

Автореф
Б 39

Одеська державна академія холоду

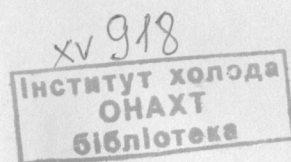
БЕЗВЕРХОВ ДМИТРО БОРИСОВИЧ

УДК 621.565:537.324

**КАСКАДНІ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ ОХОЛОДЖУВАЧІ
ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ
ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ**

Спеціальність 05.05.14 - холодильна і кріогенна техніка,
системи кондиціонування

Автореферат дисертації на здобуття ученого ступеня
кандидата технічних наук



Одеса - 2002

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент Семенюк Володимир Олексійович, Одеська державна академія холоду, провідний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник Ащеулов Анатолій Анатолійович, головний науковий співробітник Інституту Термоелектрики НАНУ, головний науковий співробітник Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича.

кандидат технічних наук, Моїсєєв Віктор Федорович, директор науково-виробничого об'єднання "Шторм" Міністерства промислової політики України.

Провідна установа – Одеський національний політехнічний університет, кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики.

Захист відбудеться "23" вересня 2002 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.087.01 в Одеській державній академії холоду (ОДАХ) за адресою: Одеса, вул. Дворянська 1/3, Україна, 65026.

Дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ОДАХ.

Відіслано "22" серпня 2002 р.

В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Мініатюрні термоелектричні охолоджувачі (ТЕО) знаходять широке застосування для підтримки теплових режимів елементів оптоелектроніки й електронної техніки. Зокрема, вони використовуються для охолодження і термостатування таких об'єктів, як напівпровідникові світлодіоди і лазери, датчики і перетворювачі інфрачервоного (ІЧ) випромінювання, матриці приймачів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ-матриці), фотопомножувачі, спектрометри різного типу, фотоприймальні пристрої й інші оптоелектронні прилади і системи. Подібні пристрої широко застосовуються в різних галузях науки і техніки. Це оптичний зв'язок, лазерна голографія, ІЧ-спектроскопія, теплобачення, моніторинг навколишнього середовища, зняття теплових карт місцевості для вивчення природних ресурсів, астрономічні спостереження, вивчення теплових режимів усяких об'єктів, медична діагностика, тепlopеленгація і локація, управління автоматичними об'єктами, лазерна навігація і дальнометрія.

Найважливішим виявилася та обставина, що чутливість цих приладів може бути збільшена на декілька порядків шляхом зниження їхньої температури. Для цієї мети доцільно використовувати твердотільні ТЕО, що забезпечують швидке охолодження при малих розмірах і масі, відносно низькій вартості і високій надійності. Сучасні стандартні ТЕО каскадного типу забезпечують досягнення температури порядку 170 К при порівняно невеликих витратах енергії. Подальше розширення діапазону досяжних температур дозволило б істотно поліпшити характеристики елементів оптоелектроніки і освоїти нову галузь їхнього застосування. Зокрема, значний інтерес являє собою досягнення температурного рівня 150 К з придатними витратами енергії. Це особливо важливо для розробки нового класу ІЧ-детекторів із поліпшеними характеристиками. Таким чином, розширення діапазону досяжних температур у каскадних ТЕО є важливою й актуальною задачею.

Інша найважливіша задача - це узгодження ТЕО і охолоджуваного елемента за розмірами і густинами потоків теплоти. Як джерело тепловиділень оптоелектронний компонент може бути віднесений до однієї з двох різних груп об'єктів. Перша група - це інтенсивні, гранично локалізовані джерела теплоти (наприклад, напівпровідникові лазери і підсилювачі потужності), у яких густина тепловиділень, віднесена до площі основи, може досягати 5-10 МВт/м². Інша група - це розподілені джерела теплоти, тобто об'єкти великих розмірів із відносно малими власними тепловиділеннями (такі, наприклад, планарні елементи оптоелектроніки - ПЗЗ-матриці, датчики і перетворювачі ІЧ-випромінювання). Ці два класи приладів є принципово відмінними, і для їхнього охолодження варто застосовувати різні підходи. У першому випадку необхідно створювати економічні ТЕО з порівнянними (гранично високими) густинами потоку теплоти на холодній стороні. Найбільш перспективними для таких застосувань є каскадні ТЕО «пірамідальної» форми з послідовним живленням каскадів і малою висотою термоелементів. У другому випадку необхідно створювати конфігурації з однаковими або близькими за розмірами площами каскадів, що потребує за-

стосування нових концепцій конструювання ТЕО. Таким чином, узгодження параметрів ТЕО і охолоджуваного елемента також є важливою і актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими темами. Розглянуті проблеми вирішувалися шляхом теоретичних і експериментальних досліджень при виконанні ряду наукових програм Міністерства освіти і науки України в Проблемній науково-дослідній лабораторії холодильної техніки Одеської державної академії холоду, у тому числі:

- за координаційним планом № 20 Міністерства освіти і науки України «Національна термографія - розробка апаратурної бази і методик її застосування» (держбюджетна НДР «Розробка технологічних основ створення низькотемпературних термоелектричних охолоджувачів для тепловізійних систем», шифр: МК 97/7, № держреєстрації 0198V002922, 1997-1999 рр);
- за напрямком фундаментальних наукових досліджень Міністерства освіти і науки України «Фізика, астрономія, радіотехніка, електроніка» (держбюджетна НДР «Теоретичні, експериментальні та технологічні основи створення нових матеріалів із заданими властивостями для технологій надпровідності, газового аналізу та інфрачервоної техніки», шифр: МК 00/2, № держреєстрації 0100U003732, 2000-2002 рр).

У розділі 3 дисертації наведені результати досліджень, виконаних за договором з французькою фірмою Marvel Thermoelectrics щодо створення охолоджувача для потужного напівпровідникового лазера, призначеного для дальнього оптичного зв'язку.

У розділі 4 наведені результати досліджень виконаних за контрактом з Інститутом Космічної Астрофізики Національного Центру Наукових Досліджень Франції (Контракт L 08662 "Design Study of Multi-Stage TE Cooler for CIVA Instrument" від 19.10.2000 р.) у рамках проекту "Civa Instrument" за програмою франко-американської космічної місії "Mars Sample Return", запланованою на 2005 р.).

