2.5)$$

де A – сумарна площа поперечного перерізу всіх термоелектричних віток, L – довжина термоелектричних віток, α , ρ , κ – коефіцієнти термоЕРС, питомого опору і теплопровідності термоелектричного матеріалу, r_c – величина контактного опору, i – густина струму живлення ТЕО, Q_c – холодопродуктивність охолоджувача, Q_h – потужність тепла на тепловиділяючій поверхні ТЕО, Q_i – тепло, що генерується оптико-електронним об'єктом, T_b – температура основи радіатора, T_a – температура оточуючого середовища, R_h і R_{hs} – тепловий опір цоколя і радіатора. Q_T – тепло, що поступає на холодну поверхню ТЕО з навколишнього оточення, яке в першому наближенні можна обрахувати за формулою

$$Q_T = K_c (T_b - T_c), \quad (2.6)$$

де K_c – коефіцієнт сумарного ефекту конвекції, випромінювання і теплопровідності дротів, що під'єднані до оптико-електронного об'єкта. Для відомого Q_i і заданого значення густини струму i система рівнянь (2.1) – (2.6) уможливіє знаходження невідомих температур T_c , T_h , T_b і потужностей тепла Q_c , Q_h , Q_T . Але система розв'язується, якщо теплові параметри корпусу, а саме K_c , R_h і R_{hs} – відомі величини, які доцільно визначити експериментальним шляхом.

В роботі [16] показано вплив теплового опору R_h цоколя на характеристики ТЕО з різною довжиною термоелектричних віток. Втрати максимального перепаду температури становлять 2.4 К для ТЕО з довжиною віток 1.5 мм, а для ТЕО з вітками 0.5 мм втрати зростають до 8 К. Таким чином, інтуїтивне прагнення використовувати ТЕО з більшою холодопродуктивністю для досягнення кращого охолодження може призвести до зворотного результату. З іншого боку, може виявитися, що ТЕО з надмірно довгими гілками не володіє достатньою охолоджувальною здатністю для підтримки необхідного значення температури охолодження T_c . Тому оптимальна конфігурація ТЕО має ґрунтуватися на аналізі всіх компонентів системи з урахуванням їхнього теплового з'єднання, а вибір коректної фізичної моделі оптико-електронної систем з ТЕО відіграє суттєве значення у проектуванні охолоджувача.

Фізична модель, показана на рис. 7, використана в роботі [19] для розробки і дослідження конструкції ІЧ приймача з термоелектричним охолодженням для роботи в спектральному діапазоні 3 – 5 мкм. Для охолодження до 200 К фоточутливого елементу з $Cd_{1-x}Hg_xTe$ використано 3-каскадний охолоджувач. Фоточутливий елемент на підкладці з лейкосапфіру приклеюється до теплопоглинальної поверхні ТЕО. Кришка, що герметизує об'єм фотоприймача, приварюється до цоколя з ковару з герметичними склометалевими терміналами для фотоелементу і ТЕО. До складу кришки входить вхідне вікно. Для поглинання газів, що залишилися після вакуумування і герметизації фотоприймача в конструкції використовується газопоглинач (геттер), який дозволяє підтримувати в робочому об'ємі фотоприймача тиск залишкових газів нижче 10^{-3} Па протягом всього терміну служби. Вимірювалися фотоелектричні параметри фотоприймача. Встановлено, що значення питомої виявної здатності фотоприймача при температурі ~ 200 К на довжині хвилі $\lambda = 4.5$ мкм дорівнює $D^*_{\lambda, \max} \geq 1 \cdot 10^{10}$ см Гц^{1/2}Вт⁻¹, час виходу на робочий режим – 70 с, струм живлення ТЕО – 1 А, споживана потужність ТЕО – 5.5 – 6.0 Вт, холодопродуктивність 120 – 100 мВт, розміри площі, що охолоджується – 4×7 мм². Встановлено також, що після проведення випробувань на віброміцність, стійкість до ударів, теплостійкість та холодостійкість фотоприймач зберігав основні параметри в межах 3000 годин.

3. Екрани в фізичних моделях ТЕО для ІЧ пристроїв

Для зменшення теплового навантаження на самий холодний каскад ТЕО ще в 1980 р. в роботі [20] запропоновано використати екран. Наведений в [20] приклад фізичної моделі з екраном в системі термоелектричного охолодження ІЧ детектора показаний на рис. 8. Виготовлений з металу з високою теплопровідністю екран легко охолоджується каскадом ТЕО, до якого він кріпиться. Основна його функція – це екранування детектора і верхніх холодних каскадів ТЕО від потоку тепла, що надходить за рахунок конвекції і випромінювання від внутрішніх стінок корпусу ІЧ пристрою, а також від гарячої поверхні основи ТЕО. Ця фізична модель окрім екрану має ще одну особливість, а саме дрони від детектора перед виходом з корпусу пристрою під'єднуються спочатку до поверхні одного з нижніх каскадів. Це зменшує складову теплового навантаження на верхній каскад ТЕО, зумовлену теплопровідністю дротів.

