

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

РОЗРАХУНКОВО-ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

кваліфікаційної роботи фахівця освітнього ступеня

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **Розробка системи охолодження напівпровідникових джерел
світла термоелектричними елементами**

Виконав: студент (ка) 4 курсу, групи ЕТс-41

напряму підготовки (спеціальності)

141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Сахар Олександр Олегович

(прізвище та ініціали)

Керівник

Закордонець Володимир Савич

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Шелестовський Б.Г.

(прізвище та ініціали)

Факультет _____
Кафедра Електричної інженерії
Освітній рівень бакалавр
Напрямок підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)
Спеціальність _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«_____» _____ 201__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сахар Олександр Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) **Розробка системи охолодження напівпровідникових джерел світла термоелектричними елементами**

Керівник проекту (роботи) Закордонець Володимир Савич к.ф.-м.н, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом по університету від «_____» _____ 201__ року № _____

2. Термін подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра Сахара Олександра Олеговича містить: 64 сторінки, 33 рисунки, 17 таблиць, 29 посилань на першоджерела.

Предметом дослідження є світлодіодні матриці та освітлювачі на їх основі.

Мета роботи полягає у виявленні параметрів, які найбільше впливають на тепловий режим напівпровідникових джерел світла та пошук шляхів і засобів для стабілізації теплового режиму.

Об'єктом дослідження є система охолодження напівпровідникових джерел світла термоелементами.

Основні результати: створено розрахункову математичну модель світлодіодної матриці. Модель описує вплив основних параметрів (квантової ефективності, теплової потужності, теплового опору, температури середовища) на температуру активної зони матриці. Розрахована температура активної зони світлодіодної матриці з термоелектричним модулем охолодження та без модуля, і проведений порівняльний аналіз. Дано конкретні рекомендації для збільшення ефективності світлодіодних освітлювачів в умовах стабілізації їх теплового режиму.

Ключові слова: світловіддача, квантова ефективність, енергетична ефективність, світловий потік, тепловий режим, активна зона.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Економічні передумови застосування напівпровідникових джерел світла	8
1.2 Принцип дії та будова напівпровідникових джерел світла	9
1.3 Шляхи підвищення ефективності світлодіодів	19
1.4 Способи теплової стабілізації	21
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	23
2.1 Механізми передачі тепла в світлодіодах	23
2.2 Вибір типу та потужності джерел світла	32
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	37
3.1 Енергетичні співвідношення в термопарі	37
3.2 Термоелектричний модуль	42
3.3 Розрахунок температури зони випромінювання	45
3.4 Світлотеплове моделювання багатоелементних матриць	53
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	56
4.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників, електробезпеки, пожежної безпеки світлодіодних ламп	56
4.2. Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	61
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	62

ВСТУП

Проблема енергоефективності та енергозбереження в усьому світі взагалі і в Україні зокрема стала дуже актуальною. Це пов'язано із тим, що зараз більш ніж 20% загальних затрат електрогенерації припадає на різні види освітлення. Кратно зменшити ці затрати може тільки широке впровадження як у виробництво так і в побут сучасних світлотехнічних технологій. Це, безсумнівно, дасть сильний імпульс до збільшення ВВП. В цьому зв'язку, завдання широкого впровадження ощадних технологій в енергетичний сектор економіки стає особливо актуальним.

Зараз в освітлювальну галузь впроваджуються спеціальні програми по розробці енергоощадних та ефективних джерел світла – світлодіодів. Процес масового застосування енергоощадних світлотехнічних виробів отримав додатковий імпульс для прискорення в зв'язку з появою напівпровідникових джерел світла – світлодіодних матриць.

Напівпровідникові джерела світла споживають (порівняно з традиційними джерелами) відносно мало енергії, та дозволяють отримати наперед заданий колір світлового випромінювання, мають великий термін експлуатації [4]. Дійсно, як слідує з технічної документації та практичного досвіду їх експлуатації термін служби сягає ста і більше тисяч годин безвідмовної роботи. Через відсутність механічно вразливих елементів напівпровідникові джерела світла досить міцні. До інших їх чудових якостей належать: технологічність, безпека експлуатації, екологічна чистота, мініатюрність, широкий спектр кольорів свічення, потужностей, напруг живлення та ін..

Проте, незважаючи на велику кількість запропонованих ринком світлодіодних освітлювачів, здебільшого вони не мають заявлених виробниками характеристик, і тому не забезпечують нормованих показників якості світла.

Сьогодні, заявлена світловіддача світлодіодних матриць досягла понад 160лм/Вт. Однак, при цьому, в деяких світлових приладах на їх основі ККД відносно невисокий (<30%). Низький ККД часто пов'язаний з неадекватним тепловим режимом роботи світлодіодів та світлодіодних матриць. Це призводить до понаднормового нагріву напівпровідникового освітлювального приладу в цілому та світловипромінюючих кристалів зокрема. Порушення теплового режиму кристалів призводить до передчасного виходу з ладу світлодіодів. Тому, вкрай важливим і необхідним є стабілізація теплового режиму світловипромінюючих кристалів (їх активної зони). Ця проблема примушує до пошуку ефективних способів терморегулювання.

В сучасних приладах радіоелектронної апаратури для відведення надлишкового тепла використовують пасивні і активні системи регулювання температури [4, 5]. Очевидно, що вони успішно можуть бути використані і для стабілізації теплового режиму напівпровідникової освітлювальної апаратури.

Пасивні системи охолодження (радіатори, теплопровідні пластини, корпуси самих приладів) хоч і простоті за конструкцією та мало придатні для застосування в потужних освітлювачах. Зокрема, вони мають незадовільні масо-габаритні показники (великі габарити, масу, площу тепловідводу), а часто і неможливість інсталяції в освітлювальну систему.

Активні системи термостабілізації: різноманітні повітряні вентилятори, водяні помпи, теплові трубки та термоелектричні модулі охолодження є хоч і набагато ефективнішими, та для своєї роботи потребують допоміжних технічних засобів та обслуговування [5-8, 10-15]. Крім того, значно зростає вартість системи термостабілізації та зменшується її надійність. У зв'язку із сказаним, постійно тривають пошуки нових систем терморегулювання та термостабілізації.

В роботі, для регулювання і стабілізації температури світловипромінюючих кристалів потужних світлодіодних матриць та різноманітних конструкцій світильників пропонується використати термоелектричні модулі охолодження (МО) [16-20]. Застосування МО наділяє

систему терморегуляції функцією охолодження. Зниження температури кристалів до температури, нижчої ніж температура середовища дасть можливість значно збільшити їх світловіддачу та продовжити термін експлуатації. У зв'язку із цим, виникла необхідність дослідження роботи світлодіодних приладів і його компонентів, для виявлення причин, які впливають на зменшення загального ККД, і пошук режимів роботи, які б забезпечували високу енергоефективність світлодіодних приладів.

Мета роботи полягає у виявленні параметрів, які найбільше впливають на тепловий режим напівпровідникових джерел світла та пошук шляхів і засобів для стабілізації їх теплового режиму.

Постановка завдання. Використовуючи створену теплову математичну модель встановити аналітичні зв'язки між параметрами світлодіодної матриці та параметрами термоелектричного модуля охолодження. Це сприятиме раціональному вибору схеми охолодження та забезпечить адекватний тепловий режим роботи матриці.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Економічні передумови застосування напівпровідникових джерел світла.

Масове впровадження напівпровідникових джерел світла може різко скоротити витрати на освітлення в 6÷8 разів. Це видно з порівняльної таблиці 1.1 параметрів ламп розжарювання, люмінесцентних ламп та світлодіодів. Тобто, для якісного освітлення одного і того ж приміщення, електрична потужність напівпровідникових джерел світла може бути набагато меншою. В зв'язку з цим, проблема масового впровадження ефективних освітлювальних технологій є ключовою.

Таблиця відповідності потужностей різнотипних освітлювальних ламп
Таблиця 1.1

Потужність, Вт			Світловий потік в Люменах
Розжарювання	Люмінесцентна	Світлодіодна	
20	5-7	2-3	200
40	10-13	4-5	400
60	15-16	8-10	700
75	18-20	10-12	900
100	25-30	12-15	1200
150	40-50	18-20	1800
200	60-80	25-30	2500

Доповнимо аналіз практичним зіставленням роботи двох ламп різного типу протягом тривалого часу. Виберемо, наприклад, лампу розжарювання *100Вт*. Нехай споживач в середньому використовує її 5 годин на добу, тобто сумарно за 365 днів це складе близько 182.5 кВт·годин електроенергії на рік.

Еквівалентна люмінесцентна лампа буде мати потужність 22.5Вт і використає за рік 41.1 кВт·годин електроенергії. Світлодіодна лампа буде мати потужність 13.5Вт і використає за цей же період 24.6 кВт·годин електроенергії.

Якщо врахувати, що станом на перше квітня 2024 року вартість електроенергії складає 2.64 грн/кВт.год., то в грошовому еквіваленті це складе відповідно 481.8 грн., 108.5 грн. і 54.9 грн..

Отже, світлодіодна лампа використовує в 8.8 разів менше енергії ніж лампа розжарювання і в 2 рази менше ніж люмінесцентна лампа. Аналогічне співвідношення зберігається і для річної вартості електроенергії.

1.2 Принцип дії та будова напівпровідникових джерел світла

Світлодіоди (LED - light-emitting diode) сьогодні широко використовуються в освітлювальних технологіях. Вони є джерелами світла майбутнього, і вже зараз являють собою найсучасніший, найпрогресивніший та найпопулярніший стан освітлювальних технологій для різноманітних застосувань. Завдяки прямому перетворенню електричної енергії в оптичне випромінювання напівпровідника СД є ефективнішими ніж більшість традиційних джерел світла. Однак, навіть у випадку світлодіодів, більша частина електричної енергії (майже 70%) перетворюється в теплову а не в світлову енергію. Очевидно, чим більша потужність джерела світла тим більше тепла утворюється в джерелі світла.

Це тепловиділення повинно бути відведене від джерела світла, оскільки використовуваний напівпровідниковий матеріал має максимальну температуру експлуатації. Зокрема, його характерні параметри такі як світловий потік, пряма напруга, світловіддача, довжина хвилі випромінювання та термін служби залежать від температури. При використанні інноваційних, мініатюрних високоефективних світлодіодів, розсіювання тепла має велике значення для того, щоб утримувати температуру переходу в допустимих межах. Тільки адекватне управління тепловим режимом може забезпечити ефективну роботу світлодіодів.

Для більшості світлодіодних систем та інших видів радіоелектронної апаратури, як правило, є передача цього тепла в навколишнє середовище в меншій чи більшій мірі, щоб запобігти перегріванню компонентів. Шлях теплопередачі системи практично у всіх випадках однаковий, починаючи від джерела тепла (напівпровідниковий гетероперехід) через контактну площадку, теплопровід, радіатор, корпус, а далі в навколишнє середовище.

Особливістю напівпровідникових джерел світла є їх здатність перетворювати підведену електричну енергію безпосередньо в світлове випромінювання. Це відбувається при прямому підключенні світлодіода, коли струм проходить від анода (+) до катода (-).

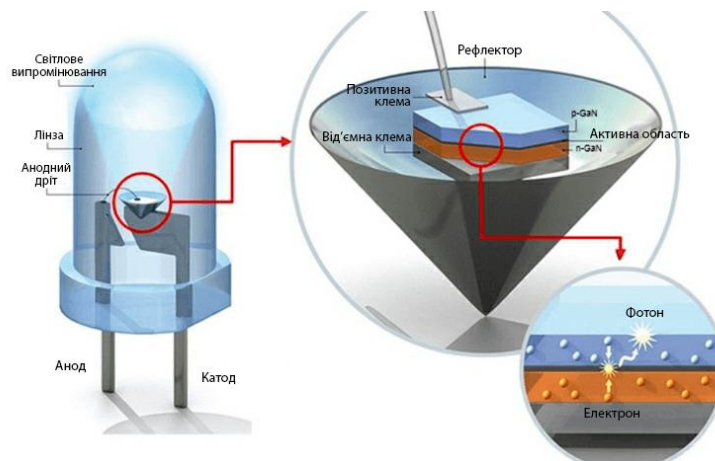


Рис. 1.1. Схема будови світлодіода.

Як видно з рисунка, світлодіод має два шари напівпровідника різного типу провідності: n - типу і p - типу. Напівпровідник n - типу наприклад (n-GaN) знаходиться на підкладці, яка електрично зв'язана з катодом, а напівпровідник p - типу наприклад (p-GaN) електрично з'єднаний з анодом. Корпус LED виготовляють з прозорих для світлового випромінювання матеріалів: скло, прозора пласмаса. В залежності від конфігурації LED може мати деякі додаткові конструктивні особливості: наявність лінзи, металевих тепловідводів, рефлекторів, та ін..

В залежності від хімічного складу напівпровідникових матеріалів світлодіод може випромінювати світло різного забарвлення (різна довжина хвилі).

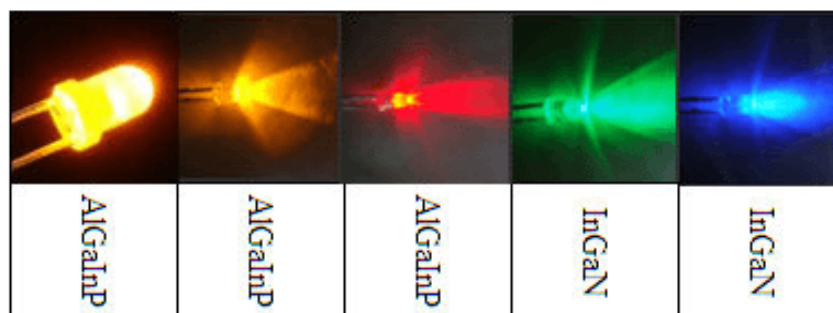


Рис. 1.2. Забарвлення світлового випромінювання в залежності від хімічного складу напівпровідникових матеріалів.

