

Автореферат
Д 39

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ДЕХТЯРУК РОМАН ІВАНОВИЧ

УДК. 621.565:537.324

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНЕ ОХОЛОДЖЕННЯ ТЕПЛОНАПРУЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

Спеціальність

05.05.14 - Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціювання

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеська національна академія харчових технологій	
Вхід. №	16/3
" 20 "	11
Осн.	п. додат.
	2012 р.
	п.

Одеса 2012

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Одеській національній академії харчових технологій (ОНАХТ) Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент Семенюк Володимир Олексійович, провідний науковий співробітник Проблемної науково-дослідницької лабораторії ОНАХТ МОНмолодьспорту України

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор Снарський Андрій Олександрович, професор кафедри загальної та теоретичної фізики національного технічного університету України «КПІ» МОНмолодьспорту України

кандидат технічних наук Смоляр Геннадій Олександрович, начальник сектору систем охолодження та теплозахисту науково-виробничого комплексу казенного підприємства Національного космічного агентства України

11⁰⁰ годині в ауд. 108 на засіданні
Одеської національної академії харчових технологій за

Орлянська, 1/3,

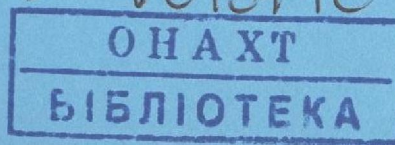
ОНАХТ 30.01.13
Термоелектричне охол



v018140

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради д.т.н., професор

В.І. Мілованов



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Мікропроцесори є найбільш поширеними елементами мікроелектроніки, які встановлюються практично у всі сучасні електронні пристрої. Тенденція до підвищення продуктивності процесорів персональних комп'ютерів (ППК) веде до постійного збільшення щільності транзисторів у їх ядрі, і це супроводжується пропорційним зростанням потужності, що розсіюється. Як і всі електронні компоненти, ППК має температурні обмеження: температура ядра процесора не повинна перевищувати критичного рівня, вище якого може спостерігатися прискорена деградація ППК і його катастрофічне руйнування. В умовах розмірних обмежень, типових для сучасних ПК, ефективність стандартних систем охолодження досягла своєї межі, що є основним чинником, який стримує подальше підвищення продуктивності цієї техніки. Використання термоелектричного охолодження відкриває нові можливості для подальшого розширення діапазону потужності ППК. У зв'язку з цим створення термоелектричних охолоджувачів (ТЕО) сумісних з ППК за розмірами і щільністю потоку теплоти є важливим і актуальним завданням.

Все сказане вище в рівній мірі відноситься до іншого класу електронних елементів - напівпровідникових світловипромінюючих діодів (СВД). Такі параметри СВД як термін служби, світність і довжина хвилі істотно залежать від його робочої температури. З появою нових потужних СВД підтримання їх теплового режиму стає проблемою першорядної важливості. У цих умовах розробка і застосування ефективних систем термоелектричного охолодження є важливою і актуальною задачею, вирішення якої дозволить поліпшити робочі параметри, надійність і тривалість роботи світловипромінюючих діодів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження проводилися в рамках пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки «Нові речовини та матеріали» (секція «Приладобудування») при виконанні ряду наукових програм Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України в Проблемній науково-дослідній лабораторії з холодильної техніки Одеської державної академії холоду, в тому числі:

1. «Розробка теоретичних і технологічних основ термоелектричного охолодження потужних процесорів сучасних персональних комп'ютерів», наказ МОН від 17.11.2008 № 1043, шифр: МК09/10, державний реєстраційний номер - № 0111U004003.

2. «Розробка термоелектричних охолоджувачів для потужних процесорів персональних комп'ютерів», наказ МОН від 30.11.2010 № 1177, шифр: МК11/03, державний реєстраційний номер - № 0111U004003.

Мета і завдання дослідження: підвищення функціональних характеристик теплонапружених об'єктів електроніки та оптоелектроніки шляхом інтегрування ТЕО в стандартну систему охолодження. Для досягнення зазначеної мети поставлені і вирішені наступні завдання:

- Побудувати фізичну модель термоелектричної системи охолодження, що включає охолоджуваний об'єкт, ТЕО і теплообмінник в їх тепловій взаємодії;

враховувати температурну залежність параметрів термоелектричних матеріалів і вплив термічних опорів на зовнішніх границях ТЕО; для розрахунку термічних опорів використати модель тривимірного розподілу температур в окремих елементах системи;

- Розробити алгоритм методу оптимізації об'єкта, що поєднує рішення системи рівнянь балансу теплоти на границях ТЕО з рішенням крайових задач для рівняння стаціонарної теплопровідності в приєднаних елементах;

- Використати зазначений алгоритм для оптимізації систем охолодження процесора Intel Core i7-800 та СВД модель W724C0 з потужністю 11,8 Вт;

- Провести розрахунки параметрів термоелектричних систем охолодження з урахуванням впливу різних факторів на їх ефективність, включаючи вплив контактних електричних опорів і термічних опорів на зовнішніх границях ТЕО;

- Оцінити теоретично граничні можливості підвищення ефекту від застосування термоелектричного охолодження (для ППК - граничне підвищення потужності, для СВД - максимальне зниження температури р-п переходу);

- Провести порівняння результатів для термоелектричної і пасивної систем охолодження, укомплектованих однаковими теплообмінниками;

- Розробити експериментальні зразки систем охолодження для сучасного процесора компанії Intel та для потужного СВД з тепловиділенням більше 10 Вт;

- Провести випробування експериментальних зразків з різними теплообмінниками в широкому діапазоні температур навколишнього середовища.

Об'єкт дослідження: система термоелектричного охолодження теплонапружених елементів електроніки та оптоелектроніки.

Предмет дослідження: Підвищення функціональних характеристик теплонапружених об'єктів електроніки та оптоелектроніки шляхом інтегрування ТЕО в систему охолодження.

Методи дослідження: теоретичні узагальнення, математичне моделювання, аналітичні та чисельні методи розрахунків, експериментальна перевірка теоретичних результатів і висновків.

Наукова новизна. У роботі отримані такі наукові результати:

- Запропонована фізична модель для опису термоелектричної системи охолодження і розроблені теоретичні основи оптимального узгодження її компонентів, включаючи охолоджуваний об'єкт, ТЕО і теплообмінник в їх тепловій взаємодії. Особливістю розробленого підходу є ідентифікація термічних опорів на границях ТЕО з урахуванням тривимірного розподілу температури в окремих елементах системи.

- Розроблено алгоритм оптимізації системи, що поєднує рішення рівнянь балансу теплоти на границях ТЕО з рішенням крайових задач для рівняння стаціонарної теплопровідності в приєднаних елементах.

- Вперше показано теоретично і підтверджено експериментально можливість підвищення потужності процесора на 17-25% при термоелектричному охолодженні із зовнішнього боку теплового моста

процесора. Встановлено, що для досягнення цього результату необхідно забезпечити електричне контактний опір на рівні від 10^{-7} до $10^{-6} \text{ Ом} \times \text{см}^2$, і при цьому термічні опори на зовнішніх границях ТЕО повинні бути зведені до мінімуму.

- Вперше показано, що перевага термоелектричного охолодження збільшується при використанні ППК в умовах підвищених температур навколишнього середовища. При температурі усередині системного блоку ПК близько 60°C потужність ППК може бути подвоєна. При температурі середовища, що перевищує або дорівнює граничній допустимій температурі процесора, термоелектричне охолодження стає єдиним засобом підтримки теплового режиму ППК.