Мета і задачі дослідження. Об'єктом дослідження є каскадний термоелектричний охолоджувач у взаємодії з охолоджувальним елементом оптоелектроніки. Предметом дослідження є ефективність об'єкта дослідження і його узгодження як з локалізованими так і з планарними елементами оптоелектроніки за розмірами і густинами потоків теплоти. Метою дослідження є розробка узагальнених моделей і алгоритмів розрахунку каскадних ТЕО з різними схемами з'єднання каскадів і застосування їх для вирішення практичних задач низькотемпературного охолодження об'єктів напівпровідникової оптоелектроніки. Досягнення зазначеної мети зумовило постановку і розв'язання таких задач:

- аналіз існуючих методів, конструкцій і технологій, спрямованих на досягнення поставленої мети, за даними літературних джерел і вибір раціональних напрямків і методів досліджень;
- побудова фізичних моделей, аналіз і мінімізація необоротних втрат у традиційних і нових схемах каскадних охолоджувачів, оцінка термодинамічної межі їхньої ефективності;

- створення методів і алгоритмів розрахунку й оптимізації каскадних ТЕО з урахуванням контактних термічних і електричних опорів і температурної залежності параметрів напівпровідникових матеріалів;
- проведення експериментальних досліджень низькотемпературних каскадних охолоджувачів із метою перевірки теоретичних результатів і висновків;
- практичне використання результатів досліджень при розробці каскадних охолоджувачів для зосереджених і планарних елементів оптоелектроніки.

Методи дослідження: теоретичні узагальнення, математичне моделювання, аналітичні та чисельні методи, експериментальна перевірка теоретичних результатів та висновків, використання одержаних результатів при створенні високоефективних низькотемпературних ТЕО для локалізованих і планарних елементів напівпровідникової оптоелектроніки.

Наукова новизна здобутих результатів. У дисертації захищаються такі наукові положення:

1. Всі схеми електроживлення каскадних ТЕО, включаючи послідовне, паралельне і розгалужене з'єднання, а також їхні можливі комбінації, характеризуються однаковим рівнем граничної енергетичної ефективності.

Відповідно до цього наукового положення каскадні охолоджувачі з різними схемами комутації мають потенційно однакову граничну енергетичну ефективність, обумовлену тільки діапазоном температур і якістю використовуваного напівпровідникового матеріалу. Ця теза, сформульована раніше для найпростішої схеми з послідовним живленням каскадів, не є очевидною у відношенні більш складних узагальнених схем живлення, оскільки в них накладаються додаткові обмеження на характер розподілу струмів в окремих ділянках ТЕО. Висунуте наукове положення стверджує, що незалежно від цих обмежень у будь-якій схемі існує достатнє число вільних параметрів, варіювання яких дозволяє досягти тієї ж граничної ефективності, що й у схемі з послідовним з'єднанням. Новим є той факт, що всі схеми, будучи оптимально спроектованими, мають однакові граничні можливості, а особливості, притаманні кожній із них, впливають лише на конфігурацію охолоджувача, але не на його енергетичні характеристики.

2. Системний підхід до опису каскадного ТЕО з використанням моделі тривимірного розтікання теплоти в міжкаскадних електроізолюючих підкладках дозволяє мінімізувати необоротні втрати в охолоджувачі та підвищити його енергетичну ефективність.

Вперше сформульована модель каскадного ТЕО, у якій розв'язання системи балансових рівнянь на межах каскадів сполучається із розв'язанням крайових задач для рівняння тривимірної теплопровідності в міжкаскадних підкладках. Таке модельне наближення дозволяє виявити і мінімізувати основні джерела втрат у традиційних «пірамідальних» конструкціях каскадних ТЕО, що відкриває додаткові резерви для підвищення їхньої ефективності.

3. Використання концепції розгалуженого живлення створює основу для розробки но-

вих конфігурацій ТЕО, найбільш перспективних для низькотемпературного охолодження планарних об'єктів оптоелектроніки.

Відповідно до цього наукового положення використання принципу розгалуженого живлення дозволяє здійснити каскадні ТЕО з близькими і навіть однаковими числами гілок по каскадах. Вперше цей принцип поширений на охолоджувачі, що містять три і більше каскадів. Внаслідок цього створюється можливість реалізувати нові конфігурації низькотемпературних ТЕО, узгоджені у розмірах із такими об'єктами охолодження, як ПЗЗ-матриці, матриці фотоприймачів, ІЧ-детектори й інші планарні компоненти оптоелектроніки з відносно великими розмірами охолоджуваної поверхні.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені алгоритми чисельних методів і програми для вирішення прикладних задач оптимізації каскадних охолоджувачів із різноманітними схемами комутації використані при створенні високоефективних низькотемпературних ТЕО як для локалізованих, так і для планарних об'єктів напівпровідникової оптоелектроніки. Зокрема, результати досліджень знайшли застосування при створенні каскадного ТЕО для напівпровідникового лазера потужністю 8 Вт (за договором з компанією Marvel Thermoelectrics, Франція) і при виконанні контракту з Інститутом Космічної Астрофізики Франції у розробці чотирикаскадного охолоджувача з розгалуженим живленням для охолодження фотоприймальної матриці ІЧ-спектрометра до температури 120 К.

Особистий внесок здобувача складається в розробці узагальнених математичних моделей і алгоритмів розрахунку каскадних ТЕО з різними схемами з'єднання каскадів, у теоретичному обґрунтуванні енергетичної ідентичності різноманітних схем каскадних ТЕО, у проведенні експериментальних досліджень, обробці, аналізі і публікації одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались на XVI міжнародній конференції з термоелектрики (м. Дрезден, Німеччина, 1997 р.), на IV європейсько-му симпозіумі з термоелектрики (м. Мадрид, Іспанія, 1998 р.), а також на IX міжнародному форумі і школі термоелектрики (м. Чернівці, Україна, 2000 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в чотирьох статтях, у наукових журналах і працях двох міжнародних конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів і висновків. Зміст дисертації викладений на 125 сторінках машинописного тексту, містить 47 рисунків, 29 таблиць і 107 найменувань літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, відбитий зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовані мета і конкретні задачі проведених досліджень. Наведені наукові положення, відомості про публікацію й апробацію результатів досліджень.

У розділі 1 розглянуто сучасний стан, галузі застосування і перспективи розвитку каскадного охолодження. Визначено фактори, що впливають на ефективність каскадних ТЕО. Проведено порівняння різноманітних схем живлення каскадних охолоджувачів (табл. 1), проаналізовані їх достоїнства і недоліки, визначені раціональні сфери застосування. Розглянуто основні проблеми, що виникають при створенні каскадних ТЕО для локалізованих і планарних елементів оптоелектроніки. Показано, що каскадні ТЕО традиційної «пірамідальної» конструкції дозволяють успішно розв'язувати задачу охолодження тільки для локалізованих об'єктів. Охолодження планарних компонентів оптоелектроніки таких як: ПЗЗ-матриці, датчики і перетворювачі ІЧ-випромінювання, потребує інших науково-технічних рішень. Показано, що для створення ТЕО, сумісних із цими об'єктами, може бути ефективно використаний принцип розгалуженого живлення. На основі проведеного аналізу сформульовані й обґрунтовані перспективні напрямки досліджень, що розроблюються в даній дисертації.