При прямому підключенні LED до джерела струму, в активній зоні відбувається рекомбінація електронів і дірок напівпровідників. При цьому виділяється деяка кількість теплової і світлової енергії. Однак, часто, хвильовий спектр випромінювання знаходиться за межами видимого діапазону. LED-кристали виготовляють з домішками арсеніду галію, фосфіду галію, з'єднань індію та алюмінію, та інших. Домішки змінюють ширину забороненої зони $p-n$ -переходу. При цьому кардинально змінюється як інтенсивність так і колір світіння. Кристали випромінюючих діодів у світлодіодних матрицях великої потужності розміщуються на теплопровідних контактних площадках з міді або алюмінію. Це сприяє швидкому відведенню надлишкової теплової енергії і запобігає перегріву. Напрямок та кут розсіювання світлового випромінювання регулюється лінзами та рефлекторами. В основі роботи світловипромінюючого діода (СВД) лежить явище рекомбінації рухомих носіїв заряду.

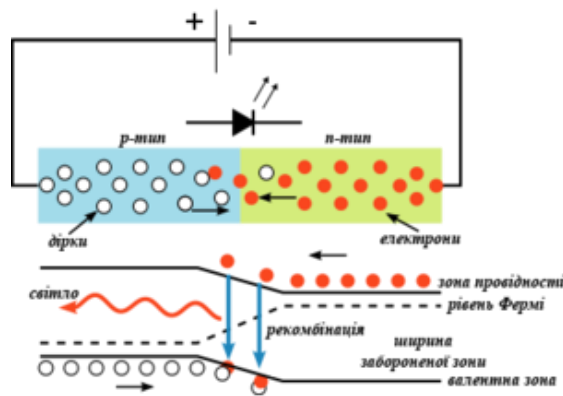


Рис. 1.3. Схема роботи СВД.

Зокрема, якщо електричний струм пропустити через $p-n$ -перехід у прямому напрямку, то відбуватиметься рекомбінація рухомих носіїв заряду як у $p-n$ -переході, так і в прилеглих областях напівпровідникової речовини (активна зона). Коли рухомий електрон і нерухома дірка зустрічаються, відбувається виділення кванта енергії, випромінюється фотон. Енергія виниклого кванта світла дорівнюватиме енергії, яка рівна ширині забороненої зони напівпровідника. Ці кванти майже не поглинаються в активній зоні і покидають

напівпровідник. Якщо електрон на своєму шляху зустрічає дефект кристалічної ґратки, то випромінювання не відбивається, а вся отримана від електричного поля енергія перетворюється в тепло. При цьому активна зона, і весь напівпровідниковий матеріал нагріваються [4].

Світлодіодовипромінюючі діоди умовно поділяються на два типи: індикаторні та освітлювальні.

Індикаторні світлодіоди (ІСД) мають малу потужність і малий кут розсіювання (до 60°). Головна відмінність ІСД – невеликі розміри, відносно невисока потужність (при цьому висока яскравість) і широкий спектр світлового випромінювання.



Рис.1.4. Види індикаторних світлодіодів.

Освітлювальні світлодіоди – (ОСД) є досить потужними напівпровідниковими освітлювальними приладами, які мають високу густину світлового потоку. В результаті цього ОСД використовуються для виготовлення ламп, люстр, автомобільних фар, освітлювальних прожекторів та іншої освітлювальної апаратури. Освітлювальні світлодіоди мають білий колір свічення, проте є варіанти з теплою і холодною температурою свічення. До таких ОСД можна віднести: освітлювальний SMD LED, COB-світлодіод, Filament LED, лазерний LED.



Рис. 1.5 Зовнішній вигляд білого ОСД потужністю 1Вт із світловим потоком 100 лм.

В освітлювальних SMD ОСД, для збільшення яскравості і покращення кольоропередачі кристали покриваються тоньким шаром люмінофору.

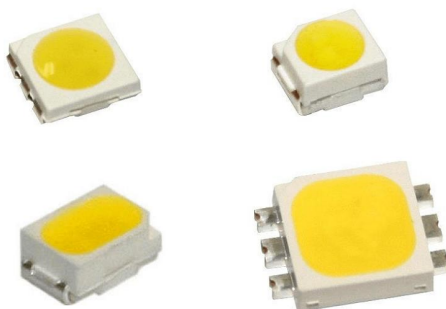


Рис. 1.6. Освітлювальні SMD ОСД.

Для захисту від перегріву в корпус SMD ОСД вмонтована металева пластина (мідна, або алюмінієва), яка служить тепловідводом. Кут розсіювання світла становить від 100° до 130°.

COB ОСД складається з кількох десятків синіх світлодіодів, які об'єднані в одному корпусі. Світлодіоди розміщені на спільному люмінофорному покритті.

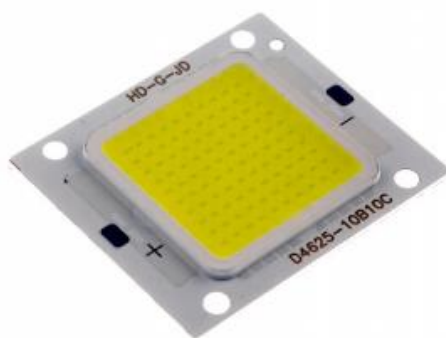


Рис. 1.7. COB-ОСД.



Рис. 1.8. Filament - ОСД.

Filament - світлодіоди для освітлення застосовують рідко. Вони дають малий світловий потік і мають низький ККД. В основному їх використовують в рекламних цілях і для декоративних підсвіток [6].

Лазерний ОСД має особливу конструкцію, яка дозволяє протягом довгого часу утримувати всередині фотони, які згодом випромінюються. В процесі випромінювання внаслідок лавиноподібного процесу утворюється багато нових фотонів, поки величина світлового потоку не стане більшою від рівня втрат. Тобто, світлова енергія протягом певного часу накопичується всередині кристала і при досягненні певної межі – вивільняється у вигляді лазерного імпульсу.



Рис. 1.9. Лазерний ОСД.

Лазерні зчитувальні технічні пристрої, оптоволоконна оптика, медичне устаткування працюють завдяки лазерним СД.

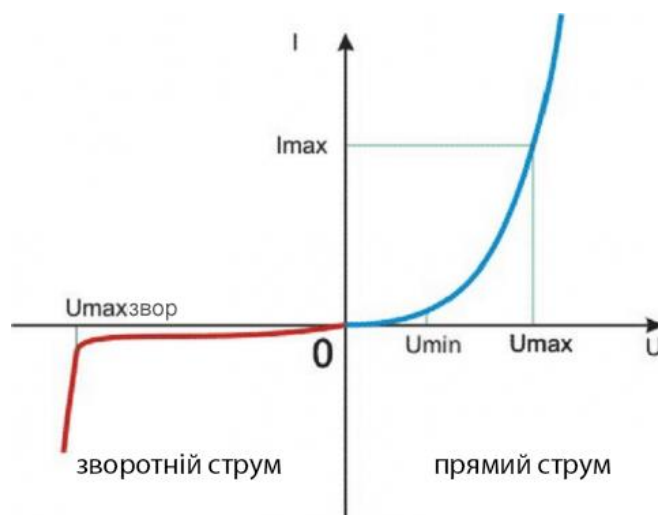


Рис. 1.10. Вольт-амперна характеристика світлодіода.

На графіку зображена вольт-амперна характеристика типового світлодіода. Величина напруги і струму і напруги можуть в залежності від моделі приладу можуть відрізнятись. Однак, всі вони мають експоненційне збільшення струму при збільшенні напруги при прямому вмиканні. При зміні полярності вмикання СД світити не буде. При досягненні величини зворотної напруги величини $U_{maxзвор}$ прилад вийде з ладу. Ця напруга називається напругою електричного пробою. Діапазон напруг від U_{min} до $-U_{max}$ називають робочим діапазоном напруги світлодіода.

Не так давно на ринку освітлювальної апаратури з'явилися новітні високоефективні джерела світла – світлодіодні матриці. Надзвичайно популярними стали матриці типу СМА.



Рис. 1.11. Матриця типу СМА.

LED - матриця є сукупністю кількох сотень світловипромінюючих кристалів, які інтегровані в єдиний пристрій. Кристали зверху покриті люмінофором, і для підвищення надійності експлуатації та оптимізації величин струмів та напруг живлення з'єднані послідовно-паралельно.

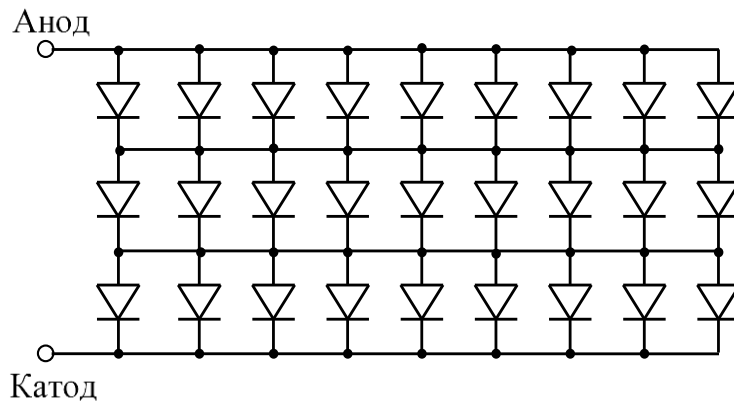


Рис. 1.12. Порядок з'єднання світлодіодних кристалів в LED – матриці.

Плоска поверхня LED – матриці є оптично прозорою, що робить можливим встановлення, для створення потрібної діаграми просторового розподілу світла, корегуючої оптики. Як правило, в LED - матриці містять товсту металеву (мідну або алюмінієву) пластинку з отворами для кріплення на радіатор. Ідеальний механічний і тепловий контакт матриці з радіатором забезпечується гладкою поверхнею підкладки. Це робить конструкцію напівпровідникових освітлювачів досить технологічною і зменшує їх вартість.



Рис. 1.13. Зовнішній вигляд LED – матриць.

Деякі зразки сучасних потужних світлодіодних матриць

Таблиця
1.2

	XLamp® CMA1516	XLamp® CMA1825	XLamp® CMA1840	XLamp® CMA2550	XLamp® CMA3090
Розмір, мм	15.85 x 15.85	17.85 x 17.85	17.85 x 17.85	23.85 x 23.85	27.35 x 27.35
Макс. струм драйвера, А	1.05 А	1.6 А	2.3 А	3.3 А	3.6 (48 V), 2.4 (72 V)
Макс. потужність, Вт	41 W	61 W	87 W	122 W	174 W
Светловий потік, лм	1,400 – 4,800 lm	2,150 – 7,300 lm	3,300 – 10,300 lm	4,400 – 15,000 lm	7,300 – 21,700 lm
Діаметр випромінюючої поверхні	9 mm	9 mm	14 mm	19 mm	23 mm
Кут випромінювання	115 °				

Порівняльна таблиця технічних характеристик освітлювальних ламп

Таблиця 1.3

Технічні характеристики	Світлодіодна	Розжарювання	Переваги led
Строк служби	50 тис. годин	1 тис. годин	краще в 50 разів
Ефективність світла	80-100 Лм/Вт	10 Лм/Вт	краще в 8-10 разів
Виділення тепла під час роботи	низьке	високе	краще
Стійкість до вібрацій	низька	висока	краще
Стійкість до перепадів напруги	низька	висока	краще
Чутливість до частого вмикання / вимикання	ні	так	краще
Температура кольорів, К	2000-6500	2700	ширше діапазон
Індекс передачі кольорів, Ra	80	100	гірше на 20%
Допустима температура навколишнього середовища	-40°C +40°C	-60 °C +100°C	діапазон менше
Пульсація випромінювання	ні	мало помітно	майже однаково
Спеціальна утилізація	не вимагається	не вимагається	однаково
ККД	70-100 %	50-80%	краще на 20 %

Крім позитивних якостей, напівпровідникові джерела світла мають і деякі недоліки. Зокрема, при пропусканні струму через напівпровідникові джерела світла, їх температура збільшується. Висока температура кристалів негативно впливає на всі технічні характеристики світлодіодів. Вплив температури на технічні характеристики досліджувався ряді як науково-теоретичних так і науково-практичних робіт [3-8]. Для прикладу, в [3] теоретично досліджувався вплив величини струму на температуру активної зони LED. Розрахунок здійснювався методом електротеплової аналогії [9]. Була розрахована

температура активної зони та корпусу приладу як функція струму та температури навколишнього середовища. Дослідження впливу температурного режиму роботи LED на світловий потік експериментально проводився і в роботах [6-8]. При цьому робилося узагальнення щодо ефективності термостабілізації активної зони при різних типах радіаторів. Дані рекомендації щодо покращення температурного режиму роботи світлодіодних джерел світла.

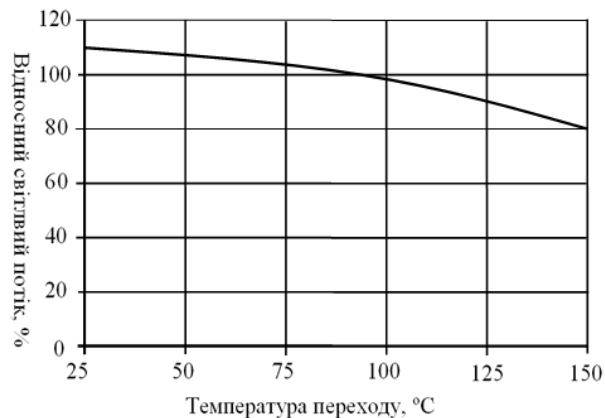


Рис. 1.14. Типова температурна залежність світлового потоку для матриць серії CMA [8].

Як видно з наведеної графічної залежності, в інтервалі температур від 25°C до 90°C відносний світловий потік складає величину від 110% до 100%. При подальшому збільшенні температури потік швидко зменшується, досягаючи 80% від номінального значення. Цікавим видається температурний інтервал нижче 25°C. Екстраполюючи величину світлового потоку для температур нижчих за 25°C можна припустити, що при подальшому зниженні температури, світловий потік буде збільшуватися. Наприклад, при температурі 0°C він може збільшитися до 150% від номінального значення. Цього можна досягти збільшуючи величину струму живлення. Проте, збільшення потужності приводить до збільшення виділення тепла, яке потрібно відводити. Тому, що надлишкове тепло неминуче призведе до перегріву кристалів. Робота кристалів в умовах високих температур приводить до зменшення потоку світла, яскравості свічення, помутніння оптики. Зокрема, прийнято вважати, що після досягнення світловим потоком манше ніж 60% від норми, заявлений

термін експлуатації світлодіода закінчується. Тож першорядним стає завдання стабілізації його теплового режиму.