- Поставлена і вирішена задача про досягнення мінімальної температури СВД при інтегруванні ТЕО в пасивну систему охолодження. Встановлено що при використанні термоелектричного охолодження можливо знизити робочу температуру СВД на 30°C , що збільшує його термін служби більш ніж на 200%.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і результатів підтверджується використанням сучасних математичних методів і задовільним узгодженням розрахункових та експериментальних даних.

Практичне значення одержаних результатів визначається покращенням параметрів досліджених об'єктів електроніки та оптоелектроніки при термоелектричному охолодженні. Розроблені в процесі досліджень охолоджувачі випереджають існуючі зразки по щільності потоку теплоти, що дозволяє поєднувати їх з такими теплонапруженими об'єктами як процесор сучасного ПК. Також розроблені нові конфігурації термоелектричних охолоджувачів для підтримки теплових режимів потужних СВД, призначених для дальнього світла фар в сучасних автомобілях.

Охолоджувачі впроваджені на підприємстві «Терміон», яке здійснює серійний випуск мініатюрних ТЕО для охолодження мініатюрних об'єктів електроніки та оптоелектроніки.

Особистий внесок здобувача полягає в розробці узагальнених математичних моделей і алгоритмів оптимізації системи термоелектричного охолодження. Особисто здобувачем розроблені нові конструкції ТЕО, адаптовані для охолодження енергоспоживаючих електронних компонентів, створені експериментальні стенди, проведені експериментальні дослідження, а також проведено обробку, аналіз і публікування отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались особисто здобувачем на VIII європейській конференції з термоелектрики (м. Комо, Італія, 2010 р.), на XIV міжнародному форумі з термоелектрики (м. Москва, Росія, 2011 р.), на IX європейській конференції з термоелектрики (м. Салоніки, Греція, 2011р.), на XXXI міжнародній та X європейській конференціях з термоелектрики (м. Аалборг, Данія, 2012 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в чотирьох статтях у міжнародних наукових журналах та у двох збірниках праць європейських наукових конференцій з термоелектрики.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури і двох додатків. Робота містить 119 сторінок тексту, 48 рисунків, 20 таблиць і список літератури з 103 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, відображено зв'язок роботи з науковими програмами, в загальному вигляді сформульовані цілі й завдання проведених досліджень.

У першому розділі наведено огляд теплових характеристик сучасних ППК і потужних СВД. Представлений детальний аналіз ефективності існуючих стандартних систем охолодження, призначених для підтримки теплових режимів цих пристроїв. Обговорюються перспективи використання ТЕО в системах охолодження ППК і СВД. Сформульовано конкретні напрями досліджень.

У розділі 2 викладені теоретичні основи оптимального узгодження елементів термоелектричної системи, призначеної для охолодження теплонапружених об'єктів напівпровідникової електроніки і оптоелектроніки. Побудована модель системи, що включає мініатюрний охолоджуваний об'єкт, ТЕО і теплообмінник в їх тепловій взаємодії. Для опису ТЕО в режимі охолодження використовуються рівняння балансу теплоти на його спаях у вигляді:

$$\begin{aligned} Q_0 &= F \left(\alpha i T_0 - \frac{1}{2} i^2 (\rho l + 2R_c) - \frac{\kappa}{l} (T_h - T_0) \right), \\ Q_h &= F \left(\alpha i T_h + \frac{1}{2} i^2 (\rho l + 2R_c) - \frac{\kappa}{l} (T_h - T_0) \right), \\ T_0 &= T_c - Q_0 R_0, \quad T_h = T_a - Q_h R_h, \end{aligned} \quad (1)$$

де Q_0 і Q_h - теплові потоки на холодній та гарячій сторонах ТЕО відповідно; F - сумарна площа холодних/гарячих спайів ТЕО; T_c - температура охолоджуваного об'єкту; T_a - температура навколишнього середовища; T_0 і T_h - середньоінтегральні значення температур холодних і гарячих спайів; l - висота термоелектричної гілки; i - щільність електричного струму; α , ρ , κ - усереднені для матеріалів Р- та N-типів провідності коефіцієнт Зеебека, питомий електричний опір і коефіцієнт теплопровідності відповідно, віднесені до середньої температури термоелемента; R_c - контактний електричний опір; R_h та R_0 - термічні опори на гарячій і холодній сторонах ТЕО відповідно.

Важливим етапом цього дослідження є ідентифікація термічних опорів на холодній та гарячій сторонах ТЕО R_0 та R_h . Оскільки розміри компонентів системи можуть істотно відрізнятися, має місце тривимірний розподіл температури в тих її частинах, які прилягають до спайів охолоджувача. Внаслідок цього для оцінки термічних опорів R_0 та R_h необхідно здійснювати

рішення крайових задач для рівняння стаціонарної теплопровідності. У цьому полягає новизна постановки задачі та складність її вирішення. Для одношарових теплових мостів використовувався аналітичний підхід. У більш складних випадках багатошарових структур розрахунки проводилися з використанням чисельних методів.

Детально розглянуто питання коректної оцінки термічного опору в холодній підкладці ТЕО і в основі теплообмінника. В обох випадках в якості базової використана модель прямокутної пластини розміром $F_1=2A \times 2B$ товщиною h з джерелом теплоти розміром $F_0=2a \times 2b$ ($a < A$, $b < B$) в центрі її поверхні. Прийнято, що тепловий потік від джерела Q входить в пластину рівномірно через площадку F_0 і виходить через всю нижню поверхню F_1 . На нижній грані пластини розглядається лінійна гранична умова загального вигляду:

$$\frac{\partial T(x, y, h)}{\partial z} + c_1 T(x, y, h) = c_2 \quad (2)$$

з постійними коефіцієнтами c_1 і c_2 . Решта поверхні пластини адіабатично ізольована.

Рішення сформульованої крайової задачі для рівняння Лапласа приводить до наступного співвідношення стосовно термічного опору пластини:

$$R_b = \frac{h}{\lambda F_1} (1 + \phi(a, b, A, B, h, c_1)) \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned} \phi(a, b, A, B, h, c_1) &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin \nu a}{\nu a} \right)^2 G_{\nu} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\sin \mu b}{\mu b} \right)^2 G_{\mu} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\sin \nu a}{\nu a} \right)^2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\sin \mu b}{\mu b} \right)^2 G_{\eta}, \\ \nu &= \frac{n\pi}{A}, \quad \mu = \frac{m\pi}{B}, \quad \eta^2 = \nu^2 + \mu^2, \\ G_{\vartheta} &= \frac{1}{\vartheta h} \frac{c_1 \tanh \vartheta h + \vartheta}{c_1 + \vartheta \tanh \vartheta h}, \quad \vartheta = \nu, \mu, \eta. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут термічний опір визначено як відношення різниць середньоінтегральних температур в площинах F_0 і F_1 до повного потоку теплоти через пластину. Комплекс $h/(\lambda F_1)$ у співвідношенні (3) визначає мінімальне значення $R_b = R_{b\min}$ для граничного (одновимірного) випадку, коли розміри джерела теплоти збігаються з розмірами пластини. Функція ϕ характеризується співвідношенням:

$$\phi = \begin{cases} 0, & a = A, \quad b = B \\ > 0, & a < A \text{ и/или } b < B \end{cases} \quad (5)$$

та має характер поправки, тобто визначає збільшення термічного опору пластини для випадку $a < A$ та/або $b < B$.