У розділі 2 досліджується питання про граничну ефективність каскадних ТЕО з різними схемами комутації каскадів. Для охолоджувачів із послідовним живленням це питання добре вивчене. Їх достоїнством є можливість виконання умов, коли кожний із каскадів працює в режимі максимуму власного холодильного коефіцієнта:

$$\epsilon_k = \epsilon_{k \max}, \quad k=1, \dots, N, \quad (1)$$

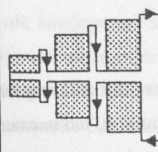
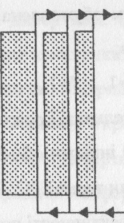
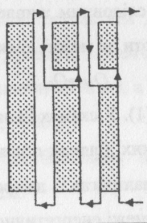
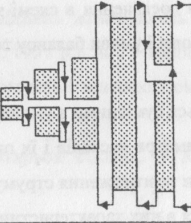
що забезпечує досягнення абсолютного максимуму енергетичної ефективності каскадного ТЕО в цілому. Цей теоретичний максимум (т.зв. характеристична межа термоелектричної ефективності) не залежить від розмірів охолоджувача і його холодопродуктивності і визначається тільки діапазоном робочих температур і термоелектричною якістю напівпровідникових матеріалів. Можливість його досягнення в схемі з послідовним живленням обумовлена тим, що властиве їй обмеження $I = \text{const}$ і умови балансу теплоти на межах каскадів:

$$Q_{1k} = Q_{0k-1}, \quad k=1, \dots, N-1, \quad (2)$$

виявляються сумісними з умовами (1). У схемах із паралельним і розгалуженим живленням електричні параметри каскадів і їх окремих ділянок пов'язані іншими обмеженнями, що накладаються за умовами розгалуження струму в ланцюгах із джерелами термоЕРС. Внаслідок цього можливість досягнення в них характеристичної межі енергетичної ефективності потребує додаткового обґрунтування.

Сформульовано загальну задачу оптимізації N -каскадного охолоджувача. Розглядається узагальнена схема (табл. 1, нижній рисунок), що включає групу з m ($m < N$) послідовно з'єднаних каскадів. Решта $N-m$ каскадів мають розгалужене живлення, тобто містять послідовну і паралельну секції з числами гілок, що дорівнюють $n_k^{(s)}$ і $n_k^{(p)}$, $m < k \leq N$, відповідно. Легко помітити, що відомі прості схеми витікають із цієї узагальненої конфігурації як її окремі варіанти. Так, при $m=N$ маємо випадок послідовного з'єднання всіх каскадів, а при $m=1$ і $n_k^{(s)}=0$ здійснюється варіант паралельно-

Таблиця 1

Електричне з'єднання каскадів	Схема з'єднання	Переваги	Недоліки
Варіант 1: Послідовне з'єднання		- Знижені струми живлення - Відносно висока напруга - Високий перепад температур - Практично ідентичні розміри ТЕ гілок	- Прогресивне збільшення числа ТЕ гілок зверху вниз. - Відносно малі розміри холодної сторони і мала доступна холодопродуктивність - Високі необоротні втрати на межах каскадів
Варіант 2: Паралельне з'єднання		- Збільшені розміри холодної сторони, підвищена холодопродуктивність - Порівняні розміри каскадів - Відносно мале число ТЕ гілок - Мінімальні втрати на межах каскадів	
Варіант 3: Розгалужене з'єднання (послідовно-паралельне)		Такі самі, як для варіанта 2, а також: - Знижені (у порівнянні з варіантом 2) струми живлення - Підвищена (у порівнянні з варіантом 2) напруга - Можливість реалізувати конфігурацію з однаковим числом гілок у каскадах	- Прогресуюче зменшення висот ТЕ гілки зверху вниз - Підвищені (у порівнянні з варіантом 1) струми - Знижена (у порівнянні з варіантом 1) напруга
Варіант 4: Комбіноване з'єднання (послідовне і послідовно-паралельне)		Комбінуються переваги варіантів 1 і 3, зменшуються їх недоліки	

го живлення. При $m=1$ і $n_k^{(s)} \neq 0$ маємо більш загальний випадок послідовно-паралельного з'єднання.

У всіх випадках необхідно мінімізувати відношення $\mu = Q_{1N}/Q_{01}$, причому для будь-якої із схем повинні виконуватися умови безперервності потоків теплоти на стиках каскадів (2). Звідси відразу ж виходить, що для будь-якої конфігурації функціонал μ може бути поданий у тому самому вигляді, що і для схеми послідовного з'єднання, як-от: $\mu = \prod_{k=1}^N \mu_k$, де

$$\mu_k = Q_{1k}/Q_{0k}. \quad (3)$$

Встановлено також, що для всіх розглянутих схем з'єднання каскадів вирази для потоків теплоти Q_{0k} і Q_{1k} мають однаковий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} Q_{0k} &= \psi_k q_{0k} = \psi_k \left(\alpha T_{k-1} j_k - \frac{1}{2} j_k^2 p - \kappa (T_k - T_{k-1}) \right) \\ Q_{1k} &= \psi_k q_{1k} = \psi_k \left(\alpha T_k j_k + \frac{1}{2} j_k^2 p - \kappa (T_k - T_{k-1}) \right) \end{aligned} \right\} \quad k = 1, \dots, N, \quad (4)$$