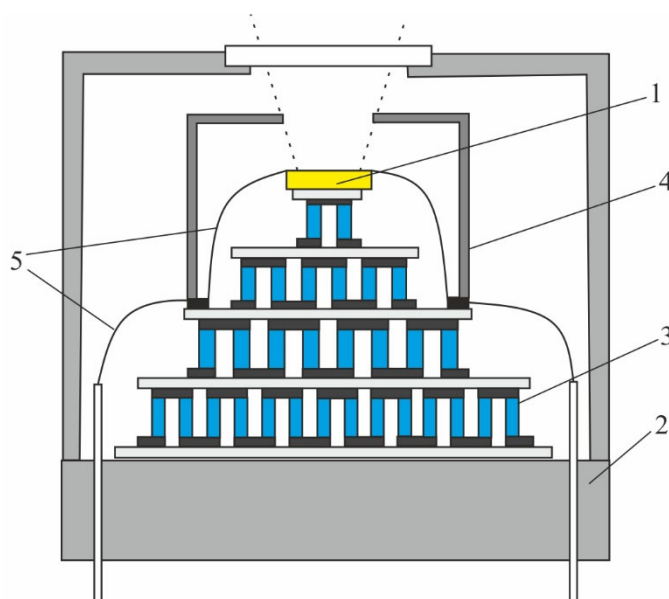


Рис. 8. Фізична модель оптико-електронного пристрою з 4-каскадним ТЕО з екраном на другому каскаді [20]. 1 – ІЧ детектор, 2 – корпус пристрою, 3 – ТЕО, 4 – екран, 5 – проводи ІЧ детектора.

Фізичні моделі систем термоелектричного охолодження ІЧ приймачів, які містять теплові екрани, захищені патентами [21, 22]. В [21] запропонована система з екранами на кожному каскаді ТЕО. Екрани мають чашкоподібну форму, кріпляться до міжкаскадних пластин і вкладені один в один, причому кожен тепловий екран охоплює всі послідовні менші екрани і каскади. Кожен екран має отвір для забезпечення оптичного шляху до приймача оптичного випромінювання, який встановлений на найхолоднішому каскаді. Частина теплової енергії поглинається кожним екраном і видаляється через нижній каскад охолоджувача. Екрани виготовляються з матеріалу з високою теплопровідністю, такого як срібло, мідь, алюміній і поліруються, щоб мінімізувати поглинання тепла. Відмічається, що використання екранів на всіх каскадах забезпечує максимальне охолодження. Однак приблизно 90 % максимальної потужності охолодження досягається за допомогою лише двох екранів, встановлених на нижній і верхній міжкаскадних пластинках, з усуненням всіх проміжних екранів. У цій фізичній моделі пропонується також встановити оптичне вікно на зовнішньому екрані, який під'єднаний до найгорячішої поверхні, а саме до основи охолоджувача. Таке розташування позбавляє від необхідності електричного обігріву вікна, щоб мінімізувати утворення роси на вікні.

В патенті [22] описана фізична модель системи охолодження ІЧ детекторів з екраном, який встановлюється в основу корпусу детектора і, відповідно, не охолоджується. Але він оточує ТЕО і детектор (рис. 9).

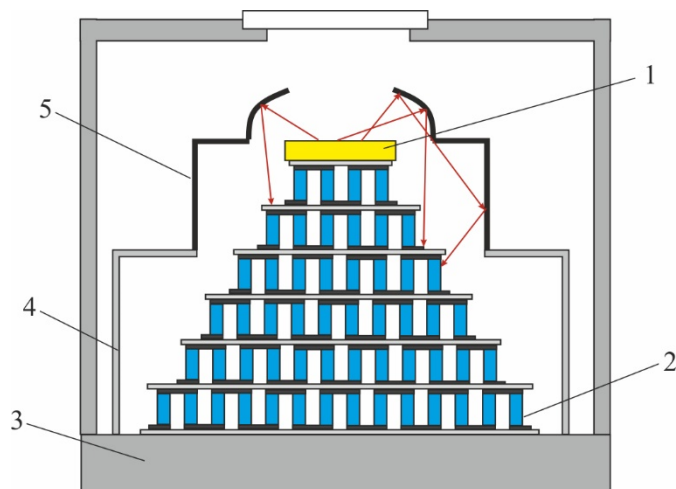


Рис. 9. Фізична модель ТЕО з екраном для ІЧ детекторів [22]. 1 – ІЧ детектор, 2 – каскадний ТЕО, 3 – корпус, 4 – утримувач екрану, 5 – екран з вигнутою поверхнею.

Екран має вигнуту відбиваючу поверхню і відбиваючі бічні стінки, які поглинають і усувають теплову енергію випромінювання. Це зменшує теплове навантаження на найхолодніший каскад ТЕО.

4. Сучасні ідеї у фізичних моделях оптико-електронних систем з термоелектричним охолодженням

Впровадження сучасних передових технологій для ІЧ детекторів уможливорює зміщення робочої температури ІЧ приймача із криогенної області в діапазон 150 – 200 К [4, 23 – 25]. При цьому його характеристики не погіршуються. Такі температури можуть досягатися термоелектричним охолодженням шляхом використання нових сучасних підходів у фізичних моделях оптико-електронних пристроїв з каскадними термоелектричними охолоджувачами.

Одним з таких підходів є використання функціонально-градієнтних термоелектричних матеріалів (ФГТМ) для віток термоелементів [26]. Це неоднорідні матеріали з оптимальним розподілом основних термоелектричних властивостей: термоЕРС, електропровідності і теплопровідності вздовж висоти термоелектричної вітки.