Показано, що гранична умова виду (2) виконується як для холодної пластини ТЕО, так і для основи ребристого теплообмінника, але коефіцієнти c_1 і c_2 для цих випадків різні. Зауважимо, що коефіцієнт c_2 не входить у вираз для R_b і тому далі не конкретизується. Що стосується коефіцієнта c_1 , то для холодної підкладки ТЕО його значення визначається співвідношенням

$$c_{1s} = \frac{\beta}{\lambda} \left(\alpha_i + \frac{\kappa}{l} \right), \quad (6)$$

а для теплообмінника має місце рівняння:

$$c_{1t} = \frac{\alpha_e}{\lambda}, \quad (7)$$

де $\beta = F/F_1$ - щільність упаковки термоелементів; α_e - ефективне значення коефіцієнта тепловіддачі, приведене до площі основи теплообмінника. Тут і далі індекси s та t відносяться до підкладки ТЕО і до основи теплообмінника відповідно.

Залежності (3) і (4) придатні для обчислення термічних опорів як для холодної підкладки ТЕО, так і для основи теплообмінника, але в кожному конкретному випадку повинні підставлятися відповідні розміри джерела теплоти і теплопровідної пластини. Відповідні підстановки мають вигляд:

$$R_{bs} = \frac{h_s}{\lambda_s F_1} (1 + \phi(a, b, A, B, h_s, c_{1s})) \quad (8)$$

$$R_{bt} = \frac{h_t}{\lambda_t F_1} (1 + \phi(A, B, A_t, B_t, h_t, c_{1t})) \quad (9)$$

де $F_1 = 4A_t B_t$.

Зауважимо, що співвідношення (6) для коефіцієнта c_{1s} містить щільність електричного струму живлення ТЕО. З цього, зокрема, випливає, що термічний опір холодної підкладки ТЕО R_{bs} не є універсальною функцією її розмірів, але залежить також від режиму роботи охолоджувача. Цей факт враховувався при варіюванні струму живлення ТЕО в процесі пошуку оптимальних рішень.

Для опису повного термічного опору теплообмінника використовувалося співвідношення:

$$R_t = R_{bt} + \frac{1}{\alpha_e F_1}, \quad (10)$$

Останній додаток в правій частині (10) являє собою термічний опір ребристого пакета.

Якщо значення α_e відомо, співвідношення (3), (4), (7), (9) і (10) дозволяють розрахувати термічний опір теплообмінника R_t при будь-яких розмірах джерела

теплоти. Таким чином, визначення достовірного значення α_e є однією з ключових проблем. Дане дослідження орієнтоване на використання сучасних стандартних теплообмінників, які застосовуються у мікроелектроніці. Зокрема в даній роботі застосовувалися високоефективні теплообмінники японської компанії Alpha. Такі вироби забезпечуються даними про термічні опори, отримані в експерименті компанії-виробника із застосуванням мініатюрного імітатора джерела теплоти фіксованих розмірів. Ідея полягає в тому, щоб визначати величину α_e на підставі тільки одного цього експерименту. Розроблений алгоритм методу реалізації цієї концепції, заснований на мінімізації квадратичної нев'язки між експериментально визначеною величиною R_t та її теоретичним значенням, розрахованим на основі моделі тривимірного розподілу температури в основі теплообмінника. Проведено коригування даних щодо термічних опорів теплообмінників серії LPD компанії Alpha для випадків, коли реальні розміри джерела теплоти відрізняються від розмірів імітатора теплового навантаження, використаного в експериментах виробника. Встановлено, що в умовах вільної конвекції, коли визначальним є термічний опір ребристого пакету, уточнення параметру R_t не перевищує 8%. Значно більше відхилення реального значення R_t від його довідкового значення (до 300%) може мати місце для випадку вимушеної конвекції, коли визначним стає термічний опір розтіканню теплоти в основі теплообмінника.

В реальних пристроях термічний опір на холодній стороні ТЕО R_0 , крім опору холодної підкладки R_{bs} , може включати також внутрішній термічний опір самого електронного елемента R_i та опори прошарків теплопровідного матеріалу на границях елементів системи ΔR_0 и ΔR_h . Для розрахунку термічного опору цих елементів використовувалася одновимірна модель теплопровідності. Повний термічний опір на спаях термоелементів визначався за формулами:

$$\begin{aligned} R_0 &= R_{bs} + R_i + \Delta R_0, \\ R_h &= R_i + \Delta R_h. \end{aligned} \quad (11)$$

Наведені вище співвідношення (1)-(11) складають теоретичну базу для оптимального узгодження елементів термоелектричної системи. В даній роботі розглядаються дві можливі постановки задачі оптимізації:

- Максимальне підвищення потужності електронного елемента при збереженні безпечної температури його активної області. Така постановка характерна, наприклад, для охолодження процесора персонального комп'ютера, температура якого не повинна перевищувати заданого граничного значення. Ця задача розглядається в розділі 3 дисертації;
- Досягнення мінімальної температури активної області електронного елемента при його фіксованій потужності. Така постановка завдання характерна, наприклад, для охолодження потужних світлодіодів, термін служби і світність яких істотно залежать від робочої температури. Ця задача розглянута в розділі 4 дисертації.

Для пошуку оптимальних рішень варіюються цілісність струму i , висота термоелектричної гілки l та/або сумарна площа холодних спайів ТЕО l' . В

обох випадках завдання оптимізації вирішувалася за допомогою стандартного алгоритму пошуку екстремуму функції кількох перемінних. Специфіка і складність розв'язуваної задачі полягає в тому, що властивості термоелектричного матеріалу істотно залежать від температури. Оскільки середня температура спаїв спочатку невідома, параметри α , ρ , λ не можуть бути точно визначені. Таким чином, має місце проблема невизначеності вхідних даних. Для її вирішення використаний алгоритм методу ітерацій з послідовним наближенням до шуканого результату.

Інша складність полягає в тому, що при варіюванні площі ТЕО у пошуках оптимальних рішень термічні опори на границях ТЕО з прилеглими об'єктами не залишаються постійними у зв'язку зі зміною співвідношень розмірів елементів системи. Ці зміни враховуються для отримання достовірних результатів.

Розроблено алгоритм на основі методу послідовних наближень для оптимізації системи термоелектричного охолодження, що поєднує в собі рішення крайових задач для рівняння тривимірної стаціонарної теплопровідності в елементах структури з рішенням системи рівнянь балансу теплоти на границях ТЕО. Запропоновані теоретичні підходи використані при створенні термоелектричних систем для охолодження потужних світлодіодів і процесорів персональних комп'ютерів.

У розділі 3 досліджується можливість підвищення потужності процесора персонального комп'ютера (ППК) шляхом інтегрування ТЕО в стандартну систему теплообміну. Розглядається стандартний процесорний блок (рис.1), що містить кремнієвий кристал (ядро процесора), ребристий теплообмінник з вентилятором і встановлений між ними мідний тепловий міст (ТМ). Для покращення теплового контакту використовуються прошарки теплопровідних матеріалів TIM1 і TIM2. Тепловий потік Q , що розсіюється в кремнієвому кристалі, проходить через вказані компоненти в навколишнє середовище з температурою T_a . В практиці пасивного охолодження вимірюється і контролюється температура в центрі зовнішньої поверхні ТМ. Максимальне допустиме значення цієї температури задається виробником з міркувань надійності та ресурсу роботи ППК.

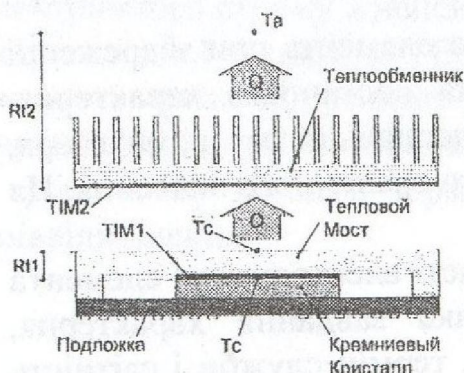


Рис. 1. Схема процесорного блоку (вентилятор не показано).