де $T_k, k=0, \dots, N$ – температури на межах каскадів (температури $T_0=T_c$ і $T_N=T_h$ фіксовані). Розходження полягає лише у формі співвідношень для коефіцієнтів ψ_k . Для простих послідовної і паралельної схем ці співвідношення мають вигляд:

$$\psi_k = n_k (S_k / l_k), \quad k = 1, \dots, N, \quad (5)$$

а для схеми змішаного живлення

$$\left. \begin{aligned} \psi_k &= n_k (S_k / l_k), \quad k = 1, \dots, m, \\ \psi_k &= n_k^{(s)} (S_k^{(s)} / l_k^{(s)}) + n_k^{(p)} (S_k^{(p)} / l_k^{(p)}), \quad k = m+1, \dots, N, \\ n_k^{(s)} + n_k^{(p)} &= n_k. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Звідси випливає, що підстановка узагальненого співвідношення (4) у (3) робить функцію $\mu_k = q_{1k}/q_{0k}$ незалежною від параметра ψ_k . Таким чином, в усіх випадках функціонал μ не залежить від розмірів і кількості гілок, будучи функцією тільки від векторів-параметрів $\vec{j} = (j_1, \dots, j_N)$ і $\vec{T} = (T_1, \dots, T_{N-1})$. Можливість досягнення граничної ефективності для різних схем комутації залежить від того, чи можна в усіх випадках розглядати вектори $\vec{j}$ і $\vec{T}$ як незалежні змінні. Формально компоненти цих векторів пов'язані обмеженнями (2), і, отже, мова повинна йти про умовний екстремум $\mu(\vec{j}, \vec{T})$. Проте, як видно з (4)-(6), при будь-яких сполученнях параметрів j_k і T_k співвідношенням (2) можна задовольнити шляхом добору відповідної величини відношення ψ_k/ψ_{k+1} за рахунок варіювання розмірів і чисел термоелектричних гілок. Це означає, що в усіх випадках можна розглядати j_k і T_k як незалежні змінні, варіювання котрих, отже, доставляє абсолютний екстремум параметру $\mu(\vec{j}, \vec{T})$. Таким чином, оптимізація ТЕО призводить до одержання однакових значень оптимальних інтенсивних параметрів j_k, T_k, q_{0k} і q_{1k} для всіх схем з'єднання каскадів. Це

означає, що усі варіанти нерозрізнені на стадії оптимізації та ідентичні у відношенні їхньої граничної ефективності.

Введення узагальненої моделі каскадного охолоджувача з розгалуженим живленням, запропонованої в дисертації, дозволило також з єдиних позицій описати систему обмежень на електричні параметри для будь-якого окремого схемного рішення, включаючи відомі схеми послідовного і паралельного з'єднання, а також їхні можливі комбінації. Показано, що в схемах із розгалуженим живленням можливо задовольнити ці обмеження за рахунок відповідного добору співвідношення чисел послідовно і паралельно включених гілок.

Розділ 3 присвячений дослідженню каскадних ТЕО для локалізованих об'єктів оптоелектроніки. Розглядаються конструкції з послідовним живленням каскадів. Дано аналіз необоротних втрат у таких охолоджувачах. Зокрема, докладно досліджуване питання про вплив термічного опору підкладок на холодній стороні ТЕО і на стиках його каскадів. Спочатку розглядається модель охолоджуваної підкладки для однокаскадного ТЕО у вигляді прямокутної пластини площею $F_{S1}=2A_1 \times 2B_1$ і товщиною h_s , де $2A_1$ і $2B_1$ - її бічні розміри. У центрі верхньої грані підкладки розташоване прямокутне джерело теплоти (охолоджуванний об'єкт) із площею основи $F_{S0}=2A_0 \times 2B_0$. Тепловий потік $Q_c=q_c F_{S0}$ від охолоджуваного об'єкта входить у підкладку рівномірно ($q_c=\text{const}$) через площадку F_{S0} і виходить через усю нижню площу підкладки F_{S1} . Решта поверхні підкладки адіабатично ізолювана. Зазначена модель доповнена умовою стикування з холодними спаями ТЕО, що визначає лінійну граничну умову на нижній грані підкладки.

Сформульована крайова задача для рівняння Лапласа визначає стаціонарний розподіл температур усередині підкладки. Її розв'язання здобуто методом подвійного інтегрального косинус-перетворення. Термічний опір підкладки R_s визначався як відношення різниці середньоінтегральних температур по поверхнях F_{S0} і F_{S1} до повного потоку теплоти через підкладку. Відповідне співвідношення має вигляд:

$$R_s = \frac{h_s}{\kappa_s F_{S1}} (1 + 2S_1 + 2S_2 + 4S_3), \quad (7)$$

де

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin(\lambda A_0)}{\lambda A_0} \right)^2 \frac{D(\lambda h_s)}{\lambda h_s} \quad (8)$$

$$S_2 = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\sin(\mu B_0)}{\mu B_0} \right)^2 \frac{D(\mu h_s)}{\mu h_s}$$

$$S_3 = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin(\lambda A_0)}{\lambda A_0} \right)^2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\sin(\mu B_0)}{\mu B_0} \right)^2 \frac{D(\nu h_s)}{\nu h_s}$$

$$D(\vartheta h_s) = \frac{g_1 \sinh(\vartheta h_s) + \vartheta \cosh(\vartheta h_s)}{g_1 \cosh(\vartheta h_s) + \vartheta \sinh(\vartheta h_s)}$$

$$\lambda = \frac{m\pi}{A_1}, \quad \mu = \frac{n\pi}{B_1}, \quad \nu^2 = \lambda^2 + \mu^2 \quad (9)$$

$$g_1 = \frac{\beta}{\kappa_s} \frac{\kappa}{l} \left(1 + \frac{\alpha l}{\kappa} \right); \quad \beta = nS/F_{S1}.$$

Показано, що ці співвідношення можуть бути використані і для опису проміжних підкладок N -каскадного ТЕО. На основі моделі тривимірного розтікання теплоти висунута теза про існування оптимальної товщини підкладки, що відповідає мінімуму R_s . Дійсно, при малих товщинах підкладки термічний опір її центральної частини відносно невеликий, проте розтікання теплоти в її периферійні ділянки практично відсутнє. При великих h_s , навпаки, термічний опір у бічному напрямку знижується, але одночасно росте опір потокові теплоти в прямому напрямку. Наведені міркування обґрунтовують існування очікуваного оптимуму. Відповідні розрахунки з використанням співвідношень (7)-(9) підтверджують зазначений висновок (рис.1). Встановлено, що відхилення від точки оптимуму вправо викликає відносно невеликий приріст термічного опору і, навпаки, зміщення у бік малих значень h_s призводить до різкого збільшення R_s .

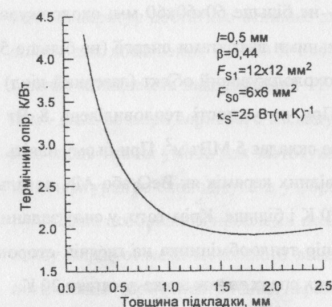


Рис. 1. Залежність термічного опору підкладки від її товщини.