Другий підхід – це застосування матеріалів з підвищеною ефективністю в області низьких температур. Прикладом таких матеріалів можуть бути сплави *Bi-Sb* *n*-типу провідності. Ці сплави мають високу термоелектричну добротність за температур, нижчих 160 К, яка до того ж зростає в магнітному полі. Застосування оптимально неоднорідного магнітного поля додатково підвищує ефективність охолодження модулів з таких матеріалів [26].

В [27] наведені результати розрахунку енергетичних параметрів низькотемпературних каскадних термоелектричних модулів, що забезпечують охолодження до температури, нижчої 200 К за температури тепловиділяючої поверхні 300 К (таблиця 1). Максимальний холодильний коефіцієнт розраховувався з врахуванням вищевказаних підходів.

Таблиця 1

Оціночні значення енергетичних параметрів низькотемпературних ТЕО

Температура охолодження T_c , К	Кількість каскадів	Холодильний коефіцієнт, $\epsilon_{\max}$	Потужність за теплового навантаження $Q_0 = 10$ мВт, W , Вт	Матеріал ТЕО
200	3	$4 \cdot 10^{-2}$	0.25	ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i>
190	3	$2.5 \cdot 10^{-2}$	0.4	ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i>
180	4	$1.2 \cdot 10^{-2}$	0.83	ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i>
170	4	$5 \cdot 10^{-3}$	2.0	ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i>
160	4	$2 \cdot 10^{-3}$	5.0	ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i>
150	5	$8 \cdot 10^{-4}$	12.0	4 каскади – ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i> , 1 верхній каскад – <i>n-BiSb</i> у неоднорідному магнітному полі, <i>p-BiTe</i> ФГТМ
140	6	$3 \cdot 10^{-4}$	33.5	4 каскади – ФГТМ на основі <i>Bi-Te</i> , 2 верхніх каскади – <i>n-BiSb</i> у неоднорідному магнітному полі, <i>p-BiTe</i> ФГТМ

Було встановлено, що для досягнення температур 160 – 200 К досить використовувати три-, чотири-каскадні модулі, термоелементи яких виконані із ФГТМ на основі *Bi-Te*. Такі ФГТМ можуть бути утворені шляхом формування відповідного неоднорідного розподілу домішок по матеріалу або зміни його складу. Для охолодження до температур 150 – 140 К чотири-каскадний модуль із ФГТМ на основі *Bi-Te* повинен бути доповнений низькотемпературними каскадами. У цих каскадах доцільно застосовувати для віток *n*-типу провідності сплави на основі *Bi-Sb*. За кімнатної температури добротність Z в *n-BiSb* становить приблизно $0.8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, за низьких температур Z зростає, досягаючи $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ за 100 К. Магнітне поле додатково підвищує це значення до $8 - 9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ [26]. У цьому випадку ФГТМ *n*-типу провідності на основі *Bi-Sb*, тобто матеріал із змінними основними термоелектричними характеристиками α , σ , κ , можна одержати за допомогою оптимальної зміни індукції магнітного поля, у якому розміщується цей матеріал. Дотепер в арсеналі термоелектрики немає матеріалів *p*-типу провідності з аналогічною залежністю добротності від магнітного поля. Тому для віток *p*-типу можна використовувати ФГТМ на основі традиційного складу *Bi-Te*.

Результати цих досліджень свідчать про те, що практичне використання сучасних технологій у виготовленні модулів дає можливість розширити температурний діапазон термоелектричного способу охолодження ІЧ приймачів і може забезпечити їх робочі температури до 150 – 140 К з достатньою енергетичною ефективністю.

В роботі [28] показано, що так звані SWaP-C (розмір, вага, потужність і ціна) характеристики термоелектричних систем глибокого охолодження ІЧ сенсорів можна суттєво покращити шляхом використання ФГТМ термоелементів. На основі порівняння результатів експериментальних досліджень однорідного і ФГТМ термоелементів прогнозується в одно-каскадній конструкції ТЕО підвищення максимального перепаду температур на 35 %, холодильного коефіцієнта на 150 % і холодопродуктивності на 200 %, а в багатокаскадних конструкціях очікується максимальний перепад температур більший за 220 К при оптимізованих SWaP-C.

Приклад розробки і виготовлення прототипу сенсора середньохвильового ІЧ діапазону на основі фотодіода із $PbTe$ легованого In з термоелектричним охолодженням описано в роботах [29, 30]. Перевагою фотодіодів із $PbTe$ є можливість їх використання з охолодженням до температур значно вищих за кріогенний рівень, а саме до 180 К. Оптимальним є діапазон температур 140 – 150 К. Тому для них можна застосовувати багатокаскадні охолоджувачі. Фізична модель прототипу системи фотодіода з ТЕО показана на рис. 10. ТЕО складається з двох частин. Низькотемпературна частина – це двокаскадний модуль, який забезпечує робочу температуру охолодження фотодіода на рівень 140 – 150 К від температури 180 – 200 К. Високотемпературна частина – це 4-хкаскадний модуль з температурою охолодження до 180 К від 300 К.