Рис. 2 ілюструє межі застосування пасивного охолодження. При заданому тепловому опорі теплообмінника R_{12} , температура корпусу ТМ лінійно зростає від температури навколишнього середовища T_a (при нульовій потужності ППК) до максимально допустимої температури $\bar{T}_c = T_a + Q_p R_{12}$ при номінальній потужності процесора Q_p (ліва область на рис. 2). Подальше підвищення потужності неприпустимо, оскільки це призводить до

недопустимого перегріву активної області процесора.

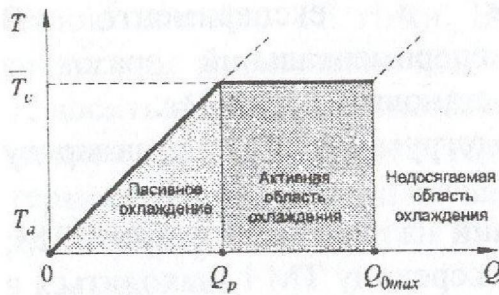


Рис. 2. Типічна залежність температури процесору від його потужності при різних методах охолодження.

Розглянуто питання щодо перспективи застосування термоелектричного охолодження для підвищення потужності процесора до її максимального досяжного значення $Q_{0max} > Q_p$ при збереженні його температури на безпечному рівні (середня область на рис. 2). Показано, що при реалізації цієї концепції виникають істотні труднощі. По-перше, щільність потоків теплоти для сучасного ППК (100 Вт/см^2 та

більше) багаторазово перевищує таку для стандартних ТЕО. В результаті виникає проблема розмірного узгодження цих компонентів. Інша проблема полягає в тому, що ТЕО сам по собі є споживачем енергії, що посилює проблему відводу теплоти. В результаті очікуване покращення може не досягатися. Цим пояснюється той факт, що багаторазові спроби використання ТЕО для охолодження ППК не дали позитивних результатів. Показано, що тільки оптимальне узгодження всіх елементів системи в їх тепловій взаємодії в сукупності з максимальним зниженням супутніх незворотних втрат може призводити до позитивного вирішення поставленої задачі.

В якості об'єкта досліджень обрано процесор Intel Core i7-800, параметри якого наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Геометричні та теплові характеристики процесора Intel Core i7-800

Розміри (мм)		Максимальна температура (°C)		Номінальна потужність Q_p ($T_a=45^\circ\text{C}$, $R_{\Sigma}=0,29$ K/W)
Ядро	Тепловий міст	Корпус процесора	ядро	
11x13	31x31x1,5	72,5	75	95 Вт

Відповідно до документації компанії-виробника (Intel Thermal/Mechanical Specifications and Design Guidelines), максимальна температура корпусу процесора $\bar{T}_c$, яка може підтримуватися тривалий час без деградації ядра, складає $72,5^\circ\text{C}$. Наведена в таблиці 1 максимальна потужність 95 Вт встановлена для таких умов: $T_a=45^\circ\text{C}$, термічний опір теплообмінника $R_{\Sigma}=0,29 \text{ К/Вт}$, що відповідає досягненню зазначеної граничної температури процесора в стаціонарному режимі. Вимога $\bar{T}_c \leq 72,5^\circ\text{C}$ є головною. При підвищенні температури навколишнього середовища та/або при використанні теплообмінників з більш високим термічним опором потужність процесора повинна бути знижена відповідно до співвідношення $Q_p = (\bar{T}_c - T_a) / R_{\Sigma}$. Зазначена в таблиці 1 температура ядра процесора $T_c=75^\circ\text{C}$ обчислювалась методом кінцевих елементів з урахуванням наведених розмірних характеристик ядра процесора і теплового моста. Саме ця температура розглядалася в якості статистичної при оптимізації системи.

Розділ 3 складається з двох частин - теоретичної та експериментальної. У теоретичній частині проведено детальне дослідження можливості підвищення потужності процесора Intel Core i7-800 при використанні ТЕО в сукупності з теплообмінником з нормованим значенням $R_{\Sigma}=0,29 \text{ К/Вт}$, а також у зборі з

реальним теплообмінником, використаним в експерименті. В експериментальній частині досліджувався експериментальний зразок з теплообмінником, реальний термічний опір якого становить 0,32 К/Вт.

Запропоновано два конструктивних варіанта інтегрування ТЕО в стандартну систему охолодження (Рис 3):

- Варіант 1: ТЕО розміром 30×30 мм розташований на зовнішній стороні ТМ;
- Варіант 2: ТЕО розміром 13×13 мм вбудований всередину ТМ і знаходиться в безпосередньому контакті з ядром ППК.

Площа охолоджувача фіксувалася, виходячи з умов погодження його розмірів з розмірами теплового моста у варіанті 1 і з розмірами кремнієвого кристалу у варіанті 2.

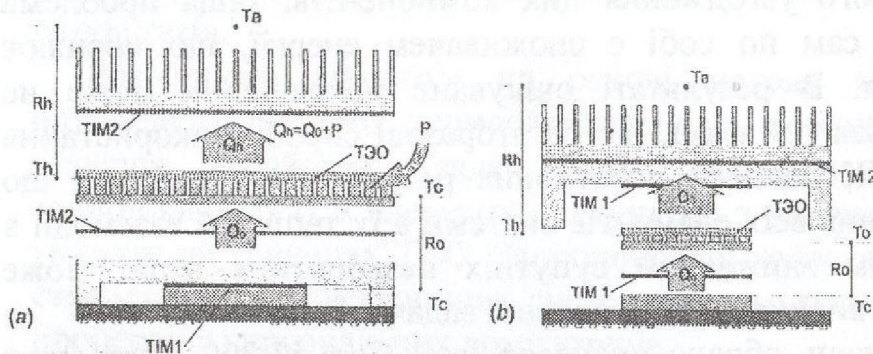


Рис. 3. Варіанти систем термоелектричного охолодження ППК: а) варіант з зовнішнім розташуванням ТЕО; б) встроєний варіант.

Площа спаїв F прийнята 6,4 см² для варіанту 1 і 1,17 см² для варіанта 2, що відповідає щільності упаковки гілок термоелементів порядку 0,7. Визначення термічних опорів R_0 та R_h для випадків

пасивного охолодження проводилося чисельним методом кінцевих елементів з урахуванням конкретних розмірів компонентів системи та їх теплопровідності. Для випадку термоелектричного охолодження використано аналітичний метод, описаний в розділі 2. Розраховані значення параметрів T_c , R_0 , R_h та фіксовані значення площі спаїв F використовувалися в якості вхідних даних для системи рівнянь (1). Враховувалася типова температурна залежність термоелектричних параметрів напівпровідникових матеріалів на основі телуриду вісмуту. З цими вхідними даними визначалися значення $i = i_0$ та $l = l_0$, які доставляють максимум функції $Q_0(i, l)$, заданої системою рівнянь (1). Результати розрахунків для двох варіантів розташування ТЕО приведено на рис 4-7.