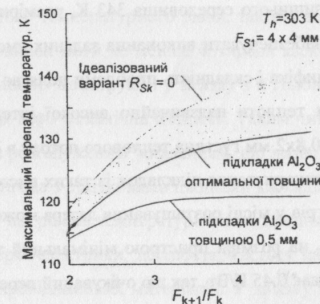


Рис. 2. Порівняння досяжних перепадів температури для різноманітних варіантів 4-каскадних ТЕО.

Вперше розроблений алгоритм методу послідовних наближень для оптимізації каскадного ТЕО, що поєднує у собі розв'язання крайових задач для рівняння тривимірної стаціонарної теплопровідності в міжкаскадних підкладках із розв'язанням системи рівнянь балансу теплоти на межах каскадів. Створено комп'ютерні програми, що реалізують цей алгоритм. Виконано серію розрахунків охолоджувачів різної конфігурації з різним числом каскадів. Результати цих розрахунків ілюструють значний вплив термічного опору підкладок і ряду інших факторів на ефективність каскадного ТЕО. Так, при використанні стандартних підкладок на основі Al_2O_3 товщиною 0,5 мм втрати перепаду температур у 4-каскадному охолоджувачі в порівнянні з ідеалізованим варіантом ($R_s=0$) можуть складати 15 К і більше (рис.2), у той час як використання підкладок оптимальної товщини дозволяє одержати суттєве збільшення ΔT_{max} . Встановлено існування значного резерву підвищення

перепаду температури (заштрихована область на рис.2), що може бути реалізований при використанні більш теплопровідних керамік, таких як AlN або штучний алмаз. Показано, що ефект від застосування підкладок оптимальної товщини підвищується зі зменшення висоти термоелектричної гілки і, особливо, із зростанням відношення площ каскадів, тобто в тих випадках, коли втрати у зв'язку з неефективним розтіканням теплоти найбільше відчутні.

Проведено порівняння впливу різних видів необоротних втрат на максимальний перепад температур, що розвивається охолоджувачем. Всупереч традиційним уявленням про перевагу електричних контактних опорів R_c над іншими видами втрат у каскадних ТЕО встановлено, що втрати від термічного опору міжкаскадних підкладок на основі Al_2O_3 превалюють над втратами, пов'язаними з неідеальним електричним контактом, причому ця ситуація зберігається для будь-якої висоти термоелектричної гілки.

Розроблені теоретичні підходи використані на практиці при створенні 2-каскадного ТЕО для потужного напівпровідникового лазера, призначеного для дальнього оптичного зв'язку. Як початкові використані такі дані й обмеження: температура статкування лазера – 298 К, температура навколишнього середовища 343 К, розміри пристрою - не більше 60х60х60 мм; охолоджувач повинен забезпечувати виконання заданих умов із мінімальними витратами енергії (не більше 50 Вт). Специфіка і складність проблеми полягає в тому, що охолоджуванний об'єкт (лазерний діод) є джерелом теплоти надзвичайно високої інтенсивності. При потужності тепловиділень 8 Вт і розмірах 0,8х2 мм густина теплового потоку в основі лазера складає 5 МВт/м². При цьому навіть у випадку використання підкладок із таких високотеплопровідних керамік як BeO або AlN локальний перегрів у місці розташування лазера може досягати 20 К і більше. Крім того, у силу заданих обмежень на розміри пристрою мінімальний термічний опір теплообмінника на гарячій стороні ТЕО складає 0,45 К/Вт, так що очікуваний перегрів на гарячих спаях також може досягати 20 К.

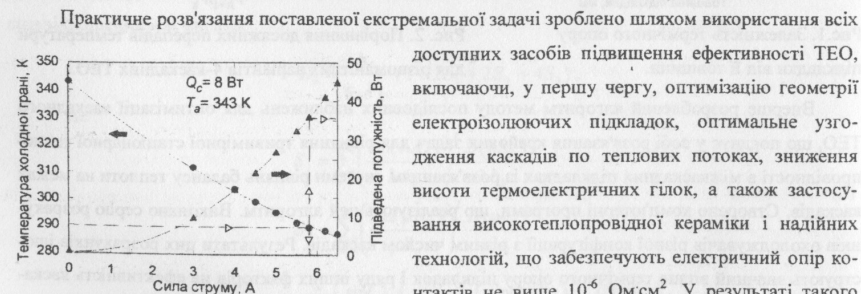


Рис. 3. Залежність температури холодної грані і потужності 2-каскадного ТЕО від сили електричного струму.

доступних засобів підвищення ефективності ТЕО, включаючи, у першу чергу, оптимізацію геометрії електроізолюючих підкладок, оптимальне узгодження каскадів по теплових потоках, зниження висоти термоелектричних гілок, а також застосування високотеплопровідної кераміки і надійних технологій, що забезпечують електричний опір контактів не вище 10^{-6} Ом·см². У результаті такого підходу розроблений 2-каскадний охолоджувач, що задовольняє усім вимогам технічного завдання при споживаній потужності 35,7 Вт (рис. 3). Результати

експериментів добре погоджуються з теоретичними розрахунками.

У розділі 4 досліджується можливість створення низькотемпературних каскадних ТЕО для планарних об'єктів оптоелектроніки на основі схем, що поєднують послідовне з'єднання каскадів із розгалуженим живленням термоелектричних гілок у межах каскаду. Зокрема, розглядається проблема створення каскадного ТЕО на рівень температур 120 К для охолодження ІЧ-детектора спектрометра. Прилад призначений для використання на борту посадкового модуля космічного апарата в умовах планети Марс. У силу специфіки застосування сформульовані жорсткі вимоги у відношенні споживаної потужності (не більше 2 Вт) при відносно великих розмірах охолоджувача (холодна сторона ТЕО не менше 25х25 мм, гаряча сторона не більше 25х25 мм, висота не більше 10 мм). Відповідно до технічного завдання необхідно забезпечити досягнення температури 120 К при різних теплових навантаженнях (50 і 100 мВт) для випадків, коли температура тепловідводу складає 160, 170 і 180 К.

Специфіка розглянутої проблеми полягає в тому, що розміри холодної і гарячої сторони охолоджувача повинні бути однакові і відносно великі (25х25 мм). Крім того, заданий робочий перепад температур достатньо великий для розглянутого температурного рівня, так що відповідно до оцінок для досягнення $T_c=120$ К охолоджувач повинен мати не менше чотирьох каскадів. Це виключає можливість використання ТЕО «пірамідальної» конструкції у зв'язку з її головним недоліком - малі розміри верхнього каскаду і недостатня його механічна міцність. Таким чином, тут мають місце типові умови для застосування схеми з розгалуженим живленням, що дозволяє здійснити конфігурацію охолоджувача у формі паралелепіпеда з однаковими площами каскадів.