1.3 Шляхи підвищення ефективності світлодіодів

Що ж в світлотехнічній літературі розуміють під ефективністю? З точки зору експлуатаційника, це світловіддача, тобто відношення світлового потоку світлодіода до споживаної ним електричної потужності. Навпаки, з точки зору покупця, це вартість одного люмена, тобто відношення світлового потоку до ціни світлодіода.

Для поліпшення першої та другої характеристик ефективності світлодіодів існує декілька шляхів. Насамперед, це удосконалення внутрішньої структури кристала і пов'язаної з нею внутрішнього і зовнішнього квантового виходів. Внутрішній квантовий вихід теоретично можна максимально наблизити до 100%. Максимальні на сьогоднішній день величини зовнішнього квантового виходу складають 35% для блакитних і для червоних світлодіодів. Отже, тільки внаслідок підвищення зовнішнього квантового виходу теоретично можна збільшити світловіддачу у 2 - 3 рази, і таким чином знизити ціну одного люмена світла. Аналіз літературних джерел показує [13], що це на практиці цілком досяжне завдання.

Щоб наблизити квантовий вихід до бажаних 100%, треба знайти нові, більш узгоджені з кристалічною ґраткою напівпровідника матеріали підкладки. Як відомо, зараз використовується сапфір Al₂O₃. Карбід кремнію SiC підійшов би краще, адже по-перше, в нього постійна ґратки ідеально узгоджена з постійною ґратки підкладки, по-друге, він має високу теплопровідність. Це створює певні переваги для відведення надлишкового тепла. Проте він має порівняно високу вартість. Може, в майбутньому, вдасться поєднати дешевий кремній з буферними прошарками з карбиду кремнію. Це б дало змогу поєднати технологію оптоелектронних пристроїв на основі нітридів з планарною технологією виробництва кремнієвих кристалів. Але тут є певна проблема, яку треба розв'язати. Карбід кремнію непрозорий, для світла, і підкладка не буде

працювати "на провіт", як це відбувається зараз. Її доведеться зробити дзеркальною.

Значного поліпшення можна досягти за рахунок покращення конструкції світлодіода. Приклад - оптична система у вигляді перевернутої піраміди, винайдена в Lumileds, як показано на рисунку 1.1. Як видно з рисунка, кристал розташовується у вершині піраміди, а світло виходить з його основи. За рахунок повного внутрішнього відбивання світла, світловий промінь формується практично без втрат. Саме така конструкція посприяла рекордному квантовому виходу для червоних світлодіодів.

Інший приклад вдалого конструювання - оптична система білого світлодіода, розроблена і запатентована компанією "Корвет Лайтс". У пластиковому куполі створюється порожнина у формі півсфери, яка оточує кристал і заповнюється люмінофорним покриттям. За рахунок рівномірного розподілу люмінофора на поверхні сфери випромінювання такого світлодіода має однаковий спектр у всіх напрямках.

Для подальшого зниження втрат і збільшення світловіддачі білих світлодіодів можна дещо покращити якість люмінофору. Звичайно, тут максимальний виграш невеликий, йдеться йдеться про декілька відсотків.

Кардинального збільшення світлового потоку, при сучасному рівні технологій можна добитися шляхом збільшення кількості електронно-дірчастих пар, які рекомбінують в зоні р-п-переходу за одиницю часу. Для цього необхідно всього навсього збільшити струм через кристал. Проте тут існують певні обмеження.

По - перше, при великих щільностях струму зменшується термін служби світлодіода,

по-друге, зростає концентрація дефектів кристалічної ґратки.

В результаті цього електрон-діркові пари рекомбінують без випромінювання. В обох цих випадках негативну роль відіграє нагрів кристала і р-п-переходу.

Отже, вирішального значення набуває якісний тепловідвід, низькоомні контакти і використання більш "гарячого" нітриу галію замість арсеніду галію. Усі ці фактори дадуть змогу підвищити щільність струму і потужність на один кристал приблизно в сім разів [8].

Якщо щільність струму підвищувати буде неможливо, залишається можливість збільшувати площу кристала. В даний час використовуються кристали площею до 1 мм². Більше збільшувати площу кристалів поки що не вдається. Основна причина полягає в тому, що в контактах великої площі виникає нерівномірність розподілу щільності струму по поверхні контакту. При цьому виникають локальні перегріву і, як наслідок, відбувається руйнування кристалу. На сьогодні знайдено оригінальний вихід - використання багатокристалівних світлодіодів (світлодіодних матриць).

Отже, в найближчій перспективі, можна очікувати граничного збільшення світловіддачі найкращих на сьогоднішній день червоних світлодіодів удвічі, а блакитних і білих - утричі. Очевидно, що за рахунок масового виробництва ціну одного люмена білого світла, в майбутньому, вдасться знизити щонайменше у 20-30 разів.

1.4 Способи теплової стабілізації

При всіх очевидних перевагах світлодіодів, їх тривале використання можливе тільки при дотриманні граничних теплових умов. З огляду на їх чутливість до температури, виникає гостра необхідність в регулюванні теплового режиму роботи.

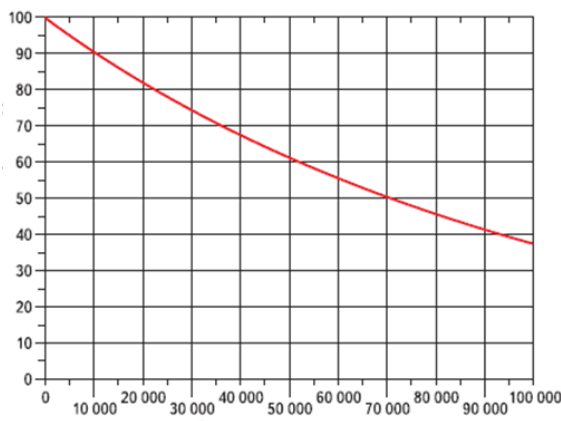


Рис. 1.15. Залежність відносного світлового потоку від часу служби світлодіода.

Для цього деякі світлодіодні матриці забезпечуються товстою мідною або алюмінієвою пластинкою з отворами для монтажу корпусу на радіатор. Хороший тепловий контакт пластинки з радіатором забезпечується ідеально рівною поверхнею пластинки. Завдяки цьому можна кріпити матриці зразу на радіатор, фіксуючи їх гвинтами, притискними механізмами, або шляхом пайки.

Керуючись технічними принципами роботи світлодіодних матриць в яких в одному корпусі компонуються десятки і сотні кристалів виникає гостра необхідність в оптимальному регулюванні їх теплових режимів.

Щоб розв'язати задачу кардинально треба піднімати якість матеріалу напівпровідника. Проте, добитися позитивного результату можна навіть при сучасному стані справ в напівпровідниковому матеріалознавстві. Так, грамотно сконструйована і виготовлена система охолодження може суттєво покращити технічні параметри існуючих напівпровідникових джерел світла. Звичайно, що треба звертати особливу увагу на якість теплових контактів між елементами теплового кола. Для забезпечення ідеальних теплових контактів між елементами теплового кола потрібно використовувати спеціальні контактні матеріали. Крім цього, теплопровідні матеріали повинні можуть виконувати і інші потрібні функції. Зокрема, електроізоляцію, гідроізоляцію, пароізоляцію вузлів електричного кола, і і т. п.. В таблиці 2.2 наведені параметри матеріалів, які використовуються в світлотехніці. При виборі контактного матеріалу треба враховувати не тільки його технічні параметри, але і механічні. Наприклад, дуже важливим є товщина клейового шару матеріалу. Адже, сумарний тепловий опір системи охолодження прямопропорційно залежить від його товщини. Як видно із формули (2.3) тонкий теплопровідний шар теплопровідного гелю чи клею з дещо більшим значенням коефіцієнта питомої теплопровідності може мати значно менший тепловий опір ніж товстий шар, але з меншим питомим коефіцієнтом теплопровідності. Ці обставини моменти є

надзвичайно важливими, і їх необхідно враховувати при проектуванні системи охолодження.

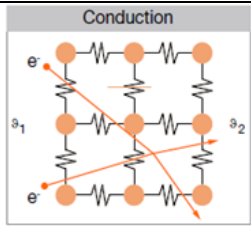
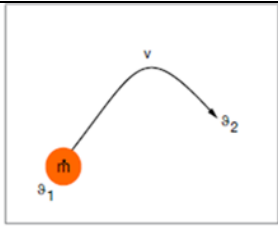
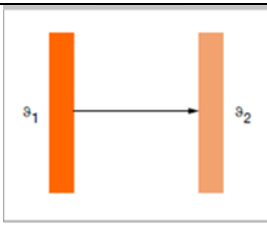
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Механізми передачі тепла в світлодіодах

Тепло є формою передачі енергії від одного тіла або системи тіл до іншого. Процес передачі енергії в формі тепла від одного до іншого тіла являє собою сукупність мікроскопічних процесів (передача енергії при зіткненні молекул). Таким чином, теплота – процес мікроскопічний, який здійснює обмін енергією між системою і навколишнім середовищем на молекулярному рівні. Теплота передається у вигляді теплового потоку або при безпосередньому контакті між тілами (кондукція, конвенція), або на відстані (шляхом випромінювання). Тепловий потік завжди виникає між точками середовища з різними температурами, або між середовищами з різними температурами. Згідно із другим началом термодинаміки, тепла енергія завжди передається від тіл з вищою температурою до тіл з нижчою температурою.

Механізми передачі теплової енергії

Таблиця 2.1

№	Діаграма	Тип теплопередачі	Механізм
1	 The diagram is titled "Conduction" and shows a 3x3 grid of orange circles representing particles. Red arrows point from the top row to the middle row, and from the middle row to the bottom row, illustrating the transfer of energy through direct contact between adjacent particles.	Кондукція (теплопровідність)	Явище прямої передачі тепла від теплішого тіла до холоднішого при відсутності переміщення частинок речовини.
2	 The diagram shows a curved arrow labeled 'v' pointing from a point labeled ϑ_1 to a point labeled ϑ_2 . A small orange circle with the letter 'm' is positioned near ϑ_1 , representing a mass of fluid moving from the warmer region to the cooler region.	Конвекція	Явище переносу тепла в рідинах, газах або сипких середовищах потоками частинок самої речовини.
3	 The diagram shows two vertical orange bars. The left bar is taller and labeled ϑ_1 , while the right bar is shorter and labeled ϑ_2 . A horizontal arrow points from the left bar to the right bar, representing the transfer of energy through electromagnetic waves.	Випромінювання	Явище випромінювання квантів енергії у вигляді хвиль або квантів енергії через вакуум або середовище.

Кондукційний теплообмін - це перенос теплової енергії, який не потребує макроскопічного потоку матеріалу. Перенос тепла відбувається між сусідніми частинками і може бути зображений як передача коливань. Наприклад, у випадку металів тепло передається між атомними ядрами за допомогою енергії коливань, а також через рух вільних електронів.

Передача тепла шляхом теплопровідності описується законом Фур'є:

$$P = \kappa \cdot S \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L}, \quad (2.1)$$

де T_1 і T_2 температури гарячого і холодного кінців тіла, S і L площа поперечного перерізу і довжина матеріалу, κ - коефіцієнт теплопровідності.

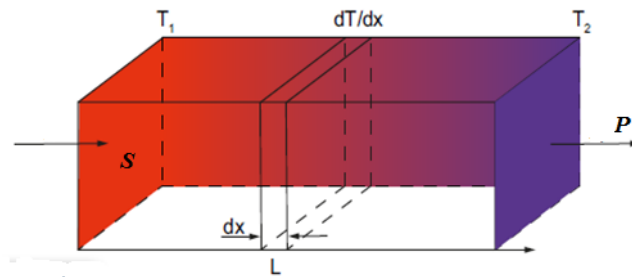


Рис. 2.1. Передача тепла шляхом теплопровідності

Коефіцієнт теплопровідності описує здатність твердого тіла переносити теплову енергію. Типові теплопровідності матеріалів, що використовуються в світлодіодних системах, показані в таблиці 2.2. Як видно із таблиці, коефіцієнт теплопровідності металів зазвичай становить від 10 до 400 $Вт/м \cdot К$. При цьому, металеві сплави проводять тепло гірше, ніж їхні компоненти. Як правило, напівпровідники також мають високу теплопровідність. На відміну від них, органічні тверді речовини, такі як пластмаси та діелектрики, мають коефіцієнт теплопровідності близько 0,2 $Вт/м \cdot К$. В той же час теплопровідність газів становить близько однієї соті частини $Вт/м \cdot К$, (наприклад, у повітря: 0,026 $Вт/м \cdot К$).

Типові величини теплопровідності матеріалів, які використовуються в світлотехніці

Таблиця 2.2

№	Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності $\frac{Вт}{м \cdot К}$
1.	Повітря	0.026
2.	Герметик PBT GF30	0.27
3.	Скло	1
4.	Типовий діелектрик	1.3
5.	Термоклей	6
6.	SnAgCu	60
7.	Кремній	120
	GaN	130
8.	Алюміній	200
9.	Сплави алюмінію	120-180
10.	Мідь	390
11.	Сплави міді	250-385

Оскільки, процес переносу тепла і заряду описуються подібними рівняннями, можна провести аналогію між переносом теплової енергії і переносом електричного заряду. При цьому, для розрахунку процесів теплопередачі можна скористатися готовими формулами електротехніки. Такий метод називається методом електротеплової аналогії. Він базується на формальній подібності рівнянь електропровідності до рівнянь теплопровідності. Зокрема, якщо прикласти напругу до різних кінців провідника, то в ньому виникне направлений потік електричних зарядів (електричний струм). Аналогічно, якщо підтримувати різницю температур між двома кінцями теплопровідного середовища то між поверхнями ними виникне потік тепла. На базі принципу електротеплової аналогії передача тепла можна

зобразити тепловою схемою, при цьому її елементами якої є: джерела тепла, приймачі тепла, теплопроводи і теплові опори (теплові провідності). Складне теплове коло складається з теплових віток, теплових вузлів і теплових контурів.

Вітка – ділянка теплового кола, по якій протікає той самий тепловий потік (потужність) P .