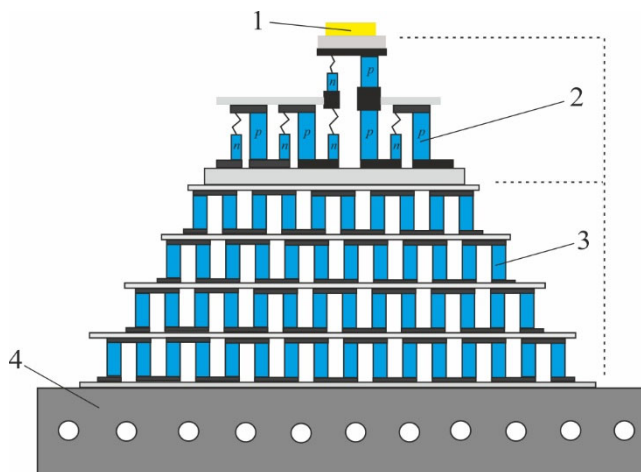


Рис. 10. Фізична модель прототипу системи фотодіода з багато-каскадним ТЕО [30].

1 – сенсор ІЧ діапазону на основі фотодіода з $PbTe$, легованого In ,
2 – низькотемпературний двокаскадний модуль, 3 – 4-каскадний модуль, 4 – теплообмінник.

Для низькотемпературного модуля використані екструдовані кристали $Bi_{0.91}Sb_{0.09}$ n -типу, які демонструють високу добротність $Z \approx 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ в діапазоні температур 80 – 200 К [31]. Добротність сплавів $Bi-Sb$ p -типу значно нижча [32] і вони не можуть використовуватися для термоелектричних охолоджувачів у цьому діапазоні температур. Тому використовуються тверді розчини p -типу $(Bi, Sb)_2Te_3$ оптимізованого складу.

Через велику різницю в тепловому розширенні p - і n -віток жорстка конструкція двокаскадного низькотемпературного модуля призвела б до руйнування пристрою. Великі механічні напруги n -віток усуваються їх гнучким з'єднанням з p -вітками. Вітки термопар мають різну довжину та перерізи, які були оптимізовані для досягнення максимальної добротності Z термопар за робочих температур кожного каскаду. Вітки обох типів провідності жорстко припаяні до гарячої сторони кожного каскаду модуля. Холодна сторона віток p -типу також жорстко припаяна, а n -вітки з'єднані з основою через демпфер механічних напруг, виконаний у

вигляді гнучкої мідної шини. Перший каскад ТЕ модуля складається з чотирьох термопар із розмірами віток: n -вітки: $0.7 \text{ мм} \times 1.4 \text{ мм} \times 2.7 \text{ мм}$; p -вітки: $2.4 \text{ мм} \times 1.4 \text{ мм} \times 3.3 \text{ мм}$. Другий каскад складається з однієї термопари з розмірами віток: n -вітка: $0.7 \text{ мм} \times 1.4 \text{ мм} \times 2.7 \text{ мм}$; p -вітка: $1.8 \text{ мм} \times 1.4 \text{ мм} \times 3.3 \text{ мм}$.

У цій конструкції довжина і переріз віток були оптимізовані для отримання теплового та електричного узгодження віток у модулі та досягнення максимального холодильного коефіцієнта пристрою. За умови гарячої температури низькотемпературного модуля $T_{\text{hot}} = 180 - 200 \text{ К}$ досягаються максимальна різниця температур $\Delta T_{\text{max}} = 45 - 50 \text{ К}$ і максимальна холодопродуктивність $Q_{\text{max}} = 85 - 90 \text{ мВт}$. Споживана електрична потужність такого модуля становить $1 - 1.3 \text{ Вт}$.

Для високотемпературної частини ТЕО використано стандартний 4-каскадний модуль, виконаний з матеріалів на основі Bi_2Te_3 . Модуль розрахований для забезпечення температури охолодження в діапазоні $180 - 200 \text{ К}$ з холодопродуктивністю $1 - 1.3 \text{ Вт}$. За цих умов споживана потужність 4-каскадного модуля становить $60 - 90 \text{ Вт}$.

Таким чином, в загальному така 6-каскадна структура ТЕО може забезпечити охолодження ІЧ детектора на основі PbTe , тепловиділення якого не перевищує 10 мВт , до температури $140 - 150 \text{ К}$. При цьому система повинна бути оснащена теплообмінником з потужністю тепловиділення на рівні $\sim 100 \text{ Вт}$. В роботі [30] пропонується забезпечити ефективність теплообмінника шляхом використання в конструкції теплової труби.

Відвід тепла від ТЕО для оптико-електронних пристроїв відіграє важливу роль. Тому дослідження спрямовують в напрямку вдосконалення і розробки нових систем тепловідводу для каскадних ТЕО. Зокрема поширеними є комбіновані системи охолодження оптико-електронної апаратури, до складу яких входять термоелектричні охолоджувачі і теплові труби. В роботі [9] описано варіант такої системи, розроблений для авіаційної ІЧ техніки. Фізична модель системи показана на рис. 11.