Інша особливість проблеми полягає в тому, що рівень температури охолодження лежить поблизу нижньої межі можливого використання термоелектрики, де спостерігається катастрофічне погіршення термоелектричних параметрів напівпровідникових матеріалів. У зв'язку з цим вибір матеріалів із найкращими ТЕ властивостями для заданого температурного інтервалу був найважливішим фактором, що визначає самому можливість розв'язання розглянутої проблеми. Для розв'язання поставленої задачі були здійснені такі етапи досліджень:

1. вибір напівпровідникових матеріалів, що мають найкращі термоелектричні властивості в діапазоні температур 120-180 К;
2. визначення мінімальної необхідної потужності для досягнення заданої температури охолодження 120 К;
3. оптимізація каскадних ТЕО для досягнення найнижчої можливої температури охолодження при заданих обмеженнях на підвідну потужність;
4. вибір оптимальних конфігурацій ТЕО, перевірка їхніх характеристик при відхиленні від оптимальних умов;
5. розробка конструкції каскадних охолоджувачів за результатами оптимізації.

Відповідно до завдання першого етапу проведено варіантні розрахунки з використанням експериментальних даних по температурній залежності властивостей для кращих існуючих ТЕ-матеріалів, включаючи низькотемпературні монокристали, створені в IMET ім. Байкова на основі халькогенідів вісмуту і сурми, низькотемпературні матеріали, розроблені М.В. Ведерниковим з колегами у Фізико-технічному інституті ім. О.Ф. Іоффе, Р-сплави на основі CsBi_4Te_6 , розроблені в 2001 р. у Мічиганському університеті, США, і матеріали системи N-BiSb. Одержано дані про ефективність охолоджувачів для всіх можливих варіантів поєднань цих матеріалів. Визначена пара напівпровідникових матеріалів, застосування яких забезпечує мінімальне споживання енергії на одиницю вироблюваного холоду. Встановлено, що в як Р-гілку доцільно використовувати матеріал $\text{Bi}_{2-y}\text{Sb}_y\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$, оптимізований у діапазоні температур 120-180 К, а в як N-гілку - сплав $\text{Bi}_{92}\text{Sb}_8$. Показано, що на цій парі матеріалів теоретично можливо задовольнити заданим умовам ($T_c=120$ К, $T_h=160$ К, $P<2$ Вт) при тепловому навантаженні 50 мВт. Подвоєння теплового навантаження, так само як і підвищення температури тепловідводу понад 160 К, призвело б до невиконання заданих обмежень за потужністю.

На основі варіантних розрахунків обрані конфігурації охолоджувачів перспективні для практичної реалізації. Визначені їх оптимальні електричні характеристики, розміри і числа гілок по каскадах. Для цих конфігурацій зроблено альтернативне перетворення конструкції з метою узгодження площі низькотемпературних каскадів із розмірами фотоприймача. Перетворення передбачало збільшення числа гілок у верхніх каскадах при збереженні оптимальних енергетичних характеристик ТЕО. Використано метод розгалуженого живлення термоелектричних гілок. Розроблено технологічні і надійні конструкції чотирьохкаскадних охолоджувачів з однаковими площами каскадів. Результати закінченого етапу досліджень передані для використання Інституту Космічної Астрофізики Франції.

У розділі 5 наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень схем із послідовно-паралельним з'єднанням каскадів і їх комбінацій із традиційними послідовними схемами. Побудовано фізичну модель охолоджувача з розгалуженим живленням і його еквівалентну електричну схему. Розроблено алгоритм методу послідовних наближень для розв'язання задачі про розподіл граничних температур, потоків теплоти й електричних токів з урахуванням їхньої взаємозалежності. Наведено методику розрахунку ТЕО в режимах ΔT_{max} і ϵ_{max} .

Детально розглянуто випадок, коли всі каскади мають однакові розміри і містять однакове число гілок. Зазначені схеми мають такі важливі переваги перед традиційними каскадними ТЕО:

- технологічна простота, можливість уніфікації;
- порівняно висока механічна міцність (однакова для всіх каскадів);
- підвищена холодопродуктивність;
- можливість використання для охолодження планарних об'єктів оптоелектроніки віднос-

но великих розмірів.

Проведено порівняльний аналіз ефективності схем із розгалуженим і простим паралельним з'єднанням каскадів. Показано, що в охолоджувачі з паралельним з'єднанням і однаковими числами гілок по каскадах не досягається максимально можливий для даної конфігурації перепад температур унаслідок неоптимального розподілу струмів по каскадах. Перевага схеми з розгалуженим живленням полягає в тому, що в ній тільки частина гілок каскаду включена в паралельний ланцюг з іншими каскадами, що сприяє більш доцільному розподілу струмів. У результаті максимальний перепад температур може бути істотно підвищений при зберіганні розмірів охолоджувача.

Встановлено існування оптимального співвідношення чисел гілок у послідовній і паралельній секціях. Показано, що в двокаскадному ТЕО з розгалуженим живленням перепад температур може бути збільшений на 7 К порівняно з аналогічним охолоджувачем тих самих розмірів, але з паралельним з'єднанням каскадів.

Розроблені і випробувані 2-х, 3-х і 6-каскадні охолоджувачі з розгалуженим живленням каскадів. Результати випробувань двокаскадного ТЕО з різними числами гілок у послідовній і паралельній секціях підтвердили існування його оптимальної конфігурації і можливість розширення досяжного перепаду температур. У охолоджувачі з однаковими сумарними числами гілок у каскадах здобутий перепад температур 99,8 К при $T_h=303$ К.

При випробуваннях трикаскадного охолоджувача з розгалуженим живленням одержано максимальний перепад температур 122 К (рис. 4). Цей результат є високим навіть для традиційних охолоджувачів із послідовною комутацією каскадів. При цьому розроблений зразок має однакові розміри всіх каскадів, що дозволяє використовувати його для охолодження об'єктів із відносно великою площею поверхні. Відповідно до вимірів максимальна холодопродуктивність цього зразка склала 5,25 Вт. Відповідно, чутливість до теплового навантаження (відношення $\Delta T_{\text{max}}/Q_{\text{стmax}}$) дорівнює 23 К/Вт. Це означає, що при тепловому навантаженні 1 Вт охолоджувач може розвивати перепад температур 100 К, що для трикаскадного ТЕО з розмірами основи усього лише 15x18 мм є суттєвим досягненням.