Вузол – місце з'єднання не менше трьох, або більше теплових віток кола.

Кожному вузлу теплової схеми ставиться в однозначну відповідність певна температура T . Перепади температур і теплові потоки і теплові опори підкоряються законам Ома і Кірхгофа для теплових кіл. На підставі цих законів теплові кола можна перетворювати, спрощувати і розраховувати. По аналогії з електричним опором вводиться термічний опір θ . Для теплового опору ділянки теплового кола між кінцями якого підтримується різниця температур ΔT справедливий закон Ома

$$\theta = \frac{\Delta T}{P} = \frac{T_1 - T_2}{P} \quad (2.2)$$

тут T_1 і T_2 – температури теплових вузлів, P – тепловий потік через ділянку.

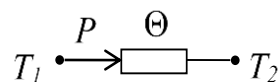


Рис. 2.2. Елемент теплового кола

З іншого боку величину теплового опору матеріалу через який проходить тепловий потік визначається із співвідношення:

$$\theta = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l}{\Delta S}, \quad (2.3)$$

тут ΔS і Δl - відповідно площа поперечного перерізу і товщина матеріалу, κ - питомий коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

Для різниці температур між кінцями сполучених послідовно n теплових елементів справедливий другий закон Кірхгофа

$$T_1 - T_2 = \Delta T = \sum_{k=1}^n \Delta T_k, \quad (2.4)$$

тут

$$\Delta T_k = P \cdot \theta_k,$$

- перепад температури на k – тому елементі.

Звідси випливає, що сумарний тепловий опір послідовно з'єднаних теплових елементів

$$\theta = \sum_{k=1}^n \theta_k \quad (2.5)$$

де

$$\theta_k = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta l_k}{\Delta S_k},$$

- тепловий опір k – того елемента.

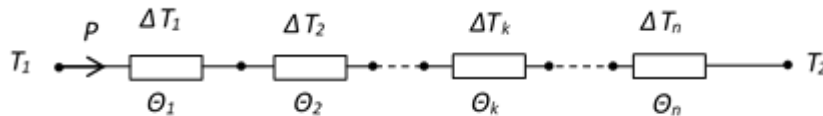


Рис. 2.3. Теплова схема послідовного з'єднання елементів

Для потоку тепла який йде від вузла теплового кола з температурою T_1 до вузла з температурою T_2 по декількох вітках справедливий перший закон Кірхгофа для теплових потоків:

$$P = \sum_{i=1}^n P_k, \quad (2.6)$$

де тепловий потік в k -тій вітці

$$P_k = \frac{\Delta T}{\theta_k}. \quad (2.7)$$

Звідси слідує, що теплова провідність n паралельно з'єднаних віток буде

$$\frac{1}{\theta} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\theta_k}. \quad (2.8)$$

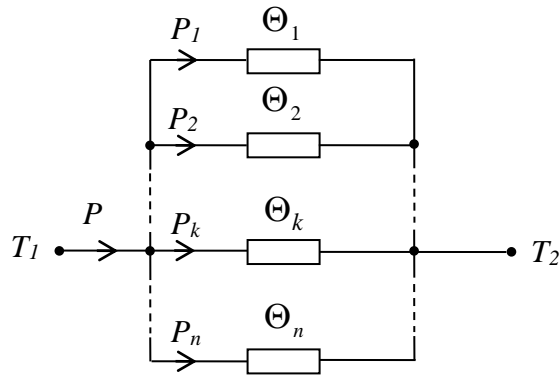


Рис. 2.4. Теплова схема паралельного з'єднання елементів

Конвекційний теплообмін – це процес переносу теплоти в речовині потоками самої речовини. Конвективний потік тепла описується законом Ньютона-Ріхмана

$$P_c = \alpha S (T - T_a) = \alpha S \Delta T, \quad (2.9)$$

де α - коефіцієнт конвекції, S – площа нагрітого тіла, T – його температура, T_a – температура середовища.

Звідси можна знайти величину теплового опору при теплообміні плоскої поверхні з оточуючим середовищем конвективним способом

$$\Theta = \frac{\Delta T}{P} = \frac{T - T_c}{P} = \frac{1}{\alpha S}. \quad (2.9)$$

Основне завдання при обчисленні теплового опору між нагрітою поверхнею та середовищем, це визначення коефіцієнта α . На величину коефіцієнта конвекції впливає багато чинників. Зокрема, він залежить від геометрії радіатора, орієнтації поверхні, її кольору, рівня її гладкості та ін.. Для чорного, плоского, металевого радіатора, розміщеного горизонтально нагрітою поверхнею доверху

$$\alpha = 1.3 \cdot A_2 \cdot \frac{\sqrt[4]{T_c - T_a}}{h}, \quad (2.10)$$

для цього ж радіатора розміщеного вертикально нагрітою поверхнею вбік

$$\alpha = A_2 \cdot \frac{\sqrt[4]{T_c - T_a}}{h} \quad (2.11)$$

де h – висота радіатора, T_c і T_a – відповідно середня температура радіатора і навколишнього середовища.

Залежність коефіцієнта A_2 від температури

Таблиця 2.3

Середня температура	0	10	20	30	40	80	100	120	140	150
A_2	1.42	1.4	1.38	1.36	1.34	1.31	1.27	1.26	1.25	1.25

В нормальних умовах, при відсутності вимушених потоків повітря коефіцієнт конвекції лежить в діапазоні $10 \div 25$ Вт/(м²·К). При наявності вимушених потоків ненагрітого повітря коефіцієнт теплообміну збільшується до 100 Вт/(м²·К). При застосуванні циркуляційних насосів у випадку рідинного охолодження $\alpha \leq 1000$ Вт/(м²·К) - при рідинному. При використанні напівпровідникових джерел світла малої і середньої потужності достатньо природного повітряного охолодження

Теплове випромінювання на відміну від теплопровідності та конвекції, відбувається без теплоносія, шляхом поглинання та випромінювання електромагнітних хвиль. Кожне тіло вище температури $T = 0$ К випромінює електромагнітне випромінювання у видимому та інфрачервоному діапазоні довжин хвиль (0,35 - 10 мкм). Теплова енергія, яка передається через випромінювання, залежить від фізичних властивостей матеріалу поверхні та геометричного розташування передавальної та приймальної поверхні. Випромінювальна здатність ε є параметром, який характеризує теплове поглинання та випромінювання нагрітої поверхні. Абсолютно чорне тіло (ідеальний випромінювач тепла) повністю випромінює і поглинає все електромагнітне випромінювання, яке падає на нього з будь-якою довжиною хвилі ($\varepsilon = 1$). На противагу цьому, поверхня реального тіла випромінює лише деяку частину теплового випромінювання. Тому реальні об'єкти називають "сірими" тілами ($\varepsilon < 1$). Таким чином, випромінювальна здатність тіла характеризує кількість випромінювання, яке воно випромінює порівняно з абсолютно чорним тілом.

Випромінювальна здатність типових матеріалів, які використовуються в охолоджувальних системах в світлотехніці .

Таблиця 2.4

Матеріал	Температура К	ε
Алюміній	300	0.04
Полірований алюміній	300	0.25
Окислений алюміній	300	0.40
Пластик	300	0.9
Лакована поверхня	400	0.9-0.97

Матеріал тіла і характер його поверхні мають значний вплив на випромінювальну здатність. Як правило, неметалеві та прозорі об'єкти є хорошими випромінювачами тепла, з випромінювальною здатністю понад 80 %. Випромінювальна здатність металів може змінюватися від 5 % до 90 %. Чим блискучіша поверхня металу, тим менша його випромінювальна здатність.

Приклади тепловипромінювальної здатності типових матеріалів, які використовуються в напівпровідникових системах, наведено в таблиці 2.4.

Теплове випромінювання описується законом Стефана-Больцмана. Закон Стефана-Больцмана узагальнює фізичні та геометричні фактори, які впливають потік тепла через теплове випромінювання. Густина потужності випромінювання (поглинання) світлового потоку

$$J = \frac{P}{S} = \varepsilon S \sigma T^4, \quad (2.12)$$

де ε - випромінювальна здатність, S – площа, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ постійна Стефана-Больцмана, T – абсолютна температура випромінюючої поверхні.

Охолодження електронних приладів за допомогою теплового випромінювання має важливе значення для пасивно охолоджуваних систем (вільна конвекція). Внесок теплового випромінювання в охолодження може

становити до 50 %. У випадку активного охолодження розсіювання тепла за допомогою теплового випромінювання відіграє меншу роль у порівнянні з тепловіддачею через конвекцію.

При передачі тепла від світлодіодної освітлювальної системи на основі *LED*-матриць до навколишнього середовища задіяні всі три механізми.

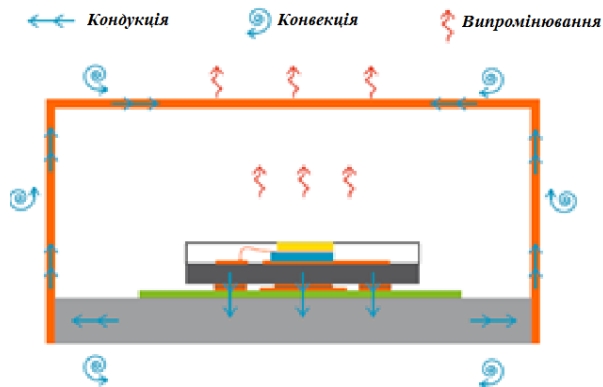


Рис. 2.5. Передача тепла в світлодіодній системі від *LED*-матриці до навколишнього середовища.

Зокрема, тепло, яке генерується в активній зоні світлодіодної матриці, передається теплопровідністю через світлодіодний корпус через теплопровідні прокладки а далі на радіатор. Від радіатора, тепло передається в навколишнє середовище за допомогою теплової конвекції та теплового випромінювання. Для візуалізації руху тепа, особливо у випадку складних систем використовують теплові схеми.

Аналогія між потоком електричного заряду та потоком тепла.

Таблиця 2.5

Потік заряду	Потік тепла
I	P
Закон Ома	Закон Фур'є
$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{R}$	$P = \frac{(T_1 - T_2)}{\theta}$
Визначення електричної провідності	Визначення термічної провідності
G	K
$G = \sigma \frac{S}{L}$	$K = \kappa \frac{S}{L}$

Визначення електричного опору R	Визначення термічного опору θ
$R = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{I}$	$\theta = \frac{(T_1 - T_2)}{P}$
Перший закон Кірхгофа для електричного кола	Перший закон Кірхгофа для теплового кола
$I = \sum_k I_k$	$P = \sum_k P_k$





2.2. Вибір типу та потужності джерел світла

Сучасна світлотехнічна промисловість випускає багато типів напівпровідникових джерел світла. В таблицях наведені основні параметри матриць серій СХА і СХВ. Особливістю даних матриць є висока щільність потоку світла при високому ККД перетворення електроенергії в світлову. Це дозволяє при мінімальних затратах виготовляти як окремі освітлювачі, так і різноманітні спеціальні освітлювальні прилади. Наприклад, матриці СХА2 Studio, які широко застосовуються для фото і кінозйомок. Світлодіодні матриці білого кольору свічення типу СХА і СХВ на сьогоднішній день є найпотужнішими освітлювальними приладами. Загальні витрати коштів на розробку, конструювання та виготовлення світлодіодних освітлювачів побудованих на основі таких матриць є значно меншими, порівняно із освітлювачами на основі дискретних елементів.

Для світлодіодних матриць серії СХА та СХВ компанія-виробник Cree Incorporated, надає результати тестових досліджень тривалістю понад 6000 годин, які регламентовано відповідними документами. При цьому розрахована за спецметодикою тривалість їх роботи, навіть при температурі 105°C перевищує 4 роки безвідмовної роботи. Область застосування світлодіодних матриць СХА - трекові і спотові освітлювачі для систем зонального, спрямованого і ненаправленого світла, в тому числі Parabolic Anodized Reflector лампи параболічним анодованим рефлектором.








Основні технічні параметри матриць серії СХА

Таблиця 2.6

Параметр				
Тип матриці	CXA1310	CXA1520	CXA1850	CXA2590
Розміри, мм	13.35*13.35	15.85*15.85	17.85*17.85	23.85*23.85
Діаметр випромінювача, мм	6	9	12	19
Світловий потік, лм	900...2000	1000...3800	2000...8300	5900...13500
Пряма напруга, В	17.8 35.6	35	35	69
Прямий струм, А (тип.)	0.7 0.35	0.5	1.4	1.2
Прямий струм, А (макс.)	1.05 0.525	0.9	2.1	1.8
Споживана потужність, Вт(тип/макс)	12.5/20	17.5/33	42/78	83/130





Основні технічні параметри матриць серії СХА

Таблиця 2.7

Параметр							
Тип світлодіоду	CXA1304	CXA1507	CXA1510	CXA1512	CXA1816	CXA1820	CXA1830
Розміри, мм	13.35*13.35	15.85*15.85	15.85*15.85	15.85*15.85	17.85*17.85	17.85*17.85	17.85*17.85
Діаметр випромінювача, мм	6	9	9	9	12	12	19
Світловий потік, лм	250...1050	500...1700	500...1900	1000...2500	1200...4050	1800...4400	2050...6500
Пряма напруга, В	9.0 18 36	17.5/35	17.5/35	18.2/36.4	36.2	36.2	36.4
Прямий струм, А (тип.)	0.4 0.2 0.1	0.4/0.2	0.5/0.25	0.7/0.35	0.45	0.55	0.8
Прямий струм, А (макс.)	1 0.5 0.25	0.75/0.35	0.9/0.45	1.2/0.6	0.9	1.05	1.4
Споживана потужність, Вт(тип/макс)	3.7/10	7.3/14	9/16	13/24	16/37	20/42	30/55



Основні технічні параметри матриць серії СХА.

Таблиця 2.8

Параметр				
Тип світлодіода	CXA	CXA	CXA	CXA
Розміри, мм	1304 13.35*13.35	1507 15.85*15.85	1512	1816 1820 17.85*17.85
Діаметр випромінювача, мм	6	9	12	19
Світловий потік, лм	250...1050	500...1700	500...1900	1000...2500
Пряма напруга, В	9.0	18	36	17.5/35
Прямий струм, А (тип.)	0.4	0.2	0.1	0.4/0.2
Прямий струм, А (макс.)	1	0.5	0.25	0.75/0.35
Споживана потужність, Вт (тип/макс)	3.7/10	7.3/14	9/16	13/24





Основні технічні параметри світлодіодних матриць серії CXB.