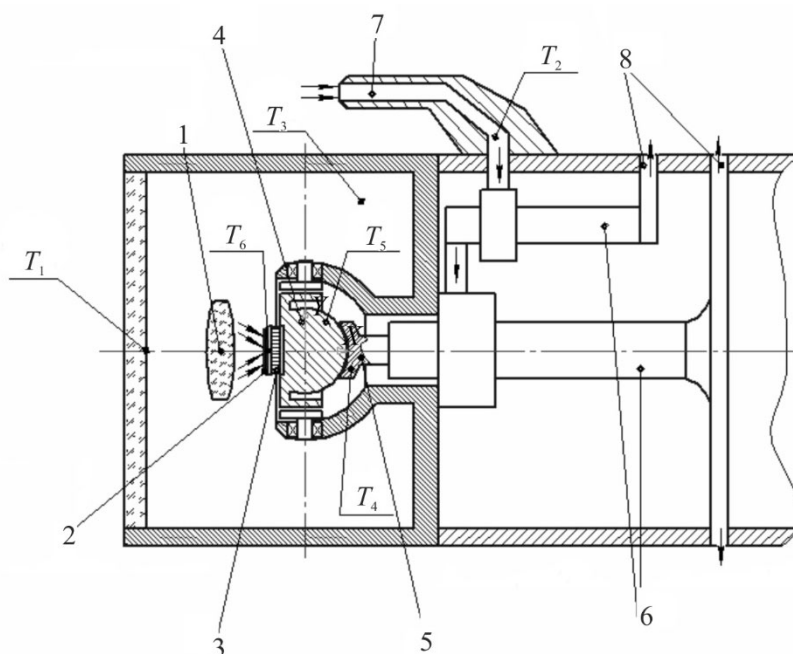


Рис. 11. Фізична модель системи охолодження ІЧ приймача на основі ТЕО і теплових труб [9].

1 – об'єкт, 2 – ІЧ приймач, 3 – ТЕО, 4 – цоколь, 5 – стержень, що відводить тепло,
6 – система вихрових труб, 7 – забірник повітря, 8 – виходи для відпрацьованого повітря.

До складу системи входять 4-каскадний ТЕО для ІЧ приймача і вихрові труби. Оптична система з ІЧ приймачем і ТЕО розміщуються в герметичному корпусі. Тепло відводиться на цоколь корпусу, який з допомогою спеціальних теплових мостів з'єднується з негерметичним блоком, в якому розміщені радіатори теплових мостів, які обдуваються охолодженим у вихровій трубі атмосферним повітрям. Така система стабілізує чутливі термоелементи ІЧ приймача на рівні 200 – 210 К. При цьому вихрова труба підтримує температуру цоколя на рівні 310 – 330 К.

Таблиця 2

Параметри каскадних ТЕО для охолодження ІЧ приймачів [6]

Параметр	2-каскадний ТЕО	3-каскадний ТЕО	4-каскадний ТЕО
$T_{\text{приймача}}, \text{ К}$	~ 230 К	~ 210 К	~ 195 К
$Q_{\text{max}}, \text{ Вт}$	0.36	0.27	0.28
$\Delta T_{\text{max}}, \text{ К}$	92	114	125
$U_{\text{max}}, \text{ В}$	1.3	3.6	8.3
$I_{\text{max}}, \text{ А}$	1.2	0.45	0.4

Одним з промислових виробників в Європі ІЧ приймачів на основі *HgCdTe* з термоелектричним охолодженням є компанія VigoPhotonics [6]. Для охолодження використовуються малогабаритні 2, 3 і 4-каскадні стандартні термоелектричні модулі, які виготовляються багатьма компаніями світу. Застосовується традиційна фізична модель, а саме детектор разом з ТЕО монтується в спеціальний герметичний металевий корпус з вікном для надходження ІЧ випромінювання. Корпус заповнений сухою сумішшю інертних газів криптона з ксеноном, що має низьку теплопровідність. Для запобігання конденсації водяної пари в корпусі встановлюється контейнер-поглинач вологи. Для зменшення коливань температури детектора з 3- або 4-каскадним ТЕО використовують екран, який встановлюється на поверхні між двома нижніми каскадами. Параметри ТЕО (максимальні перепад температур ΔT_{max} , холодопродуктивність Q_{max} , напруга U_{max} , струм живлення I_{max}), якими комплектуються ІЧ приймачі компанії VigoPhotonics, наведені в таблиці 2 [6].

Для відведення тепла, яке генерується термоелектричним охолоджувачем, використання стінок металевого корпусу і гвинта кріплення корпусу з детектором в ІЧ приладі зазвичай є недостатнім. Тому цоколь корпусу закріплюється на традиційний радіатор. Для покращення теплового контакту цоколя з радіатором використовуються шари теплопровідного клею або силіконової пасти. Для 2- і 3-каскадних ТЕО рекомендовано використовувати радіатори з тепловим опором ~ 2 К/Вт, для 4-каскадних ТЕО рекомендуються теплообмінники з опором ~ 1 К/Вт.

Висновки

Огляд наукової інформації щодо термоелектричного охолодження оптико-електронних пристроїв ІЧ діапазону спектру показав, що не зважаючи на різноманіття фізичних моделей таких

пристроїв найпоширенішою і такою, що використовується в промислових зразках ІЧ приймачів, є найпростіша модель вбудованого в герметичний металічний корпус ТЕО з фоточутливими елементами, які охолоджуються. Використовуються 1-, 2-, 3-, 4-каскадні ТЕО з матеріалів на основі Bi_2Te_3 , які забезпечують рівень робочих температур ІЧ пристроїв до 195 К. Для зменшення конвективного і радіаційного теплового навантаження в каскадних ТЕО можуть застосовуватися екрани. Для відводу теплової потужності, що генерується ТЕО, зазвичай використовуються традиційні радіатори.

Основним недоліком ТЕО для оптико-електронних пристроїв ІЧ діапазону є їх низький холодильний коефіцієнт порівняно з механічними способами охолодження. Підвищення холодильного коефіцієнту і розширення температурного діапазону ТЕО є актуальним завданням, виконання якого можливе у разі розробки і застосування нових перспективних термоелектричних матеріалів з підвищеною добротністю в області низьких температур (до 140 К).