Наведено також результати випробувань 6-каскадного ТЕО з комбінованим живленням. Його чотири верхні каскади зібрані за звичайною схемою послідовного з'єднання і підключені паралельно до двокаскадного блока з розгалуженим живленням. При струмі 9,5 А одержано перепад температури 152 К (рис.5). Це майже на 20 К більше, ніж у стандартних охолоджувачах фірми Melcor і Marlow Industries, Inc., США. При цьому розроблений охолоджувач відрізняється істотно меншими розмірами площі основи (усього лише 15x18 мм) при підвищеній максимальній холодопродуктивності.

Таким чином, практичне використання результатів проведених досліджень дозволяє створювати каскадні охолоджувачі узгоджені за розмірами як із локалізованими, так і з планарними об-

ектами охолодження, що виділяються поліпшеними робочими характеристиками.

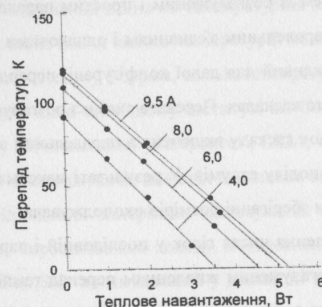


Рис. 4. Навантажувальні характеристики 3-каскадного охолоджувача з розгалуженим живленням каскадів.

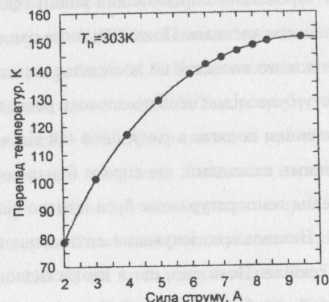


Рис. 5. Залежність перепаду температур 6-каскадного ТЕО від струму живлення

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі узагальненої моделі каскадного ТЕО доведено, що всі схеми електроживлення каскадів, включаючи традиційне послідовне, паралельне і розгалужене з'єднання, а також їх можливі комбінації, характеризуються потенційно однаковим рівнем граничної енергетичної ефективності.

2. Термічний опір міжкаскадних підкладок є основним джерелом необоротних втрат у ТЕО з послідовним живленням каскадів. Це стосується, у першу чергу, охолоджувачів із короткими гілками, призначених для охолодження таких локалізованих джерел теплоти як напівпровідникові лазери, підсилювачі потужності й інші об'єкти з гранично високою густиною тепловиділень.

3. На основі моделі тривимірного розтікання теплоти в міжкаскадній підкладці встановлено існування її оптимальної товщини, що відповідає мінімальному термічному опоріві. Показано, що виконання умов оптимальності дозволяє істотно підвищити ефективність каскадного охолодження і збільшити досяжний перепад температур.

4. Вперше розроблено алгоритм методу послідовних наближень для оптимізації каскадного ТЕО, що поєднує у собі рівняння крайових задач для рівняння тривимірної стаціонарної теплопровідності в міжкаскадних підкладках із рівняннями системи рівнянь балансу теплоти на межах каскадів. Розроблені теоретичні підходи, використані при створенні каскадного ТЕО для напівпровідникового лазера з густиною потоку теплоти, що дорівнює 5 МВт/м^2 .

5. Показано, що використання принципу розгалуженого живлення дозволяє реалізувати каскадні ТЕО з близькими і навіть однаковими числами гілок по каскадах. Це, а також мінімальні втрати на міжкаскадних підкладках, визначає перевагу цих схем і створює основу для розробки нових конфігурацій низькотемпературних ТЕО, узгоджених у розмірах із такими об'єктами охолодження, як ПЗЗ-матриці, ІЧ-детектори, фотоприймальні матриці й інші планарні елементи

оптоелектроніки.

6. На основі аналізу характеристик кращих існуючих ТЕ матеріалів доведена можливість створення чотирьохкаскадного ТЕО з однаковими площами каскадів для охолодження матриці фотоприймача розміром $25 \times 25 \text{ мм}$ до температурного рівня 120 К ($T_h = 160 \text{ К}$, $Q_c = 50 \text{ мВт}$) при підвідній потужності, меншій від 2 Вт . Показано, що реалізація цього проекту можлива тільки при використанні схеми з розгалуженим живленням.

7. Доведена теоретично і підтверджена експериментально можливість підвищення перепаду температур і холодопродуктивності ТЕО при використанні схеми розгалуженого живлення каскадів, коли тільки частина гілок каскаду підключається паралельно іншим каскадам, а інша частина з'єднується з ними послідовно. Встановлено існування оптимального співвідношення кількості гілок у послідовній і паралельній секціях, що відповідає максимальній ефективності каскадного ТЕО. Розроблено експериментальні зразки ТЕО з розгалуженим з'єднанням каскадів. Показано, що застосування цих схем дозволяє уникнути неприпустимого зростання чисел гілок у високотемпературних каскадах. На зразку трикаскадного ТЕО з однаковими площами каскадів досягнуто перепад температур 122 К ($T_h = 303 \text{ К}$). Застосування схеми з розгалуженням струму в нижніх ступенях шестикаскадного охолоджувача дозволило досягти перепаду температур, більшого за 152 К при відносно невеликій кількості гілок у високотемпературних каскадах.

Основний зміст роботи викладено в таких публікаціях:

1. Semenyuk V, Bezverkhov D, "Modeling and Minimization of Intercascade Thermal Resistance in Multi-Stage Thermoelectric Coolers", Proc. of the 16th Int. Conf. on Thermoelectrics (ICT'97), Dresden, Germany, 1997, IEEE (1998) pp. 701-704.
2. Vladimir A. Semenyuk, Dmitri B. Bezverkhov. "Cascade Thermoelectric Coolers with Branched Electrical Feed", Proc. of 4th European Workshop on Thermoelectrics (ETS'98), Madrid, Spain, 1998, pp. 33-37.
3. Безверхов Д.Б. "Моделирование межкаскадного термического сопротивления в каскадных термоэлектрических охладителях", "Холодильная техника та технологія", №1, вип.59, 1998, ОДАХ.
4. Безверхов Д.Б. "Оптимизация термоэлектрического охладителя с учетом термического сопротивления между каскадами", "Холодильная техника та технологія", №2, вип.59, 1998, ОДАХ.
5. Безверхов Д.Б. "Об учете термического сопротивления межкаскадных подложек при расчете каскадных термоэлектрических охладителей", "Холодильная техника та технологія", вип.64, 1999, ОДАХ.
6. Bezverkhov D.B. "Cascade thermoelectric systems with branched electrical feed", "Journal of Thermoelectricity", N3, 2000, pp. 60-75.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

α , κ , ρ - усереднені значення коефіцієнта Зеебека, теплопровідності і питомого електричного опору