Таблиця 2.9

Параметр		
Тип світлодіода	CXB1310	CXB1520
Розміри, мм	13.35*13.35	15.85*15.85
Діаметр випромінювача, мм	6	9
Світловий потік, лм	1000...3400	1800...6500
Пряма напруга, В	16.5	33
Прямий струм, А (тип.)	0.7	0.35
Прямий струм, А (макс.)	1.4	0.7
Споживана потужність, Вт (тип/макс)	12.6/24	16.5/49


Основні параметри світлодіодних матриць серії CXB з діаметром випромінювача до 14мм.

Таблиця 2.10

Параметр				
Тип світлодіода	CXB1304	CXB1507	CXB1512	CXB1816
Розміри, мм	1304 13.35*13.35	1507 15.85*15.85	1512	1820 17.85*17.85
Діаметр випромінювача, мм	6	9	12	14
Світловий потік, лм	300... 1100	600... 1950	600... 3100	1400... 4500
Пряма напруга, В	8.6	17.3	34.5	1950... 5500
Прямий струм, А (тип.)	0.4	0.2	0.1	2100...7200
Прямий струм, А (макс.)	1	0.5	0.25	0.4/0.2
Споживана потужність, Вт (тип/макс)	3.5/10	7/14	12/22	16/34


Основні параметри світлодіодів серії CXB

Таблиця 2.11

Параметр					
	CXB320	CXB340	CXB340 0	CXB307 0	CXB390
Розміри, мм	23.85*23.85		27.35*27.35		34.85*34.85
Діаметр випромінювача, мм	19		23		30
Світловий потік, лм	2500... 8000	3500... 9600	3500... 12500	4000... 14000	8000... 18000
Пряма напруга, В	3.5	34.8	34.8	36	36 72
Прямий струм, А (тип./макс)	0.8/1.6	1.1/2.1	1.4/2.5	1.9/2.8	2.4/3.6 1.2/1.8
Споживана потужність, Вт(тип/макс)	28/61	39/79	49/93	69/107	87/137 87/137

Основні світлотехнічні параметри матриць типу CXA

Таблиця 2.12

Параметр				
	CXA1310	CXA1520	CXA1850	CXA2590
Розміри, мм	13.35*13.35	15.85*15.85	17.85*17.85	23.85*23.85
Діаметр випромінювача, мм	6	9	12	19
Світловий потік, лм	900...2000	1000...3800	2000...8300	5900...13500
Пряма напруга, В	17.8 35.6	35	35	69
Прямий струм, А (тип.)	0.7 0.35	0.5	1.4	1.2
Прямий струм, А (макс.)	1.05 0.525	0.9	2.1	1.8
Споживана потужність, Вт(тип/макс)	12.5/20	17.5/33	42/78	83/130

З порівняння технічних параметрів для світлодіодів різного типу видно, що світловий потік, який створюють матриці СХВ набагато більший ніж в матрицях СХА, а тепловий потік значно менший притих же геометричних розмірах. Часто світлодіодні лампи використовуються разом з рефлекторами.



Рис. 2.6. Оптика та арматура кріплення для світлодіодних матриць

3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1. Енергетичні співвідношення в термопарі

Однією з переваг термоелектричного охолодження над іншими його видами є незалежність ефективності процесів від масштабного фактора. Тому, основні кількісні енергетичні співвідношення можуть бути отримані при розгляді лише однієї термоелектричної пари, тобто простої пари напівпровідників (металів) різного типу провідності. Надалі, будемо розглядати лише напівпровідникові термопари, оскільки вони мають на порядок більшу термоелектричну добротність порівняно з металевими. Будемо вважати, що струм I проходить через термопару, один зі спаїв якої перебуває в контакті з тепловим навантаженням, а від іншої відводиться тепло.

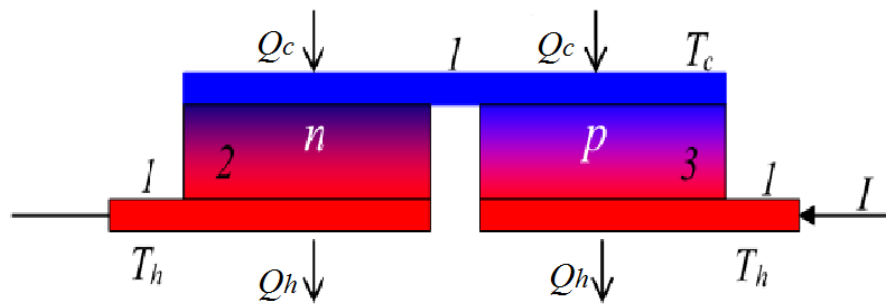


Рис. 3.1 Схема термоелектричної пари

Термопара складається з двох напівпровідникових елементів, які мають відповідно негативний (n -тип провідності) і позитивний (p -тип провідності) абсолютні коефіцієнти Зеебека. Повний опір R термопари визначається співвідношенням:

$$R = \frac{l_1}{S_1 \sigma_1} + \frac{l_2}{S_2 \sigma_2}, \quad (3.1)$$

де l_1 і l_2 – довжини термоелементів, S_1 і S_2 – площі поперечного перерізу термоелементів, σ_1 і σ_2 – відповідно електропровідність гілок охолоджуючого термоелемента.

Загальна теплопровідність K двох паралельних гілок термопари визначається співвідношенням

$$K = \frac{S_1 k_1}{l_1} + \frac{S_2 k_2}{l_2} \quad (3.2)$$

де k_1 і k_2 питома теплопровідність гілок.

Повний опір R і загальна теплопровідність K не є незалежними, вони зв'язані через розміри елементів:

$$\frac{l_1 S_2}{l_2 S_1} = \left(\frac{\sigma_1 k_1}{\sigma_2 k_2} \right)^{1/2}. \quad (3.3)$$

Тоді

$$KR = \left[\left(\frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left(\frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2, \quad (3.4)$$

При проходженні електричного струму через термопару в місці контакту поглинається або виділяється тепло. Виникає так званий поверхневий ефект Пельтьє. Якщо струм протікає в напрямку від напівпровідника p -типу провідності до напівпровідника n -типу провідності (як вказано на рисунку), то в місці контакту електрони будуть долати потенціальний бар'єр забираючи тепло в місці контакту. При цьому контакт буде охолоджуватися.

Кількість поглинутого тепла визначається виразом

$$Q_c = \pi_{12} I, \quad (3.5)$$

де π_{12} - коефіцієнт Пельтьє,

$$\pi_{pn} = \alpha_{pn} \left(T - \frac{\Delta T}{2} \right), \quad (3.6)$$

$\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$, α_p і α_n - коефіцієнти термоЕРС віток p -типу і n -типу провідності, T – середня абсолютна температура, ΔT – різниця температур між гарячим і холодним спаєм.

Ефекту охолодження перешкоджає джоулеве тепло у вітках і тепло, що підводиться від гарячого спаю. Половина всього джоулівського тепла переходить до кожного зі спаїв. Кількість тепла, яке поглинається холодним спаєм від джерела в одиницю часу визначається співвідношенням

$$Q_c = \alpha_{pn} \cdot T_c \cdot I - \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot (T_h - T_c), \quad (3.7)$$

Кількість тепла, яке поглинається називається холодопродуктивністю [8,9]:

Аналогічно знайдемо кількість тепла, яка виділяється на гарячому спаї

$$Q_h = \alpha_{pn} \cdot T_h \cdot I + \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot (T_h - T_c), \quad (3.8)$$

тут α_{pn} - диференціальний коефіцієнт термоЕРС, K - загальна теплопровідність двох паралельних гілок термопари

$$K = \frac{S_1 k_1}{l_1} + \frac{S_2 k_2}{l_2}, \quad (3.9)$$

k_1 і k_2 питома теплопровідність гілок, R – сума опорів гілок, T_c – абсолютна температура холодного спаю, T_h – абсолютна температура гарячого спаю, I – сила споживаного струму.

Кількість тепла, яка йде від гарячих спаїв до холодних кондуктивним шляхом

$$Q_c = K \cdot (T_h - T_c), \quad (3.10)$$

Керуючись законом збереження енергії, кількість тепла, яка виділяється на гарячому спаї буде більшою від кількості тепла, яка поглинається холодним спаєм на величину електричної потужності джерела енергії

$$Q_h = Q_c + W. \quad (3.11)$$

Потужність, яку термоелемент споживає від джерела електроенергії складається з двох частин. Перша - описує роботу по переносу носіїв заряду в напрямку, протилежному до напрямку дії термоелектричного поля, яке виникає внаслідок дії ефекту Зебека

$$W_z = \alpha_{pn} \cdot I \cdot (T_h - T_c), \quad (3.12)$$

друга описує виникнення тепла, яке згідно із законом Джоуля рівне

$$W_d = I^2 \cdot R. \quad (3.13)$$

Очевидно, що:

$$W = Q_h - Q_c = \alpha_{pn} \cdot I \cdot (T_h - T_c) + I^2 \cdot R. \quad (3.14)$$

Запишемо холодильний коефіцієнт як відношення поглинутої термоелектричною парою кількості холоду до затраченої при цьому електричної потужності у вигляді [10]:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W} = \frac{\alpha_{pn} \cdot T \cdot I - \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot \Delta T}{\alpha_{pn} \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R}. \quad (3.15)$$

тут $\Delta T = T_h - T_c$ перепад температур між спаями, $T = (T_h - T_c)/2$ - середня температура.

Як видно з (3.15) коефіцієнт охолодження залежить від величини струму і від перепаду температур ΔT . Для сучасних термоелектричних модулів холодильний коефіцієнт знаходиться в діапазоні $\varepsilon = 0.30 \div 0.80$. При і малому перепаді температури і малих струмах

$$\varepsilon = \lim_{I \rightarrow 0, \Delta T \rightarrow 0} \frac{\alpha_{pn} \cdot T \cdot I - \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot \Delta T}{\alpha_{pn} \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R} = \infty. \quad (3.16)$$

З аналізу формули (3.15) випливає, що для того щоб отримати високу охолоджуючу ефективність термопар, потрібно її живити мінімально можливим струмом. Нижню межу струму можна знайти шляхом теоретичного розрахунку, або експериментально. Зокрема, струм треба зменшувати до того моменту, поки його достатньо для компенсації зворотного потоку тепла викликаного кондукцією. Для забезпечення необхідної холодопродуктивності, треба використовувати термоелектричні модулі з великою кількістю термопар.

В залежності від потреб, режимом роботи для конкретного термоелектричного модуля охолодження можна керувати. Максимально можливий холодильний коефіцієнт знайдемо із умови екстремуму функції $\varepsilon = \varepsilon(I)$

$$\frac{d\varepsilon(I)}{dI} = 0. \quad (3.17)$$

Зокрема, холодильний коефіцієнт стане максимально можливим при струмі

$$I_{opt} = \frac{\alpha_{pn} \cdot (T_h - T_c)}{R \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{Z \cdot (T_h - T_c)}{2}} - 1 \right]}, \quad (3.18)$$

і складе величину

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \frac{\sqrt{1 + \frac{Z \cdot (T_h - T_c)}{2}} - \frac{T_h}{T_c}}{\sqrt{1 + \frac{Z \cdot (T_h - T_c)}{2}} + 1} \quad (3.19)$$

Максимально можливу холодопродуктивність знайдемо із умови екстремуму функції $Q_c = Q_c(I)$

$$\frac{dQ_c(I)}{dI} = 0. \quad (3.20)$$

При максимальній холодопродуктивності холодильний коефіцієнт складе величину

$$\varepsilon_d = \frac{1}{2T_h} \left(T_c - \frac{2(T_h - T_c)}{ZT_c} \right). \quad (3.21)$$

Представлений аналіз показує, що холодильний коефіцієнт суттєво залежить від величини так званого параметра термоелектричної добротності напівпровідникових матеріалів Z . Термоелектрична добротність описується формулою

$$Z = \frac{\alpha_{pn}^2 \sigma}{k}, \quad (3.22)$$

тут α , σ і k - відповідно диференціальний коефіцієнт термоЕРС, питомий коефіцієнт електропровідності, і питомий коефіцієнт теплопровідності гілок.

Як видно із (3.19) холодопродуктивність і холодильний коефіцієнт збільшуються при збільшенні термоелектричної добротності. Наприклад, при $Z \rightarrow \infty$ він стає рівним холодильному коефіцієнту ідеальної теплової машини Карно

$$\varepsilon_k = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} = \frac{\alpha_{pn} \cdot T_c \cdot I}{\alpha_{pn} \cdot I \cdot (T_h - T_c)} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (3.23)$$

Режим максимальної холодопродуктивності актуальний для систем охолодження малої, або дуже малої потужності. В таких системах заощадження електричної енергії не є важливим. Навпаки, в системах середньої і великої потужності доцільно працювати в режимі максимального холодильного коефіцієнта [38].

Змінювати режим роботи термоелектричного модуля можна шляхом зміни величини струму. Як правило, термоелектричний модуль працює при $I=0.25 - 0.8 I_{max}$. Отже, термоелектричні модулі мають високу функціональну гнучкість. Якщо режим максимальної холодопродуктивності настає при максимальному робочому струмі I_{max} , то режим максимального холодильного коефіцієнта - відповідно до змін перепаду температур на спаях.

На останок зазначимо, що максимальної різниці температур між спаями термоелемента можна тільки при нульовій холодопродуктивності $Q_c = 0$, і навпаки, при $\Delta T = 0$ досягається максимальна холодопродуктивність Q_c .

3.2. Термоелектричний модуль

Мініатюризація на 42 півпровідникових джерел світла і збільшення кількості світловипромінюючих кристалів в одному пристрої приводить до збільшення густини теплового потоку. Це призводить до перегріву світлодіодної системи освітлення. Для інтенсифікації відбору тепла від світлодіодних систем все частіше використовуються термоелектричні модулі (ТМ) [1, 2]. Типовий термоелектричний модуль зображений рисунку (3.2). Він складається з багатьох послідовно зкомутованих термопар. Кожна з термопар контактує з одним із колекторів тепла. В результаті проходження електричного струму між колекторами ТМ виникає перепад температури. При цьому верхній колектор охолоджується, а нижній нагрівається. Холодний використовується для поглинання тепла, яке виділяє світлодіодна матриця.