Енергетична ефективність ТЕО, особливо мініатюрних їх габаритів з висотою термоелектричних віток менше за 0.5 мм, суттєво залежить від оптимізації його конструкції, яка повинна враховувати електричні і теплові опори контактів, комутаційних та ізоляційних пластин модуля. Ці опори призводять до електричних та теплових втрат ефективності термоелектричного перетворення енергії, зменшують холодильний коефіцієнт і є однією з основних причин того факту, що в термоелектричних охолоджувачах властивості матеріалів не реалізуються в повній мірі.

Також на енергетичну ефективність ТЕО впливають теплові опори корпусу ІЧ приймачів, його з'єднань з ТЕО, радіаторів і теплообмінників, які використовуються в системі для відводу тепла генерованого ТЕО.

Тому проектування і оптимізація конфігурації ТЕО має ґрунтуватися на аналізі всіх компонентів системи з урахуванням їхнього теплового з'єднання, а вибір коректної фізичної моделі оптико-електронної систем з ТЕО відіграє суттєве значення у проектуванні охолоджувача.

Література

1. Rogalski A. (2012). Progress in focal plane arrays technologies. *Progress in Quantum Electronics*, 36, 2 – 3, 342 – 473.
2. Veprik A., Zehtzer S., Vilenchik H. and Pundak N. (2010) Micro-miniature split Stirling linear cryocooler. *AIP Conf. Proc.* 1218, p. 363 – 370.
3. Kinch M.A. (2000). Fundamental physics of infrared detector materials. *J. of Electronic Materials*, 29 (6), 809 – 817.
4. Shtrichman Itay, Aronov Daniel, ben Ezra Michael, et al. (2012). High operating temperature $InSb$ and $XBn-InAsSb$ photodetectors. *Proceedings of SPIE* Volume 8353, Infrared Technology and Applications XXXVIII, 83532Y, May 1, 2012.
5. Piotrowski A., Piotrowski J., Gawron W., Pawluczyk J. and Pedzinska M. (2009). Extension of usable spectral range of Peltier cooled photodetectors. *ACTA Physica Polonica A*, 116, s-52 – s-55.
6. Vigo Photonics <https://vigophotonics.com/> (25 August 2023).
7. Crane D., Madigan B., Bell L. (2022). Path to higher SWaP-C for cooled IR through thermoelectrics with distributed transport properties, *Proc. SPIE 11982* (2022).
8. Müller R., Gramich V., Wauro M., Niemasz J. et al. (2019). High operating temperature $InAs/GaSb$ type-II superlattice detectors on GaAs substrate for the long wavelength infrared, *Infrared Physics & Technology* 96, 141 – 144.

9. Molodyk A.V., Smolyar G.A., Lobzin D.V. (2012). Combination of energy transformers as a method for solving the problems of modern instrument making. *J. Thermoelectricity*, 3, 55 – 64.
10. Mongellaz Francois, Fillot A., Griot R., De Lalle J. (1994). Thermoelectric cooler for infrared detectors. *Proc. SPIE 2227, Cryogenic Optical Systems and Instruments VI*, (23 June 1994), p. 156 – 165.
11. Zamboni John M. (2003). Integrated thermoelectric cooler/package for infrared detector array temperature stabilization. *Proc. SPIE 5209, Materials for Infrared Detectors III*, (8 December 2003), p. 173 – 181.
12. Yang R., Chen G., Snyder G.J., Fleurial J.-P. (2002). Multistage thermoelectric micro coolers. *IEEE Proc. of Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, 2002, p. 323 – 329.
13. Salinas M. A. (2000). 3-D thermoelectric cooler analysis. *IEEE Proc. of Sixteenth IEEE SEMI-THERMTM Symposium*, p. 10 – 18.
14. Semenyuk V.A. (2003). Advances in development of thermoelectric modules for cooling electro-optic components. *IEEE Proc. of XXII International Conference on Thermoelectrics*, 2003, p. 631 – 636.
15. Semenyuk V.A. (2005). Novel thermoelectric microcoolers compatible with electro-optic components. *Proc. of 3rd International Energy Conversion Engineering Conference*, 15 – 18 August 2005, San Francisco, California.
16. Semenyuk V.A. (2006). Thermoelectric cooling of electro-optic components, in *Thermoelectrics Handbook, Macro to Nano. Edited by D.M. Rowe, CRC Taylor&Francis*, 2006, p. 58-1 – 58-20.
17. Semenyuk V.A. (2014). Comparison of performance characteristics of multistage thermoelectric coolers based on different ceramic substrates. *J. of Electronic Materials*, 43, 1539 – 1547.
18. Semenyuk V. (2019). Effect of electrical contact resistance on the performance of cascade thermoelectric coolers. *J. of Electronic Materials*, 48 (4), 1870 – 1876.
19. Agaev Z.F., Abidinov D.Sh. (2007). Photodetector with thermoelectric cooler. *Proc. of SPIE*, 6636, p. 66360F-1 – 66360F-7.
20. Wurtz H.P. (1980). Design guidelines for thermoelectrically cooled infrared detectors, *Proc. SPIE 0246, Contemporary Infrared Sensors and Instruments*, (3 December 1980), p. 15 – 21.
21. Patent US 4 833 889. Thermoelectric refrigeration apparatus. R.W. Harwell, W.M. Simon, 1989.
22. Patent US 4 990 782. Radiation shield for thermoelectrically cooled infrared detectors. W.H. Wellman, R.D. Granneman, 1991.
23. Vuillermet M., Tribolet P. (2010). Operating temperature: a challenge for cooled IR technologies. *Proc. of SPIE*, Vol. 7660, 2010.
24. Klipstein P., Klin O., Grossman S., Snapi N. et al. (2012). High operating temperature *XBn-InAsSb* bariode detectors. *Proc. of SPIE*, Vol. 8268, 2012.
25. Tsao S., Lim H., Zhang W., and Razeghi M. (2007). High operating temperature 320 x 256 middle-wavelength infrared focal plane array imaging based on an *InAs/InGaAs/InAlAs/InP* quantum dot infrared photodetector. *Applied Physics Letters*, 90, 201109-1 – 201109-3.
26. Anatychuk L.I., Vikhor L.N. (2012). *Thermoelectricity, volume IV. Functionally Graded Thermoelectric Materials*. Institute of Thermoelectricity, Chernivtsi, 2012, 180 p.
27. Anatychuk L.I., Vikhor L.N. (2013). Boundaries of thermoelectric cooling for photodetectors. *J. Thermoelectricity*, 5, 58 – 63.
28. Crane D., Madigan B., Bell L. (2022). Path to higher SWaP-C for cooled IR through thermoelectrics with distributed transport properties. *Proc. SPIE 11982 (2022) Components and Packaging for Laser Systems VIII*, p.1198207-1 – 1198207-9.