Встановлено, що для варіанту 1 із зовнішнім розташуванням ТЕО оптимальною є висота гілки порядку 0.3-0.4 мм, в той час як для вбудованого варіанту охолоджувача розміром 13×13 мм висота гілки складає всього лише 60-70 мкм, що робить проблематичною можливість його реалізації. На рис. 4 показана залежність максимальної потужності процесора від контактного електричного опору для обох варіантів вбудовування ТЕО. Тут же для порівняння показана максимальна потужність процесора при пасивному охолодженні з тим же теплообмінником (горизонтальна лінія). Видно, що при використанні термоелектричного охолодження потужність процесора може бути збільшена на 20% (з 95 до 115 Вт) в порівнянні з варіантом пасивного охолодження. Для досягнення цього результату необхідно забезпечити контактне електричний опір на рівні не вище ніж 10⁻⁷ Ом×см². Зростання R_c призводить до істотного зниження ефективності ТЕО. При цьому для варіанта 2 спостерігається більш різке погіршення характеристик ТЕО, що пов'язано з

малою висотою ТЕ гілки. Внаслідок цього вплив контактного електричного опору стає надзвичайно критичним для цього випадку. Що стосується варіанту 1, досить висока ефективність ТЕО зберігається аж до $R_c = 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ завдяки істотно більшій висоті термоелементів. Граничні значення R_c , при яких термоелектричне охолодження вже не дає переваги, становлять $9 \times 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ для варіанту 1 та $1,5 \times 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ для варіанту 2.

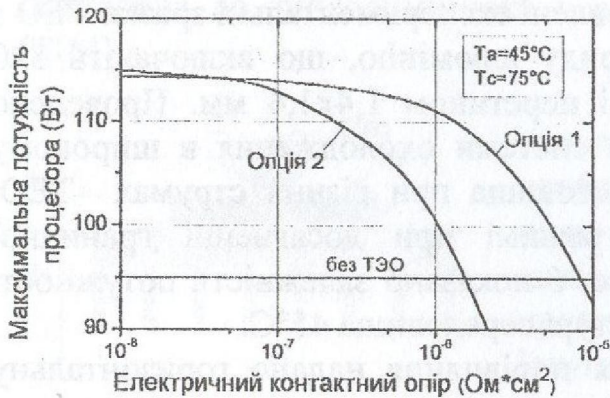


Рис. 4. Залежність максимальної потужності процесора від контактної електричного опору. Температура ППК підтримується на рівні 75.1°C .

процесора використовувався нагрівач у вигляді керамічної пластини Al_2O_3 розміром $11 \times 13 \times 0,5 \text{ мм}$ з тонкоплівковим резистивним нагрівачем на її поверхні. Пластину припаяно до стандартного теплового моста розміром $31 \times 31 \times 1,5 \text{ мм}$. Для відводу теплоти в навколишнє середовище використовувався теплообмінник з вентилятором «Alpine 7» компанії Arctic.

Спочатку були проведені випробування системи без ТЕО при температурі середовища 45°C . Встановлено, що максимальна потужність нагрівача, при якій його температура досягає граничного допустимого значення 75°C , становить 75 Вт . Це визначає максимальну потужність процесора при використанні теплообмінника «Alpine 7». У ході цього експерименту були також визначені реальні термічні опори теплового моста ($0,08 \text{ К/Вт}$) і теплообмінника ($R_2 = 0,32 \text{ К/Вт}$). Уточнені дані для граничної потужності джерела теплоти при пасивному охолодженні і для термічних опорів елементів системи використані для пошуку оптимальних характеристик експериментального зразка ТЕО. Крім того, у розрахунках використані експериментальні дані щодо температурної залежності термоелектричних властивостей використаних напівпровідникових матеріалів. Результати розрахунків приведені в таблиці 2.

Для підтвердження теоретичних очікувань виконані експериментальні дослідження по створенню термоелектричної системи для охолодження процесора Intel Core i7-800. Оскільки в даний час відсутня технологія виготовлення термоелементів в діапазоні висот від 20 до 100 мкм , варіант вбудованого ТЕО не розглядався. До реалізації був прийнятий варіант 1 із зовнішнім розташуванням ТЕО (рис. 5). В якості імітатора теплового навантаження від

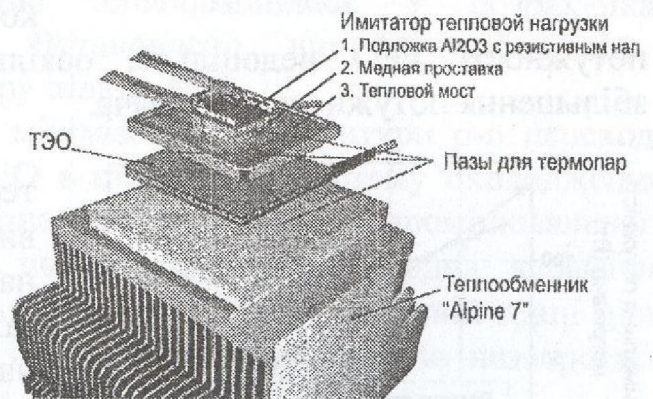


Рис. 5. Експериментальний зразок термоелектричної системи для охолодження процесора Intel Core i7-800.

Таблиця 2. Параметри оптимізованого експериментального зразка ТЕО
 $(T_a=45^\circ\text{C}, R_c=10^6 \text{ Ом} \times \text{см}, R_0=0,084 \text{ К/Вт}, R_d=0,324 \text{ К/Вт})$

Розміри ТЕО (мм)	Разміри ТЕ гілок (мм)		Кіль- кість гілок	Екстримальні параметри ТЕО у вакуумі				Параметри ТЕО в режимі охолодження ППК			
	Висота	Перетин		I_{max}, A	$U_{\text{max}}, \text{В}$	$\Delta T_{\text{max}}, \text{К}$	$Q_{0\text{max}}, \text{Вт}$	I, A	$U, \text{В}$	$Q_0, \text{Вт}$	COP
30×30×1,95	0.29	1,4×1,4	320	32	18,7	71	347	8	6,8	90,4	1,3

З урахуванням отриманих даних виготовлені експериментальні зразки ТЕО з керамічними підкладками на основі нітриду алюмінію, що включають 320 термоелектричних гілок висотою 0,3 мм і перетином 1,4×1,4 мм. Проведено випробування експериментального зразка системи охолодження в широкому діапазоні температур навколишнього середовища при різних струмах ТЕО. Виміри проводилися в стаціонарному режимі при досягненні граничної температури нагрівача рівної 75°C . На рис. 6 показано залежність потужності нагрівача від потужності ТЕО при температурі середовища 45°C .

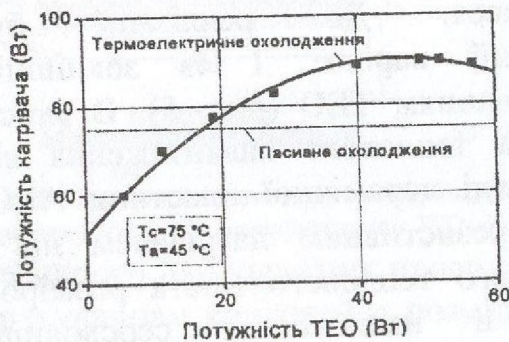


Рис. 6. Залежність максимальної потужності нагрівача від потужності ТЕО.

потужності ТЕО недоцільне, оскільки це не призводить до помітного збільшення потужності нагрівача.



Рис. 7. Порівняння ефективностей термоелектричної та стандартної системи охолодження при різних температурах середовища.