ру напівпровідникового матеріалу, віднесені до середньої температури каскаду; l - висота ТЕ гілки; S - усереднена площа перерізу ТЕ гілки; n - кількість ТЕ гілок; F - сумарна площа спаїв; F_S - площа охолоджуваної підкладки каскаду; h_S - товщина підкладки; κ_S - коефіцієнт теплопровідності матеріалу підкладки; R_S - термічний опір підкладки; r_c - електричний опір одиниці площі контакту; I, i - сила і густина електричного струму; $j=I/S$ - зведена густина електричного струму; Q - повний тепловий потік; q - густина теплового потоку; P - електрична потужність; T - абсолютна температура; k - номер каскаду; N - кількість каскадів; ΔT_{max} - максимальний перепад температур, що розвивається ТЕО при відсутності теплового навантаження; ϵ - холодильний коефіцієнт. **Індекси:** S - належить до підкладки; k - належить до k -того каскаду; c - належить до холодної сторони ТЕО; h - належить до гарячої сторони ТЕО; 0 - належить до холодних спаїв каскаду; 1 - належить до гарячих спаїв каскаду; s - належить до послідовної ділянки каскаду; p - належить до паралельної ділянки каскаду.

АННОТАЦІЯ

Безверхов Д.Б. Каскадные термоэлектрические охладители для объектов полупроводниковой оптоэлектроники. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – “Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования”. – Одесская государственная академия холода”, Одесса, 2002.

В диссертации представлены результаты исследований, направленных на создание каскадных термоэлектрических охладителей (ТЕО) для интенсивных (локализованных) и распределенных (планарных) объектов полупроводниковой оптоэлектроники. Разработаны новые модельные приближения, методы и алгоритмы расчета и оптимизации каскадных ТЕО, учитывающие специфику оптоэлектронных применений. Предложена обобщенная модель каскадного ТЕО с разветвленным питанием, которая позволяет с единых позиций описать распределение электрических параметров и систему балансовых соотношений для любого частного схемного решения, включая известные схемы последовательного и параллельного соединения каскадов и их возможные комбинации. Показано, что все схемы, будучи оптимально спроектированными, характеризуются одинаковым уровнем предельной энергетической эффективности, а особенности, присущие каждой из них, влияют лишь на конфигурацию охладителя.

Подробно рассмотрена проблема оптимизации ТЕО, предназначенных для охлаждения интенсивных предельно локализованных источников теплоты (мощных полупроводниковых лазеров, усилителей мощности). Впервые сформулирована модель каскадного ТЕО, включающая совместное описание охлаждаемого объекта, термоэлектрических каскадов и межкаскадных электроизолирующих подложек с трехмерным растеканием в них теплоты. Такое модельное приближение позволило выявить и минимизировать основные источники потерь в охладителях с последовательным питанием каскадов, что открывает новые возможности для повышения их эффективности.

Показано, что использование принципа разветвленного питания позволяет реализовать новые конфигурации низкотемпературных ТЕО, согласованные по размерам с такими объектами охлаждения, как ПЗС-матрицы, матрицы фотоприемников, ИК-детекторы и иные планарные компоненты оптоэлектроники с относительно большими размерами охлаждаемой поверхности.

Результаты исследований использованы при разработке низкотемпературных ТЕО для объектов оптоэлектроники. В частности, они нашли практическое применение при создании каскадного ТЕО для мощного полупроводникового лазера (по договору с французской компанией “Marvel Thermoelectrics”) и при выполнении контракта с Институтом Космической Астрофизики Франции по разработке четырехкаскадного охладителя с разветвленным питанием, предназначенного для охлаждения фотоприемной матрицы ИК-спектрометра до температуры 120 К.

Ключевые слова: Термоэлектричество, каскадный охладитель, оптоэлектроника, полупроводниковый лазер, ИК-спектрометр, математическое моделирование, оптимизация, конструкция.

АНОТАЦІЯ

Безверхов Д.Б. Каскадні термоелектричні охолоджувачі для об'єктів напівпровідникової оптоелектроніки. - Рукопис. Дисертація на здобуття ученого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – “Холодильна і криогенна техніка, системи кондиціонування”. - Одеська державна академія холоду”, Одеса, 2002.

У дисертації подані результати досліджень, спрямованих на створення каскадних термоелектричних охолоджувачів (ТЕО) для інтенсивних (локалізованих) і розподілених (планарних) об'єктів напівпровідникової оптоелектроніки. Розроблено нові модельні наближення, узагальнені методи й алгоритми розрахунку й оптимізації каскадних ТЕО, що враховують специфіку оптоелектронних застосувань. Досліджено різні конфігурації каскадних ТЕО, включаючи відомі схеми послідовного і паралельного з'єднання каскадів і їх можливі комбінації з погляду перспектив їхнього використання для охолодження різноманітних видів оптоелектронних елементів. Описано методи узгодження їх параметрів з об'єктами охолодження. Результати досліджень використані при створенні каскадних ТЕО для елементів напівпровідникової оптоелектроніки за договором із французькою компанією “Marvel Thermoelectrics” і при виконанні контракту з Інститутом Космічної Астрофізики Франції.

Ключові слова: термоелектрика, каскадний охолоджувач, оптоелектроніка, напівпровідниковий лазер, ІЧ-спектрометр, математичне моделювання, конструкція, експеримент.

THE SUMMARY

Bezverkhov D.B. Cascade thermoelectric coolers for semiconducting optoelectronic objects. – Manuscript. Thesis for candidate of engineering science degree by specialty 05.05.14 – “Refrigerate and cryogenic technique, condition systems”. - Odessa state academy of refrigeration, Odessa, 2002.

The researches results, directional on creation of cascade thermoelectric coolers (TEC) for the intensive (localized) and distributed (planar) semiconducting optoelectronics objects are submitted. The new model approximations, generalized methods and both algorithms of calculation and optimization cascade TEC, taking into account specificity of optoelectronic applying are elaborated. The different configurations cascade TEC, including the known schemes series and parallel connection of stages and their possible combinations are investigated from the point of view of their usage outlooks for different kinds of optoelectronic elements cooling. The methods of the their parameters coordination with cooling objects are described. The outcomes of researches utilized at creation cascade TEC for semiconducting optoelectronics elements under the agreement with French company " Marvel Thermoelectrics " and at fulfillment of contract with France Institute of a Space Astrophysics.

Keywords: thermoelectricity, cascade cooler, optoelectronics, semiconducting laser, IR-spectrometer, mathematical modeling, design, experiment.