29. Gradauskas J., Dzundza B., Chernyak L., Dashevsky Z. (2021). Two-color infrared sensor on the *PbTe*: In *p-n* junction. *Sensors*, 21, 1195 1 – 9.
30. Parashchuk T., Sidorenko N., Ivantsov L., et al. (2021). Development of a solid-state multi-stage thermoelectric cooler. *Journal of Power Sources*, 496, 229821-1 – 9.
31. Sidorenko N., Parashchuk T., Maksymuk M., Dashevsky Z. (2020). Development of cryogenic cooler based on *n*-type *Bi-Sb* thermoelectric and HTSC. *Cryogenics*, 112 (2020 Dec) p. 103197.
32. Sidorenko N.A., Dashevsky Z.M. (2019). Cryogenic thermoelectric cooler for operating temperatures below 90 K. *Semiconductors* 53 (6) (2019 Jun 10), 752 – 755.

Надійшла до редакції: 15.03.2023.

Anatychuk L.I., Acad. NAS Ukraine ^{1,2}
Vykhor L.M., doc. phys.-math. sciences ¹
Matsenko I.D. ²

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS
and MES of Ukraine, 1 Nauky str.,
Chernivtsi, 58029, Ukraine;

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatych@gmail.com

PHYSICAL MODELS OF OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS OF THE IR SPECTRUM RANGE WITH THERMOELECTRIC COOLING (REVIEW)

The paper considers the main physical models of optical-electronic systems in the IR spectrum range with thermoelectric cooling. The features and advantages of these models are analyzed. It was established that the simplest and the one that is practically used in industrial samples of IR devices is a model of a thermoelectric module built into a metal case with photosensitive elements that are cooled. Such a model with cascade thermoelectric coolers (TEC) made of materials based on Bi_2Te_3 ensures the level of operating temperatures of IR devices up to 195 K. It has been shown that expanding the cooling range to temperatures of 140-150 K is possible by using functionally graded materials and additional stages of low-temperature thermoelectric materials, for example BiSb-based materials, for TEC. It has been established that the energy efficiency of a TEC significantly depends on the optimization of its design, which should take into account the electrical and thermal resistance of contacts, interconnect and insulation plates, as well as the influence of the thermal resistance of the IR detector case, its connections with the TEC, heat sinks and heat exchangers used in the system for heat removal from TEC. Therefore, the TEC design must take into account all system components, and the choice of the physical model of the optical-electronic system with TEC is important.

Key words: optical-electronic system, IR device, thermoelectric cooler, physical model.

References

1. Rogalski A. (2012). Progress in focal plane arrays technologies. *Progress in Quantum Electronics*, 36, 2 – 3, 342 – 473.