Для порівняння надано горизонтальну лінію на рівні $Q_{p\text{max}}=75 \text{ Вт}$, яка відповідає максимальній потужності імітатора теплового навантаження при пасивному охолодженні з тим же теплообмінником. Видно, що при використанні ТЕО потужність процесора збільшується на 20% (від 75 до 90 Вт). Цей результат досягається при потужності ТЕО 40 Вт, що відповідає значенню холодильного коефіцієнта 2,25. Подальше збільшення

Обидві системи охолодження, термоелектрична та стандартна, випробовувалися при різних температурах навколишнього середовища. Відповідні залежності максимальної потужності нагрівача від T_a для обох систем зображено на рис 7.

Точки на графіку відповідають вимірам. Криві розраховані за методикою, викладеною в розділі 2 з урахуванням реальних значень термічних опорів елементів системи, отриманих в експерименті. Видно, що теоретичні

розрахунки знаходяться в доброму узгодженні з результатами вимірювань. З рис. 7 видно, що переваги термоелектричного охолодження істотно зростають з підвищенням температури навколишнього середовища. При $T_a=60^\circ\text{C}$ максимальна потужність процесора може бути збільшена вдвічі. Навіть при

75°C, коли використання стандартного методу охолодження стає принципово неможливим, використання ТЕО дозволяє реалізувати потужність процесора на рівні 50 Вт.

Розділ 4 присвячений проблемі підтримання безпечних теплових режимів потужних світловипромінюючих діодів. Спочатку розглянута фізична модель існуючої (пасивної) охолоджуючої системи (рис. 8), що містить СВД, припаяний до стандартної електроізолюваної металевої підкладки (ЕМП), яка приєднана до теплообмінника через тонкий шар теплопровідного матеріалу (TIM).

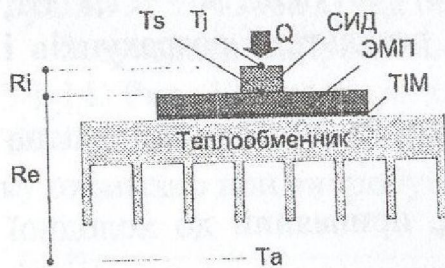


Рис. 8. Принципова схема світловипромінюючого пристрою з стандартним охолодженням.

Показано, що максимальне зниження температури p-n переходу СВД є ключовою проблемою, вирішення якої сприятиме підвищенню світності і терміну служби напівпровідникових світловипромінювальних приладів. Проведено аналіз незворотних втрат в існуючій системі охолодження СВД з метою визначення можливих шляхів їх усунення. Температура p-n переходу T_j визначалася за формулою

$$T_j = T_a + Q(R_i + R_e), \quad (12)$$

де Q - теплота, що розсіюється в p-n переході, R_i - внутрішній термічний опір СВД (специфіковано компанією-виробником), R_e - зовнішній термічний опір, що включає термічний опір ЕМП, теплопровідного прошарку і теплообмінника.

Для визначення параметра R_e розглядалася тривимірна модель розподілу температур в підкладці і в основі теплообмінника. У розрахунках використовувався чисельний метод. Встановлено, що переважаючим є термічний опір електроізоляційного шару підкладки.

Поставлена і вирішена задача про мінімізацію температури p-n переходу шляхом оптимального інтегруванні ТЕО в стандартну систему охолодження. Вперше запропонована конструктивна схема світловипромінювального пристрою, в якому в якості ЕМП використовується холодна керамічна підкладка ТЕО з відповідним рисунком металізації на її зовнішній грані (рис. 9). Таке технічне рішення дозволило усунути основне джерело незворотних втрат стандартної системи охолодження.

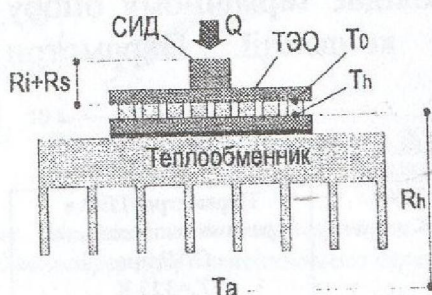


Рис. 9. Принципова схема світловипромінюючого пристрою з термоелектричним охолодженням.

Сформульовано задачу оптимального узгодження компонентів системи для досягнення мінімальної температури p-n переходу СВД при збереженні його потужності. У якості вихідних використовувалися співвідношення (1) при додатковій умові $Q_0 = Q = \text{const}$. Для обчислення термічних опорів на холодній та гарячих сторонах ТЕО використовувалися аналітичні залежності (3) і (4). Для забезпечення досить високої щільності теплового потоку на холодній грані ТЕО

розглядався варіант охолоджувача з висотою гілки $l=0.5$ мм. В процесі оптимізації варіювалися площа спаїв F та щільність електричного струму i . Для будь-якого заданого набору цих параметрів система (1) разом з (12) однозначно визначає невідомі змінні T_j, T_c, T_h и Q_h . Завдання полягає в тому, щоб знайти таку пару параметрів $F=F_0$ и $i=i_0$, які забезпечують виконання умови $T_j(F,i)=\min$. Завдання вирішується за допомогою стандартного алгоритму пошуку максимуму функції декількох змінних.

Описаний вище алгоритм використано при розробці експериментальних зразків світловипромінювачів з термоелектричним охолодженням на основі СВД компанії Seoul Semiconductor, модель W724C0 (потужність - 11,8 Вт, внутрішній термічний опір 3 К/Вт). Порівнювалися результати розрахунків і випробувань для двох варіантів пристроїв:

1. варіант пасивного охолодження: СВД в зборі з ЕМП встановлено безпосередньо на теплообміннику;

2. варіант термоелектричного охолодження: СВД, припаяний до холодної підкладці ТЕО, який встановлено на теплообмінник.

Фотографії дослідних зразків представлені на рис. 10, 11, та 12 (теплообмінник не показаний).



Рис. 10. ЕМП компанії Bergquist

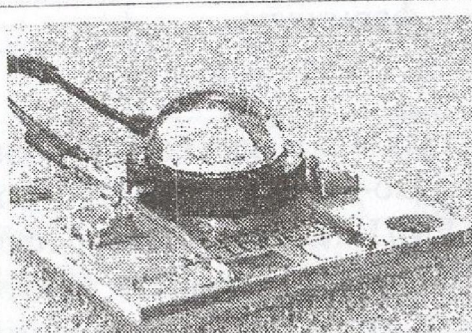


Рис. 11. Варіант пасивного охолодження

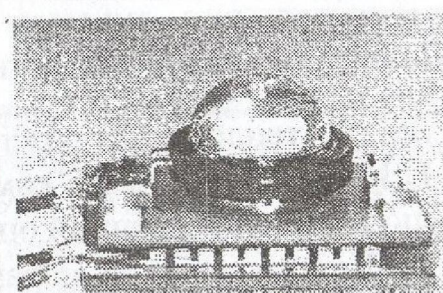


Рис. 12. Варіант термоелектричного охолодження

В якості ЕМП для варіанту 1 використано стандартну тришарову підкладку розміром 25×25 мм, яка надана компанією Bergquist. Для варіанту 2 виготовлялися ТЕО з керамічними металізованими підкладками на основі нітриду алюмінію. В обох випадках для відводу теплоти в навколишнє середовище використовувалися теплообмінники японської компанії Alpha серії LPD с термічним опором у діапазоні від 1,75 до 3,7 К/Вт. Оптимізація ТЕО проведена для умов: $T_a=45^\circ\text{C}$, $R_t=1,75$ К/Вт, що відповідає термічному опорі теплообмінника LPD100-40B в умовах вільної конвекції. Параметри оптимального ТЕО надані в таблиці 3.