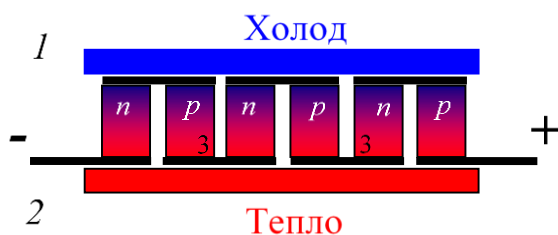


Рис. 3.2. - Схема ТМ: 1 – холодний колектор; 2 – гарячий колектор, 3 – напівпровідникові гілки.

По суті, ТМ відіграє роль теплового насоса, який перекачує тепло від холодного колектора до гарячого. Гарячий колектор ТМ охолоджують потоками повітря або рідини. Крім функції термостабілізації використання ТМ дає можливість досягти температури світлодіода нижчої ніж температура середовища. Термоелектрична система термостабілізації, в порівнянні з іншими системами, має очевидні переваги, а саме: високу надійність та компактність, малу вагу та безшумність, високу швидкодію.

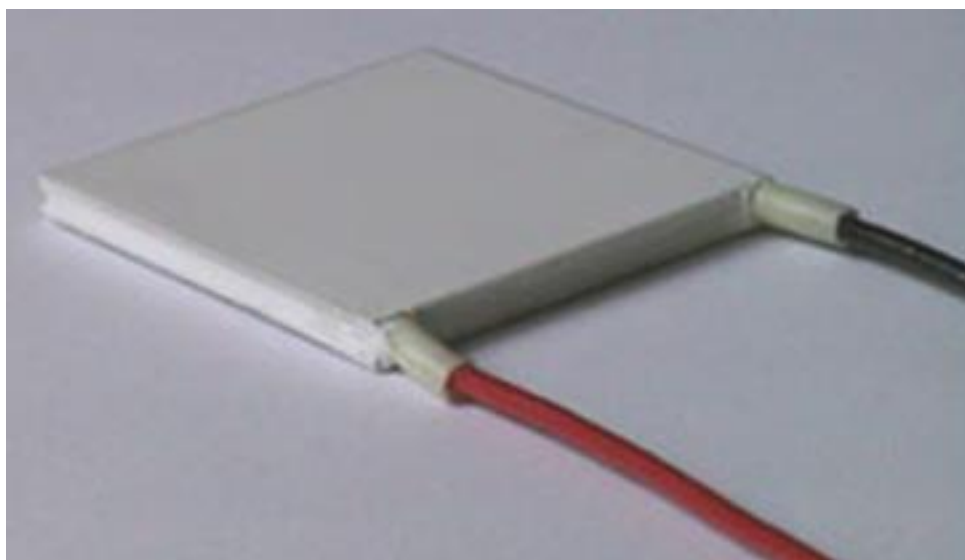


Рис. 3.3. Термоелектричний модуль А ТМ 11.2-127-11.4 HR2

Термоелектричний модуль є завершеним пристроєм, що складається з кількох десятків термопар. Термопари знаходяться між двома керамічними колекторами. Колектори виготовлені з кераміки, і мають малу електропровідність і велику теплопровідність (рис. 3.2). Термопари комутаційними пластинками з'єднані в послідовно-паралельне електричне коло, до якого від драйвера підводиться струм живлення. Модуль може мати

від кількох штук до кількох сотень штук термопар. Це дозволяє виготовляти модулі з наперед заданою холодопродуктивністю. Послідовно-паралельне сполучення термопар сприяє підвищенню надійності пристрою. Оскільки ТМ не може працювати без теплового навантаження, то від його гарячого колектора потрібно постійно відводити тепло. Для цього, на гарячий колектор кріпиться охолоджуючий радіатор. Об'єкт охолодження кріпиться до холодного колектора модуля.

Застосування термоелектричних модулів в якості стабілізаторів теплового режиму напівпровідникових джерел світла показало їх високу ефективність. Проте, треба звертати увагу на порядок їх застосування, який впливає з особливостей конструкції приладу. Вирішальне значення має потужність модуля, яка визначається геометричними розмірами і кількістю термопар в ньому. Деякі типи термоелектричних модулів наведені в таблиці 3.1.

Типи сучасних термоелектричних модулів

Таблиця 3.1

Тип термоелектричного модуля	Характеристики					
	I_{max} (A)	U_{max} (B)	$P_{c\ max}$ (Вт)	ΔT_{max} (°C)	К-сть. віток	Розмір вітки (мм)
A-TM 11.2-127-1.4	11.2	15.4	108.0	70	127	40 x 40 x 3.2
A-TM 11.2-127-1.4 HR1	11.2	15.4	108.0	69	127	40 x 40 x 3.2
A-TM 11.2-127-1.4 HR2	11.2	15.4	108.0	68	127	40 x 40 x 3.2
A-2TM 9.0-126/63-1.4 HR1	9.0	13.5	28	94	126	40x40x5.4
A-2TM-8.5-126/63-1.4 HR1	8.5	13.2	22.0	95	126	40x40x6.3
A-2TM-7.0-126/63-1.4 HR1	7.0	13.1	27.0	82	126	40x40x5.4
A-2TM-10.0-126/63-1.4 HR1	10.0	13.3	33.0	93	126	40x40x4.8
A-2TM-6.5-126/63-1.4 HR1	6.5	13.3	19.0	93	126	40x40x6.7
A-2TM-7.0-126/63-1.4 HR1	7.0	14.0	25.0	90	126	40x40x5.8
A-2TM 11.0-127/126-1.4 HR1	11.0	11.6	38	96	127	40x40x5.9
A-2TM 8.0-127/126-1.4 HR1	8.0	10.0	32	95	126	40x40x6.3
A-TM 8.5-127-1.4	8.5	15.4	72.0	72	127	40 x 40 x 3.7
A-TM 8.5-127-1.4 HR1	8.5	15.4	72.0	71	127	40 x 40 x 3.4
A-TM 8.5-127-1.4 HR2	8.5	15.4	72.0	70	127	40 x 40 x 3.7
A-TM 6.0-127-1.4	6.0	15.4	53.0	72	127	40 x 40 x 4.2
A-TM 6.0-127-1.4 HR1	6.0	15.4	53.0	71	127	40 x 40 x 3.8
A-TM 6.0-127-1.4 HR2	6.0	15.4	53.0	70	127	40 x 40 x 4.2
A-TM 3.9-127-1.4	3.9	15.4	35.0	73	127	40 x 40 x 5.1
A-TM 3.9-127-1.4 HR1	3.9	15.4	35.0	71	127	40 x 40 x 4.8
A-TM 3.9-127-1.4 HR2	3.9	15.4	35.0	70	127	40 x 40 x 5.1

A-TM 11.2-127-11.4 HR2 При виборі типу і потужності термоелектричного модуля важливо забезпечити необхідну інтенсивність охолодження. Зокрема, малопотужний модуль не забезпечить необхідну потужність охолодження. Це спричинить порушення теплового режиму охолоджуваного елемента і його передчасний вихід з ладу. В той же час, застосування ТМ завеликої потужності спричинить надто сильне зниження температури холодного колектора температури точки роси, що може призвести до короткого замикання.

3.3. Розрхунок температури зони випромінювання

Для збільшення потужності світлодіодних матриць потрібно постійно збільшувати кількість світловипромінюючих кристалів. Тому, потужні світлодіодні матриці складаються із сотень з'єднаних між собою світлодіодних кристалів. Звичайно, що при цьому постійно зростає і кількість виділеного

ними тепла. Для запобігання перегріву матриці і стабілізації її теплового режиму в системах відводу тепла активно застосовуються активні засоби охолодження. Найбільш перспективними на сьогоднішній день є термоелектричні модулі (ТЕМ). Для розрахунку теплового режиму матриці необхідно побудувати її теплову математичну модель. Для спрощення розрахунків будемо вважати, що всі світлодіоди перебувають приблизно в однакових теплових умовах. Тому, для розрахунку теплового режиму матриці в цілому достатньо розрахувати тепловий режим окремого світлодіода.

Керуючись законом Джоуля знайдемо кількість тепла, яке виділяє матриця

$$Q_t = (1 - \eta_e) \cdot U_f \cdot I_f, \quad (3.23)$$

де U_f і I_f прямі струм та напруга, η_e – квантова ефективність.

В рамках побудованої математичної моделі будемо нехтувати потоками розсіювання тепла матриці, які розсіюються в навколишнє середовище. Зокрема, вважаємо, що кількість виділеного матрицею тепла повністю поглинається холодним колектором ТЕМ

$$Q_t = Q_c \quad (3.24)$$

Нехай від гарячого колектора до радіатора охолодження відводиться кількість тепла Q_h . Щоб розрахувати температуру активної зони СД будемо використовувати метод електро-теплової аналогії [7]. Він полягає в тому, що готові формули, які використовуються для розрахунку електричних кіл застосовуються для розрахунку теплових кіл. Відповідна теплова схема системи термостабілізації приведена на рисунку 3.5. На схемі Θ_{js} – тепловий опір між активною зоною і теплоконтактною площадкою, $\Theta_{sc} = \Theta_{hr}$ – теплові опори між теплоконтактною площадкою і холодним колектором та між гарячим колектором і радіатором, Θ_{ra} – тепловий опір між радіатором та навколишнім середовищем, $\Delta T = T_h - T_c$ - різниця абсолютних температур між гарячим та холодним колекторами.

Використаємо другий закон Кірхгофа для теплових схем. Зокрема, різницю температур між кінцями теплової вітки запишемо як алгебраїчну суму різниць температур на теплових елементах:

$$T_j = T_a + P_c \cdot (\Theta_{js} + \Theta_{sc}) + P_h \cdot (\Theta_{hr} + \Theta_{ra}) - \Delta T, \quad (3.25)$$

Знайдемо кількість тепла, яке поглинається холодним колектором

$$P_c = \alpha_{pn} \cdot T_c \cdot I - \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot \Delta T, \quad (3.26)$$

Знайдемо кількість тепла, яке віддається гарячим колектором

$$P_h = \alpha_{pn} \cdot T_h \cdot I + \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot \Delta T, \quad (3.27)$$

Кількість тепла, яка виділяється на гарячому колекторі більша від кількості тепла, яку поглинає холодна поверхня на величину електричної потужності джерела електроенергії

$$Q_h = Q_c + W. \quad (3.28)$$

Енергія джерела W йде на виконання роботи по транспортуванню носіїв заряду проти термоЕРС, яка виникає згідно із законом Зеебека в термоелектричному колі, та на тепло Джоуля:

$$W = Q_h - Q_c = \alpha_{pn} \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R \quad (3.29)$$

Визначимо холодильну ефективність роботи ТЕМ співвідношенням:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c}. \quad (3.30)$$

Керуючись другим законом Кірхгофа для теплових потоків запишемо рівняння теплової рівноваги для теплової гілки.

$$T_j = T_a + Q_c \cdot \Theta_c + Q_c \cdot \Theta_h + (\alpha_{pn} \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R) \cdot \Theta_h - \Delta T, \quad (3.31)$$

звідки, для температури перевищення активної зони над температурою середовища отримаємо

$$\Delta T_j = T_j - T_a = Q_c \cdot (\Theta_c + \Theta_h) + (\alpha_{pn} \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R) \cdot \Theta_h - \Delta T, \quad (3.32)$$

де $\Theta_c = \Theta_{js} + \Theta_{sc}$, і $\Theta_h = \Theta_{hr} + \Theta_{ra}$ – теплові опори з боку холодного і гарячого колекторів,

$$\Delta T = \frac{1}{K} \cdot \left(\alpha_{pn} \cdot T_c \cdot I - \frac{I^2 \cdot R}{2} - Q_c \right), \quad (3.33)$$

перепад температури між колекторами.

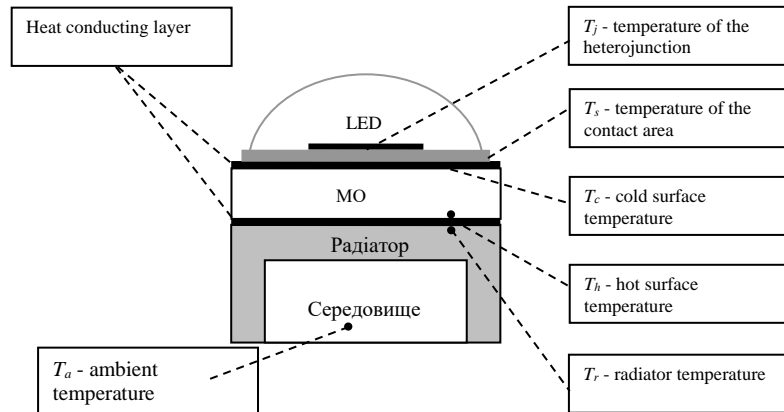


Рис. 3.4. Схема компоновки термоелектричного стабілізатора температури СД на основі МО.

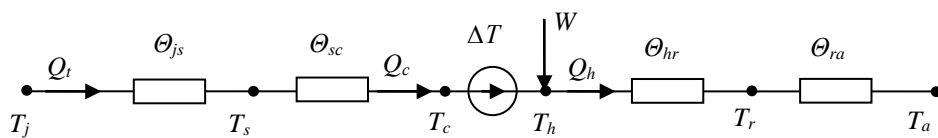


Рис. 3.5. Теплова схема термоелектричної стабілізації СД.

В формулі (3.31) перша складова відповідає за збільшення температури кристалу внаслідок передачі тепла, що виділяється кристалом і самим модулем. Друга – внаслідок виділення тепла Пельтьє. Третя складова визначає ефект термоелектричного охолодження модуля. Очевидно, що охолодження забезпечується перепадом температур між гарячим і холодним колекторами МО. Взагалі кажучи, саме від взаємного співвідношення абсолютних величин цих складових залежить ефективність роботи термоелектричної системи стабілізації.