2. Veprik A., Zehetzer S., Vilenchik H. and Pundak N. (2010) Micro-miniature split Stirling linear cryocooler. *AIP Conf. Proc.* 1218, p. 363 – 370.
3. Kinch M.A. (2000). Fundamental physics of infrared detector materials. *J. of Electronic Materials*, 29 (6), 809 – 817.
4. Shtrichman Itay, Aronov Daniel, ben Ezra Michael, et al. (2012). High operating temperature *InSb* and *XBn-InAsSb* photodetectors. *Proceedings of SPIE* Volume 8353, Infrared Technology and Applications XXXVIII, 83532Y, May 1, 2012.
5. Piotrowski A., Piotrowski J., Gawron W., Pawluczyk J. and Pedzinska M. (2009). Extension of usable spectral range of Peltier cooled photodetectors. *ACTA Physica Polonica A*, 116, s-52 – s-55.
6. Vigo Photonics <https://vigophotonics.com/> (25 August 2023).
7. Crane D., Madigan B., Bell L. (2022). Path to higher SWaP-C for cooled IR through thermoelectrics with distributed transport properties, *Proc. SPIE 11982* (2022).
8. Müller R., Gramich V., Wauro M., Niemasz J. et al. (2019). High operating temperature *InAs/GaSb* type-II superlattice detectors on GaAs substrate for the long wavelength infrared, *Infrared Physics & Technology* 96, 141 – 144.
9. Molodyk A.V., Smolyar G.A., Lobzin D.V. (2012). Combination of energy transformers as a method for solving the problems of modern instrument making. *J. Thermoelectricity*, 3, 55 – 64.
10. Mongellaz Francois, Fillot A., Griot R., De Lalle J. (1994). Thermoelectric cooler for infrared detectors. *Proc. SPIE 2227, Cryogenic Optical Systems and Instruments VI*, (23 June 1994), p. 156 – 165.
11. Zamboni John M. (2003). Integrated thermoelectric cooler/package for infrared detector array temperature stabilization. *Proc. SPIE 5209, Materials for Infrared Detectors III*, (8 December 2003), p. 173 – 181.
12. Yang R., Chen G., Snyder G.J., Fleurial J.-P. (2002). Multistage thermoelectric micro coolers. *IEEE Proc. of Inter Society Conference on Thermal Phenomena, 2002*, p. 323 – 329.
13. Salinas M. A. (2000). 3-D thermoelectric cooler analysis. *IEEE Proc. of Sixteenth IEEE SEMI-THERMTM Symposium*, p. 10 – 18.
14. Semenyuk V.A. (2003). Advances in development of thermoelectric modules for cooling electro-optic components. *IEEE Proc. of XXII International Conference on Thermoelectrics, 2003*, p. 631 – 636.
15. Semenyuk V.A. (2005). Novel thermoelectric microcoolers compatible with electro-optic components. *Proc. of 3rd International Energy Conversion Engineering Conference, 15 – 18 August 2005, San Francisco, California*.
16. Semenyuk V.A. (2006). Thermoelectric cooling of electro-optic components, in *Thermoelectrics Handbook, Macro to Nano. Edited by D.M. Rowe, CRC Taylor&Francis, 2006*, p. 58-1 – 58-20.
17. Semenyuk V.A. (2014). Comparison of performance characteristics of multistage thermoelectric coolers based on different ceramic substrates. *J. of Electronic Materials*, 43, 1539 – 1547.
18. Semenyuk V. (2019). Effect of electrical contact resistance on the performance of cascade thermoelectric coolers. *J. of Electronic Materials*, 48 (4), 1870 – 1876.
19. Agaev Z.F., Abidinov D.Sh. (2007). Photodetector with thermoelectric cooler. *Proc. of SPIE, 6636*, p. 66360F-1 – 66360F-7.
20. Wurtz H.P. (1980). Design guidelines for thermoelectrically cooled infrared detectors, *Proc. SPIE 0246, Contemporary Infrared Sensors and Instruments*, (3 December 1980), p. 15 – 21.
21. Patent US 4 833 889. Thermoelectric refrigeration apparatus. R.W. Harwell, W.M. Simon, 1989.

22. Patent US 4 990 782. Radiation shield for thermoelectrically cooled infrared detectors. W.H. Wellman, R.D. Granneman, 1991.
23. Vuillermet M., Tribolet P. (2010). Operating temperature: a challenge for cooled IR technologies. *Proc. of SPIE, Vol. 7660, 2010*.
24. Klipstein P., Klin O., Grossman S., Snapi N. et al. (2012). High operating temperature *XBn-InAsSb* barior detectors. *Proc. of SPIE, Vol. 8268, 2012*.
25. Tsao S., Lim H., Zhang W., and Razeghi M. (2007). High operating temperature 320 x 256 middle-wavelength infrared focal plane array imaging based on an *InAs/InGaAs/InAlAs/InP* quantum dot infrared photodetector. *Applied Physics Letters*, 90, 201109-1 – 201109-3.
26. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N. (2012). *Thermoelectricity, volume IV. Functionally Graded Thermoelectric Materials*. Institute of Thermoelectricity, Chernivtsi, 2012, 180 p.
27. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N. (2013). Boundaries of thermoelectric cooling for photodetectors. *J. Thermoelectricity*, 5, 58 – 63.
28. Crane D., Madigan B., Bell L. (2022). Path to higher SWaP-C for cooled IR through thermoelectrics with distributed transport properties. *Proc. SPIE 11982 (2022) Components and Packaging for Laser Systems VIII, p.1198207-1 – 1198207-9*.
29. Gradauskas J., Dzundza B., Chernyak L., Dashevsky Z. (2021). Two-color infrared sensor on the *PbTe*: In *p-n* junction. *Sensors*, 21, 1195 1 – 9.
30. Parashchuk T., Sidorenko N., Ivantsov L., et al. (2021). Development of a solid-state multi-stage thermoelectric cooler. *Journal of Power Sources*, 496, 229821-1 – 9.
31. Sidorenko N., Parashchuk T., Maksymuk M., Dashevsky Z. (2020). Development of cryogenic cooler based on *n*-type *Bi-Sb* thermoelectric and HTSC. *Cryogenics*, 112 (2020 Dec) p. 103197.
32. Sidorenko N.A., Dashevsky Z.M. (2019). Cryogenic thermoelectric cooler for operating temperatures below 90 K. *Semiconductors* 53 (6) (2019 Jun 10), 752 – 755.

Submitted: 15.03.2023.