Таблиця 3. Параметри оптимізованого експериментального зразка ТЕО

Разміри підкладок ТЕО (мм)		Разміри ТЕ гілок (мм)		Кількість гілок	Екстримальні параметри ТЕО у вакуумі при $T_h=303$ К				Параметри ТЕО в режимі охолодження СВД при $T_a=323$ К		
Верхня	Нижня	Висота	Черетин		$I_{\max}$, А	$U_{\max}$, В	$\Delta T_{\max}$, К	$Q_{\max}$, Вт	I , А	U , В	P , Вт
21×15	22×18	0.5	1×1	102	9.5	5,9	73	33	4,8	4,6	22,1

В процесі розробки ТЕО вирішена важлива задача по адаптації його конструкції до умов охолодження потужного джерела теплоти. Проблема полягає в тому, що для живлення СВД використовуються провідники з великим перетином, які створюють значні додаткові теплопритоки до холодної підкладки ТЕО. Для усунення цього недоліку запропоновано і реалізовано нову конструкцію ТЕО, в якій ланцюг живлення СВД інтегровано в структуру охолоджувача таким чином, що дроти живлення СВД приєднуються до гарячої підкладки ТЕО. На запропоноване технічне рішення подана заявка на патент України № 201208277 від 06.07.2012.

Результати випробувань експериментальних зразків представлені на рис. 13 і 14. Рис. 13 ілюструє залежність температури основи СВД від потужності ТЕО. Тут же горизонтальною лінією показано температуру основи СВД (65°C), яку отримано при випробуваннях стандартної пасивної системи охолодження.

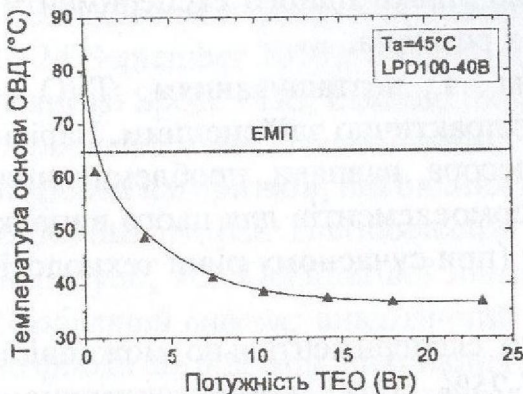


Рис. 13. Залежність температури основи СВД від потужності ТЕО

зниження температури порядку 30°C при використанні ТЕО зберігається в усьому дослідженому діапазоні змін T_a , що знаходиться в хорошому узгодженні з теоретичними передбаченнями.

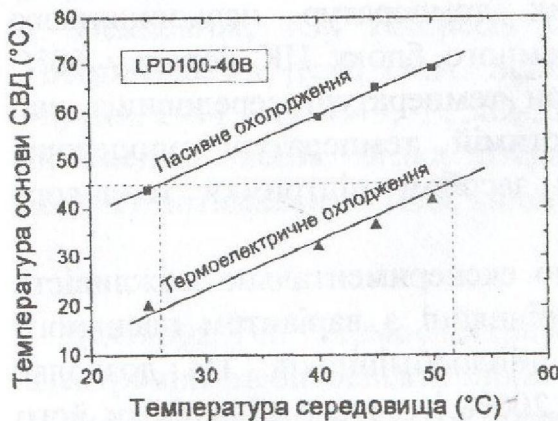


Рис. 14. Залежність температури основи СВД від температури навколишнього середовища.

Видно, що при потужності ТЕО 15 Вт температура основи СВД знижується на 30°C по відношенню до пасивного варіанту охолодження, що відповідає підвищенню терміну служби СВД від 40 до 100 тисяч годин. Видно також, що збільшення потужності ТЕО понад 8 Вт є недоцільним, оскільки це не призводить до суттєвого ефекту. Рис. 14 показує залежність температури основи СВД від температури навколишнього середовища для обох систем охолодження. Додаткове

Встановлено, що застосування термоелектричного охолодження дозволяє підтримувати безпечну температуру СВД при істотно більш високих температурах навколишнього середовища. Так, наприклад, температура СВД 45°C може бути забезпечена пасивною системою охолодження при температурі навколишнього середовища не вище ніж 25°C , у той час як та ж температура при використанні ТЕО може бути підтримана при $T_a = 52^{\circ}\text{C}$.

В усіх експериментах вимірювання температур проводилися за допомогою вимірювання ЕРС мідь-константових термопар (мідний дріт діаметром 0,1 мм, константовий - 0,15 мм) за допомогою вольтметра універсального В7-21. Абсолютна похибка вимірювання

температури складає 0,4 К. Похибка вимірювань постійного току та напруги склали 0,2%.

Висновки

- Оптимальне узгодження всіх елементів системи, включаючи охолоджуваний об'єкт, ТЕО і теплообмінник в їх тепловій взаємодії є необхідною умовою для реалізації переваг термоелектричного охолодження.
- Обґрунтований підхід до оцінки термічних опорів на зовнішніх гранях ТЕО є ключовим моментом для його оптимального інтегрування в систему охолодження електронного компонента.
- Для коректної оцінки термічних опорів на спаях ТЕО слід враховувати тривимірний розподіл температур в елементах системи, прилеглих до зовнішніх граней ТЕО.
- Встановлено, що для знаходження термічного опору теплообмінника при будь-яких розмірах джерела теплоти достатньо тільки одного експерименту з імітатором теплового навантаження фіксованих розмірів.
- Варіант термоелектричного охолодження з розташуванням ТЕО із зовнішнього боку теплового моста процесора є практично здійсненним. Варіант з безпосереднім контактом ТЕО з ядром процесора, навпаки, проблематичний для здійснення, оскільки оптимальна висота термоелементів для цього випадку (60-70 мкм) лежить в технічно нездійсненному (при сучасному рівні технології) діапазоні.
- Вперше показана теоретично і підтверджено експериментально можливість підвищення потужності процесора на 17-25% при термоелектричному охолодженні з боку зовнішньої грані теплового моста процесора. Встановлено, що для досягнення цього результату необхідно забезпечити електричний контактний опір на рівні від 10^{-7} до 10^{-6} Ом $\times$ см², і при цьому термічні опори на зовнішніх границях ТЕО повинні бути зведені до мінімуму.
- Показано, що перевага термоелектричного охолодження збільшується при використанні ППК в умовах підвищених температур навколишнього середовища. При температурі усередині системного блоку ПК порядку 60°C потужність ППК може бути подвоєно. При температурі середовища, що перевищує або дорівнює граничній допустимій температурі процесора, термоелектричне охолодження стає єдиним засобом підтримки теплового режиму ППК.
- Вперше показано теоретично і підтверджено експериментально можливість пониження температури СВД на 30°C у порівнянні з варіантом пасивного охолодження при використанні однакових теплообмінників. Це дозволяє збільшити термін служби СВД більш ніж на 200% і суттєво підвищити його світність.
- Інтегрування схеми живлення СВД в структуру ТЕО дозволяє перемістити дроти живлення СВД з холодної підкладки ТЕО на гарячу і таким чином знизити теплове навантаження на охолоджувач на 8 - 10%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Dekhtiaruk, R.I. Thermoelectric Cooling Under Dimensional Constraints [text]/ V.A. Semenyuk, R.I. Dekhtiaruk // Journal of Thermoelectricity. – 2007. – №4. –Р. 69-75.

Особистий внесок: огляд літератури, аналітичні дослідження, постановка задачі. Участь у розробці алгоритмів пошуку оптимальних рішень, виконання розрахунків та проведення експериментальних досліджень.

2. Thermoelectric Cooling With Constrained Heat Removal: proc. 5-th European conference on thermoelectrics, (Odessa, Ukraine, 10-12 September 2007)/ Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa State Academy of Refrigeration. – O. Odessa State Academy of Refrigeration, 2007. – 94 p.