Таким чином, температура активної зони кристала залежить від його потужності, температури середовища, сумарного теплового опору гілки від активної зони до середовища і режиму роботи модуля охолодження. Зміна режиму роботи МО відбувається при зміні величини струму. Для даного модуля охолодження важливим моментом є знаходження такої величини струму живлення, при якій здійснюється ефективне охолодження.

Дослідимо вплив струму живлення модуля охолодження заданої максимальної потужності на температуру активної зони світлодіодної матриці. В якості джерела світла виберемо світлодіодну матрицю XL 2590 CXA, параметри якої приведені в таблиці 3.2 [11].

Параметри матриці XL 2590 CXA

Таблиця 3.2

Серія	Ном. Напр. (В)	Прямий струм (мА)	Макс. потужн. (Вт)	Світл. потік (Лм)	Тепл. опір (К/Вт)	Макс. темп. активної зони (С°)
XL1310CX A	18	700-1050	20	1400-2100	1.2	125
XL1310CX A	36	350-525	20	1400-2100	1.2	125
XL1520CX A	35	500-900	33	2000-4000	1.2	125
XL1850CX A	35	1400-2100	78	6000-9400	0.6	125
XL2590CX A	69	1200-1800	130	8000-15600	0.6	125

Змінюючи величину струму живлення, потужність матриці можна змінювати в досить широкому діапазоні. Зокрема, при зміні струму в діапазоні 1200-1800мА інтервал зміни потужності складе 83-124Вт. Очевидно, що максимальна теплова потужність матриці повинна бути меншою ніж максимальна холодопродуктивність модуля охолодження. Для даної матриці це:

$$Q_{t \max} = (1 - \eta_e) \cdot U_{f \max} \cdot I_{f \max} = 0.75 \cdot 69 \cdot 1.8 = 93 \text{ Вт.}$$

Тип МО виберемо керуючись тепловою потужністю, габаритами і вимогами до температурного режиму експлуатації СД.

При проведенні розрахунків були використані характеристики серійних А-ТМ 11.2-127-1.4 HR2 [12] з параметрами: максимальний струм $I_{max} = 11,2 A$, максимальна напруга $U_{max} = 15,4 V$, максимальна холодопродуктивність при нульовій різниці температури $P_{c,max} = 108.0 W$, максимальний перепад температури при нульовій холодопродуктивності $\Delta T_{max} = 68 K$.

Застосування МО завжди передбачає використання активного або пасивного радіатора, який покликаний розсіяти тепловиділення світлодіода, і тепло Джоуля термоелемента. Тепловий опір сучасних активних радіаторів (з вентилятором) лежить в діапазоні $\Theta_{ra}=0,2 \div 0,8 K/Wm$. Найкращі результати дає використання теплових трубок. При цьому тепловий опір можна зменшити до $\Theta_{ra} = 0,1 K/W$. Рідинні охолоджувачі дають ще кращі результати. Зокрема, їх тепловий опір можна зменшити до $\Theta_{ra} = 0.01 K/W$. Однак, вони є надто громіздкими і важко інсталиються в освітлювальну систему.

Шляхом комп'ютерного числового аналізу отриманих аналітичних співвідношень в середовищі Mathcad було отримано ряд графічних залежностей. Зокрема, рис. 3.6 зображена графічна залежність температури перегріву активної зони СД від струму МО при різних величинах теплової потужності СД.

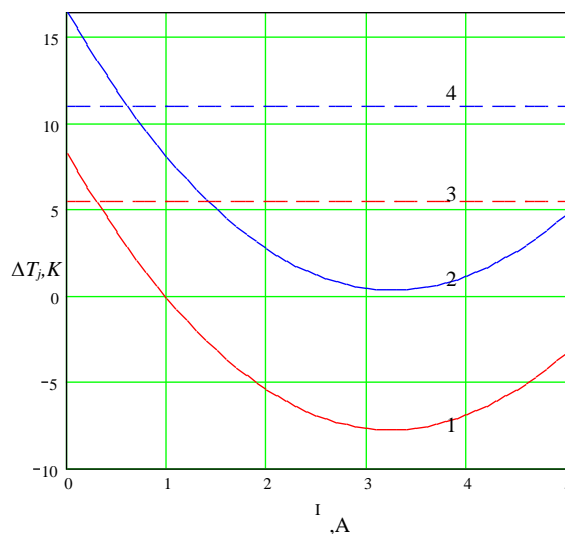


Рис.3.6. Графічна залежність температури перегріву активної зони кристала від величини струму МО при потужності $Q_c=10 W$ для різних теплових опорів з гарячого боку МО. Суцільні криві 1 і 2 при $\Theta_h=0.2K/W$ і

$\Theta_h=0.6K/W$ відповідно. Штрихові криві при тих же параметрах, але при відсутності МО.

Мінімуми кривих $\Delta T_j(I)$ відповідають роботі МО в режимі максимальної ефективності, при якій досягається мінімальна температура активної зони. Таким чином, при Зрозуміло, що при постійних струмах, величина яких близька до оптимального, система охолодження дає можливість добитися нижчих температур, порівняно з традиційною. На графіку штриховими лініями нарисовані температурні залежності без модулів охолодження, розраховані по формулі (2.27) для аналогічних величин термічного опору.

Графічна залежність температури перегріву активної зони від струму живлення ТЕМО при різних значеннях термічного опору з гарячого боку представлена на рисунку 2.3.

Очевидно, що із збільшенням Θ_h ефективність охолодження падає а розташування мінімальних значень $\Delta T_j(I)$ зсувається в бік менших струмів. При деяких співвідношеннях між потужністю МО і потужністю СДМ можливе зниження температури активної зони до температури середовища, а іноді навіть і нижчої. Це особливо важливо тоді, коли температура середовища близька до температури активної зони СДМ.

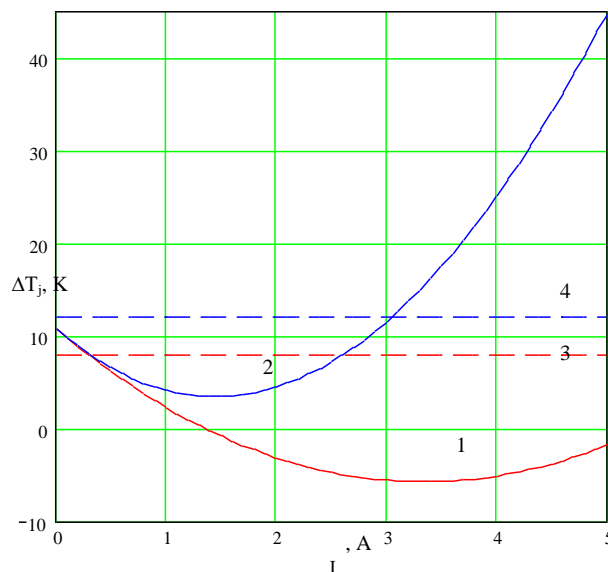


Рис.3.7. Графічна залежність температури перегріву активної зони кристала від величини струму МО при потужності $Q_c=100\text{ W}$ для різних теплових опорів з гарячого боку МО. Суцільні криві 1 і 2 при $\Theta_h=0.2\text{K/W}$ і $\Theta_h=0.6\text{K/W}$ відповідно. Штрихові криві при тих же параметрах, але при відсутності МО.

Як видно з графіка, із збільшенням струму перепад температур між колекторами збільшується. Крім того, перепад визначається тепловим навантаженням. Наприклад, при зменшенні теплової потужності перепад збільшується і навпаки, при збільшенні - зменшується.

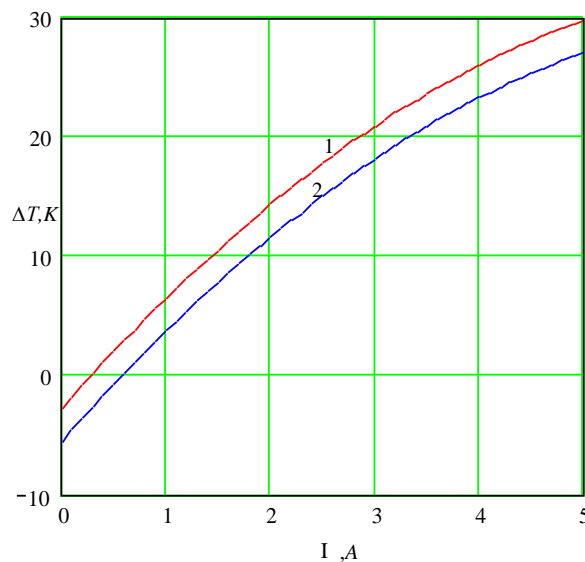


Рис.3.8. Графічна залежність перепаду температури між колекторами від струму МО при різних потужностях кристалу. Крива 1 при $Q_c=10\text{Вт}$, крива 2 при $Q_c=20\text{Вт}$.

Застосування МО наділяє систему термостабілізації властивістю охолодження, і дає можливість знизити температуру активної зони світлодіода, до температур, рівних або нижчих від температури середовища. Керування температурою активної зони світлодіода в такому широкому діапазоні дозволить суттєво збільшити світловіддачу світлодіодів. Наприклад, збільшуючи струм живлення – збільшуємо світловий потік. При одночасному зменшенні температури активної зони потік продовжуватиме збільшуватися.

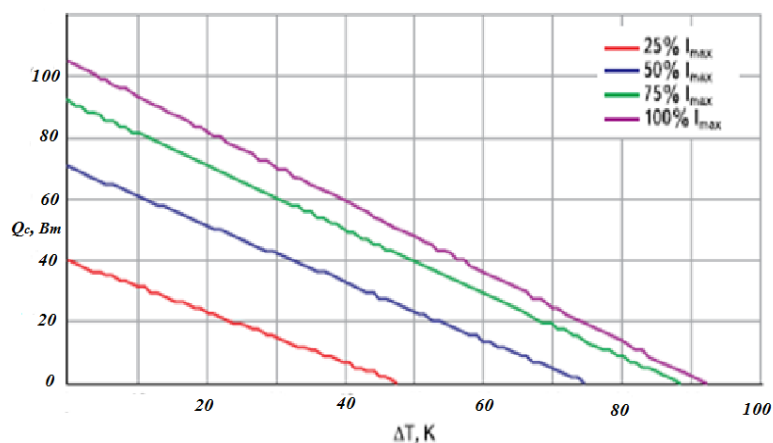


Рис.3.9. Графічна залежність холодильної потужності від різниці температур між колекторами для термоелектричного модуля АТМ 11.2-127-11.4 HR2.

Із графіка випливає, що максимальна різниця температур між колекторами можлива при нульовій холодопродуктивності $Q_c = 0$. І навпаки, при нульовій різниці температур генерується максимальна кількість холоду Q_{max} (при струмі I_{max}). Тут доречно аналогія із двигуном постійного струму, в якому максимальна частота обертів ротора n_{max} досягається при нульовому механічному моменті на валу ($M=0$) і його повній зупинці. І навпаки, при зупиненому роторі досягається максимальний електромагнітний момент.

Потужність модуля Q_{max} залежить тільки від висоти напівпровідникових елементів і їх сумарної площі поперечного перерізу, а вона може бути як завгодно великою. В даний час профільними підприємствами серійно випускаються МО з холодильною потужністю понад 300Вт .

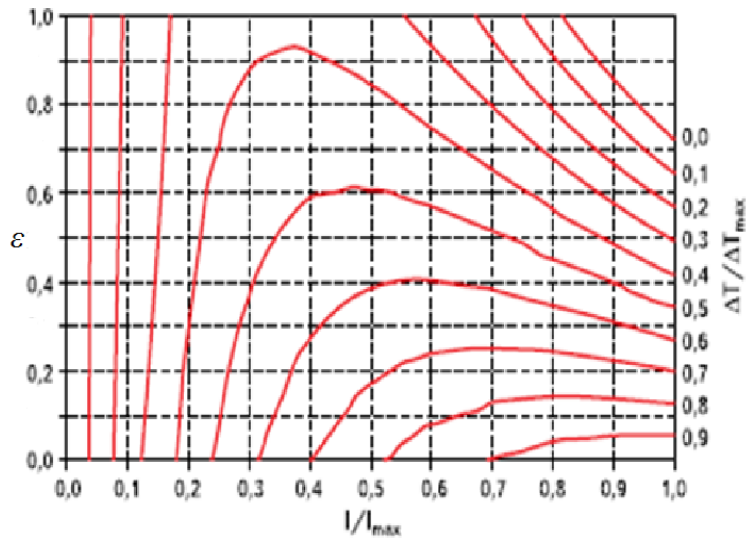


Рис.3.10. Графічна залежність холодильного коефіцієнта від струму МО при різних перепадах температур між колекторами.

3.4. Світло теплове моделювання багатоеlementних матриць

Будемо розглядати стабілізацію температурного режиму світлодіодних матриць великої потужності. Оскільки матриця складається з великої кількості світлодіодів, то в якості теплової моделі розглядатимемо модель одного з її структурних елементів – окремого світлодіода (СД). На основі методу регресійного аналізу [0] температурну залежність світлового потоку можна представити лінійною функцією

$$\Phi|_{I_f=I_{f0}}(T_j) = \Phi_0 [c_{f0} - c_{f1}(T_j - T_{j0})], \quad (3.34)$$

де Φ_0 – початковий світловий потік (при температурі активної зони $T_{j0}=85\text{ C}$ і при струмі $I_{f0}=0.45\text{ A}$), $c_{f0}=1$, $c_{f1}=0.0032\text{ K}^{-1}$.



Рис. 3.11. Схематична будова світлодіодного елемента.

Дана формула в межах інтервалу $T_j = 25 \div 150 \text{ C}$ описує світловий потік з точністю до 0.5%. Із збільшенням струму частота зіткнень електронів з дірками з випромінюванням світлових квантів збільшується. Це призводить до збільшення потоку світла. Відповідна графічна залежність світлового потоку від струму зображена на рисунку 5.2 [0], яку можна апроксимувати параболічною функцією

$$\Phi|_{T_j=T_{j0}}(I_f) = \Phi_0 \left[-d_{f0} + d_{f1} \frac{I_f}{I_{f0}} - d_{f2} \left(\frac{I_f}{I_{f0}} \right)^2 \right] \quad (3.35)$$

де $d_{f0} = 0.05$, $d_{f1} = 1.45$, $d_{f2} = 0.40$, $T_{j0} = 85 \text{ C}$, $I_{f0} = 0.45 \text{ A}$.