Особистий внесок: Участь у розробці алгоритмів пошуку оптимальних рішень, виконання розрахунків та проведення експериментальних досліджень.

3. Prospects for Thermal Management of Powerful Microprocessors Using Thermoelectrics: proc. 8-th European conference on thermoelectrics, (Como, Italy, 22-24 September 2010)/ Institute for Energetics and Interphases-Unit of Lecco Corso Promessi Sposi. - LC. Institute for Energetics and Interphases, 2010. – 106p.

Особистий внесок: аналітичний огляд літератури, розробка фізичних моделей, розробка алгоритмів, виконання розрахунків.

4. Dekhtiaruk, R.I. Thermoelectric Cooling of Powerful Microprocessors [text]/ V.A. Semenyuk, R.I. Dekhtiaruk// Journal of Thermoelectricity. -2010. -№4. -Р. 67-76.

Особистий внесок: аналітичний огляд літератури, розробка фізичних моделей, розробка алгоритмів, виконання розрахунків.

5. Dekhtiaruk, R.I. Increase in CPU Power by Integrating TEC into the Standard Heat Sink: Experimental Results [text]/V.A. Semenyuk, R.I. Dekhtiaruk // Journal of Thermoelectricity. -2011. -№2. -Р. 75-86.

Особистий внесок: виготовлення експериментальних зразків ТЕО, створення експериментального стенду, проведення експерименту, обробка отриманих результатів.

6. Dekhtiaruk, R.I. Prospects for Improvement in LED Performance Using Thermoelectrics [text] /V.A. Semenyuk, R.I. Dekhtiaruk // American Institute of Physics. 2011. – №1449. -Р. 552-555.

Особистий внесок: огляд літератури, постановка задачі, розробка алгоритму пошуку оптимальних ТЕО, виконання розрахунків.

АНОТАЦІЯ

Дехтярук Р.І. Термоелектричне охолодження теплонапружених елементів електроніки та оптоелектроніки. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 - холодильна та криогенна техніка, системи кондиціонування повітря. - Одеська національна академія харчових технологій, Одеса 2012.

У дисертації представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на вирішення проблеми підвищення ефективності теплонапружених об'єктів електронної техніки та оптоелектроніки.



Розглядаються перспективи підвищення продуктивності процесорів персональних комп'ютерів (ППК) та покращення робочих характеристик потужних світловипромінюючих діодів (СВД) при використанні термоелектричного охолодження.

Побудовано загальну модель термоелектричної системи охолодження та розроблені теоретичні основи оптимального узгодження її компонентів, включаючи охолоджуваний об'єкт, ТЕО і теплообмінник в їх тепловій взаємодії.

Показано теоретично і підтверджено експериментально можливість підвищення потужності ППК на 17-25% при температурі всередині системного блоку 45°C. Встановлено, що при температурі 60°C можливе подвоєння потужності ППК. Сформульовані умови та обмеження, при яких зазначені результати можуть бути реалізовані.

Поставлена і вирішена задача про досягнення мінімальної температури СВД при використанні термоелектричного охолодження. Експериментально доведена можливість зниження температури СВД на 30°C у порівнянні з пасивною системою охолодження при використанні однакових теплообмінників.

Створено нову конструкцію ТЕО, в якій ланцюг живлення охолоджувального об'єкту інтегровано в структуру охолоджувача, завдяки чому усунуто зайві теплонатікання до холодної підкладки ТЕО.

Ключові слова: термоелектричний охолоджувач, світловипромінюючий діод, процесор персонального комп'ютера, математичне моделювання, чисельні методи, експеримент.

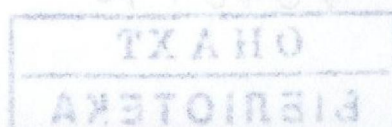
АННОТАЦИЯ

Дехтярук Р.И. Термоэлектрическое охлаждение теплонапряженных элементов электроники и оптоэлектроники. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 — холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования воздуха. — Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса 2012.

В диссертации представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на решение проблемы повышения эффективности теплонапряженных объектов электронной техники и оптоэлектроники. Рассматриваются перспективы повышения производительности процессоров персональных компьютеров (ППК) и улучшение рабочих характеристик мощных светоизлучающих диодов (СИД) при использовании термоэлектрического охлаждения.

Построена модель термоэлектрической системы охлаждения и разработаны теоретические основы оптимального согласования ее компонентов, включая охлаждаемый объект, ТЭО и теплообменник в их тепловом взаимодействии. Особенностью разработанного подхода является идентификация термических сопротивлений на границах ТЭО с учетом трехмерного распределения температур в отдельных элементах системы.



Разработан алгоритм оптимизации системы, сочетающий решения уравнений баланса теплоты на границах элементов с решением краевых задач для уравнения стационарной теплопроводности.

На основе предложенного теоретического подхода разработаны и испытаны экспериментальные образцы термоэлектрических систем для охлаждения ППК компании Intel. Показана теоретически и подтверждена экспериментально возможность повышения мощности ППК на 17-25% при температуре внутри системного блока порядка 45°C. Установлено, что при температуре 60°C возможно удвоение мощности ППК. Сформулированы условия и ограничения, при которых указанные результаты могут быть реализованы.

Поставлена и решена задача о достижении минимальной температуры СИД при использовании термоэлектрического охлаждения. Изготовлены и испытаны опытные образцы термоэлектрической системы охлаждения для светодиода W724C0 мощностью 11,8 Вт. Экспериментально доказана возможность понижения температуры СИД на 30°C по сравнению с пассивной системой охлаждения при использовании одинаковых теплообменников.

В процессе разработки ТЭО решена важная задача по адаптации его конструкции к условиям охлаждения мощного энергопотребляющего источника теплоты. Для устранения теплопритоков по проводам питания СИД предложена и реализована новая конфигурация ТЭО, в которой цепь питания СИД интегрирована в структуру охладителя. При этом провода питания СИД присоединяются к горячей подложке ТЭО.

Ключевые слова: термоэлектрический охладитель, светоизлучающий диод, процессор персонального компьютера, математическое моделирование, численные методы, эксперимент.

ABSTRACT

Dekhtiaruk R.I. Thermoelectric cooling of heat-stressed electronic and optoelectronic elements. — Manuscript.

Dissertation for degree of technical sciences Ph. D. in specialty 05.05.14 — Refrigeration, vacuum and compressor equipment, air conditioning systems. Odessa National Academy of Food Technologies. Odessa 2012.

The thesis presents results of theoretical and experimental studies aimed at solving the problem of improving the efficiency of heat-stressed electronic and optoelectronic components. Prospects to increase the performance characteristics of central processor units (CPU) and light emitting diodes (LED) using thermoelectric cooling are considered.

Generalized model of thermoelectric cooling system is proposed and theoretical basis of optimum matching its components including cooled object, TEC and a heat sink in their thermal interaction is developed.

17-25% increase in CPU power at 45°C inside the system unit was theoretically predicted and approved experimentally when using thermoelectrics. It was also shown that at 60°C inside the system unit it is possible to get doubling of CPU power.

The problem of achieving the minimum LED junction temperature using thermoelectrics was formulated and solved. Up to 30°C temperature reduction of the p-n junction temperature was approved experimentally in comparison with passive cooling system with the same heat sink.

Improved TEC design is proposed, which allows avoiding additional thermal load through the lead wires of the cooled object.

Key words: thermoelectric cooler, light emitting diode, central processor unit, mathematic modeling, numerical methods, experiment.