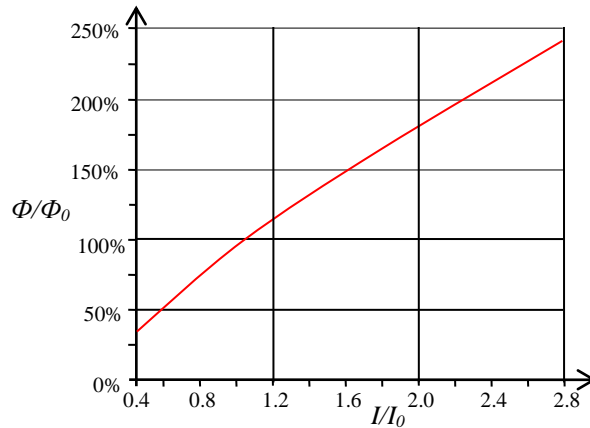


Рис. 3.12. Типова залежність потоку світла від сили струму для матриць XL 2590 CXA.

Як відомо, коли функція залежить від двох незалежних змінних то її можна представити у вигляді їх добутку цих функцій. Оскільки, світловий потік залежить від прямого струму і температури, то його представити у вигляді добутку:

$$\Phi(T_j, I_f) = \Phi_0 \left[c_0 - c_1 (T_j - T_{j0}) \right] \left[-d_{f0} + d_{f1} \frac{I_f}{I_{f0}} - d_{f2} \left(\frac{I_f}{I_{f0}} \right)^2 \right] \quad (3.36)$$

На основі записаної функції, знайдемо оптимальне співвідношення між температурним режимом і параметрами системи термостабілізації. Для приросту світлового потоку отримаємо

$$d\Phi = \frac{\partial\Phi(T_j, I_f)}{\partial T_j} dT_j + \frac{\partial\Phi(T_j, I_f)}{\partial I_f} dI_f. \quad (3.37)$$

Очевидно, що при зміні T_j та I_f найбільший приріст світлового потоку буде при одночасному виконанні умов

$$\frac{\partial\Phi(T_j, I_f)}{\partial I_f} \Big|_{T_j=const} > 0, \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial\Phi(T_j, I_f)}{\partial T_j} \Big|_{I_f=const} > 0 \quad (3.39)$$

Умова (3.38) виконується завжди, адже при збільшенні струму світловий потік завжди збільшується. Виконання умови (3.39) можна забезпечити при одночасному активному охолодженні робочої зони світлодіода СД.

Таким чином, для забезпечення генерації великого світлового потоку світлодіодною матрицею слід її живити максимальними струмами одночасно знижуючи температуру робочої зони. Запропонований узагальнений алгоритм дозволяють отримати максимально можливий світловий вихід СД матриці залежно від її теплового режиму. Дана методика дозволить вибрати температуру гетеропереходу і прямий струм на основі світлового потоку, близького до максимальної величини.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Аналіз можливих небезпечних і шкідливих виробничих чинників, електробезпеки і пожежної безпеки

Підстерігати небезпека у вигляді різних негативних факторів нас може практично скрізь [22, 23]. Навіть на самих нешкідливих робочих місцях можна говорити про шкідливий вплив комп'ютерів, тривалої сидячої роботи і про багато іншого. На багатьох виробництвах робота пов'язана з постійним впливом на працівників несприятливих умов. Шкідливі та небезпечні виробничі фактори (ВФ) нерозривно пов'язані між собою. ВФ - це фактори, які в результаті свого тривалого або короткочасного впливу на людину призводять до погіршення стану здоров'я або до травми. На виробництвах з такими умовами праці різні нещасні випадки відбуваються досить часто.

ВФ - це фактори, які, діючи на працівника, знижують його працездатність або призводять до різних захворювань, їх часто ще називають професійними хворобами. Варто зазначити, що межа між цими двома групами факторів досить умовна. При деяких умовах шкідливі виробничі фактори можуть стати небезпечними. Наприклад, підвищена вологість відноситься до несприятливих умов праці, вона може викликати різні захворювання дихальної системи. Якщо людині доводиться в таких умовах працювати з електричним струмом, то це стає вже занадто небезпечно, а не просто шкідливо.

Всі фактори на будь-якому підприємстві можуть мати різне походження. Часто можна зустрітися з несприятливими умовами праці, які виникають з вини керівництва. Це питання потребує особливої уваги з боку контролюючих органів. Слід зазначити, що немає чіткої межі між шкідливими та небезпечними факторами, вона завжди умовна і в будь-який момент може бути зруйнована. На виробництві завжди є технологічні процеси, обладнання, які є джерелом виділення ВФ. До цих проваджень можна віднести: очищення деталей за допомогою хімічних засобів; фарбування устаткування; зварювальні роботи; процеси нанесення захисних антикорозійних покриттів; обробку або переробку

металів. При здійсненні всіх цих процесів виділення шкідливих речовин неминуче, але, як правило, посилене їх утворення пов'язане з недотриманням технологій або невмілим їх використанням.

На багатьох виробництвах просто неможливо уникнути впливу деяких факторів. Серед них особливе місце займають: температура, висока вологість і випромінювання; електромагнітні поля; лазерне і ультразвукове випромінювання; вібрація; сильний шум; освітлення, яке може бути як занадто інтенсивним, так і недостатнім, що однаково шкідливо для зору; вплив пилу і аерозолів; працюючі частини обладнання. Кожен фактор окремо начебто і не становить особливої небезпеки для здоров'я людини при короткочасному впливі. Але часто працівник перебуває тривалий час у їх оточенні, та ще відразу декількох, тому їх вплив стає цілком відчутним.

На підприємствах, де в цехах стоять верстати та інше обладнання, без шуму, як правило, не обходиться. Постійно працює техніка видає гучні звуки, які можуть змінювати свою інтенсивність. Якщо людина змушений регулярно зазнавати такого впливу, то це негативно позначиться на його здоров'ї. Від сильного шуму починає боліти голова, підвищується тиск, знижується гострота слуху. Зрештою, від таких умов знижується працездатність, з'являється втома, знижується увага, а це вже може призвести до нещасного випадку. Керівники на подібних підприємствах повинні подбати про своїх працівників, щоб постаратися хоч трохи зменшити негативний вплив шуму на організм.

В результаті постійного впливу даного фактору починає страждати не тільки нервова система, а й опорно-рухова, і система аналізаторів. Робітники, які змушені працювати в таких умовах, часто скаржаться на головні болі, запаморочення, заколисування.

Якщо додати ще і вплив супутніх чинників, таких як вологість, висока температура, шум, то це тільки посилює шкідливий вплив вібрації. Якщо на шкідливих підприємствах досить ефективно налагоджено використання засобів захисту, то робітники будуть піддаватися впливу небезпечних речовин в набагато меншому ступені.

До психофізіологічних факторів можна віднести тягар умов праці і його напруженість. Під напруженістю роботи мається на увазі навантаження на нервову систему та органи відчуття. Сюди можна віднести тривалу розумову роботу, монотонність виконуваних процесів, емоційні перевантаження. Все це шкідливі виробничі фактори, які, якщо розібратися, практично кожен з нас на своєму робочому місці відчуває в тій чи іншій мірі.

На будь-якому підприємстві необхідно з метою створення сприятливих умов для працівників намагатися забезпечувати комфортну обстановку. Це стосується, насамперед, чистоти повітря у виробничих приміщеннях. Санітарно-гігієнічні служби розділяють основні шкідливі виробничі фактори на хімічні речовини та промисловий пил.

Негативний вплив пилу проявляється в тому, що він здатний провокувати розвиток легневих захворювань. На будь-якому підприємстві на працівників чиниться вплив шкідливих виробничих факторів відразу з кількох груп, тобто комплексний.

Незважаючи на всі заходи, спрямовані на нейтралізацію шкідливого впливу факторів, неможливо досягти ідеальних умов праці. Це не дозволяють зробити особливості технологічних процесів, продукція та сировина для її виготовлення. Тому для керівників захист від шкідливих виробничих факторів - це першочергове завдання.

Часто буває так, що всі вжиті заходи не можуть забезпечити повністю безпечні умови праці, в цих випадках без застосування ЗІЗ просто не обійтися. Можна зробити висновок про те, що засоби індивідуального захисту, з одного боку, зменшують вплив шкідливих факторів, а з іншого - можуть створювати іншу небезпеку для здоров'я працівника. Заходи безпеки спрямовані, насамперед, на те, щоб шкідливі виробничі фактори не надавали свого небезпечного впливу на людину. З цією метою на будь-якому підприємстві в обов'язковому порядку повинен проводитись інструктаж з безпеки. Дата проведення, зміст фіксуються у спеціальному журналі за підписом усіх інструктованих і того, хто провів цей інструктаж.

4.2 Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів

Дія електромагнітного імпульсу блискавки на металеві елементи будівельних конструкцій, електричні й електронні системи є вторинною дією блискавки. Вторинні дії блискавки пов'язані з дією на об'єкт електромагнітного поля близьких розрядів. Це поле має дві складових: електростатичну та електромагнітну індукції [23].

Електростатична індукція зумовлена переміщенням зарядів у каналі блискавки. Електростатичний індукційний вплив проявляється у виді імпульсних перенапруг, що виникають на металевих конструкціях об'єкта. Величина імпульсної перенапруги залежить від величини сили струму блискавки, відстані до місця удару, опору заземлення. За відсутності належного заземлення імпульсна перенапруга може сягати сотень кіловольт і створювати небезпеку ураження людей електричним струмом та виникнення іскор між окремими частинами об'єкта.

Електромагнітна індукція зумовлена зміною струму блискавки в часі. Електромагнітна індукція приводить до утворення у металевих контурах об'єкта ЕРС, пропорційної швидкості зміни струму блискавки і площі, охопленої контуром. Протяжні комунікації в сучасних виробничих будівлях можуть утворювати контури, що охоплюють велику площу, в яких є небезпека наведення ЕРС у кілька десятків кіловольт. У місцях зближення протяжних металевих конструкцій, у розривах незамкнених контурів створюється небезпека перекриттів та іскрінь із можливим розсіюванням енергії близько десятих часток джоуля.

Відповідно до ГОСТ 12.1.004 пожежна небезпека вторинних дій блискавки полягає в іскрових розрядах, що виникають у результаті індукційного й електромагнітного впливу атмосферної електрики на

виробниче устаткування, трубопроводи й будівельні конструкції. Енергія іскрового розряду перевищує 250 мДж є достатньою для запалення горючих речовин з мінімальною енергією запалювання до 0.25 Дж.

Також небезпечним є занесення високого потенціалу в будинок по металевих комунікаціях не тільки при прямому влученні блискавки, але і при розташуванні комунікацій у безпосередній близькості від громовідводу. При недотриманні безпечних відстаней між громовідводами й комунікаціями енергія можливих іскрових розрядів сягає значень 100 Дж і більше, тобто є достатньою для загоряння всіх горючих речовин.

Захист від електростатичної індукції здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металоконструкціями в місцях їхнього зближення менше, ніж на 10 см. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металоконструкцій перед їх введенням у будівлю [23].

Для влаштування штучних заземлюючих пристроїв використовуються сталеві вертикально закладені у землю труби діаметром від 3 до 5 см і товщиною стінок не менше як 3,5 мм, довжиною 2,5...3 м; металеві стержні діаметром 10-12 мм, довжиною до 10 м; кутову сталь 40Ч40Ч4, довжиною 2.5-5 м. Застосовувати для штучних заземлюючих пристроїв алюмінієві оболонки силових кабелів і неізольовані алюмінієві провідники заборонено.

Таким чином, при дотриманні вимог викладених у ПУЕ-7, щодо влаштування захисту від ЕМІ блискавок, буде збережене світлотехнічне

обладнання та його складові, а також життя працівників, які обслуговують цю апаратуру.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Основною причиною масового використання в освітлювальній індустрії світлодіодних матриць є, насамперед, економічні міркування, адже світлодіоди споживають більш ніж в шість разів менше електроенергії ніж традиційні джерела світла.

2. Незважаючи на те, що напівпровідникові джерела світла вважаються холодними джерелами, близько 75% загальної спожитої електроенергії перетворюється в тепло. Виділене тепло підвищує їх температуру і цим знижує ККД та світловіддачу приладів.

3. В рамках побудованої математичної моделі світлодіодної матриці виявлені параметри, які найбільше впливають на її тепловий режим. Показано, що температура матриці буде зменшуватися при зменшенні загального теплового опору системи охолодження.

4. Тепловий опір системи охолодження можна зменшити (навіть до нуля) застосувавши термоелектричний спосіб охолодження.

5. Охолодження напівпровідникових джерел світла термоелементами є змiст застосовувати тільки тоді, коли їх сумарна споживана електрична потужність не більша ніж 500 Вт. В іншому випадку значно збільшуються маса та габарити системи охолодження.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Вайсфельд Н. Д. Рівняння математичної фізики : навч.-метод. посібн. для студ. спец. «Прикладна математика» / Н. Д. Вайсфельд, В. В. Реут. – Одеса : Одеськ. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2018. – 194 с
2. Карась В. І. Світлодіоди: фізика, технологія, застосування: навч. посібник/ В. І. Карась, Л. А. Назаренко, І. В. Карась; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва – Х.: ХНАМГ, 2012, - 323 с.
3. Zakordonets V. Theoretical analysis of thermal conditions and ways of led temperature stabilization / Volodymyr Zakordonets, Natalija Kutuzova // Вісник ТНТУ. — Т. : ТНТУ, 2016. — № 4 (84). — С. 105–112.
4. Закордонець В. Стабілізація теплового режиму світлодіодних систем термоелектричними модулями охолодження / В. С. Закордонець, Т. М. Рекуник // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : Том 3. — С. 139. — (Електротехніка та енергозбереження).
5. Закордонець В. Стабілізація теплового режиму світлодіодів термоелектричними модулями охолодження / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова, О. Б. Підфігурний // Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 28-29 листопада 2018 року. — Т. : Том 3. — С. 27. — (Електротехніка та енергозбереження).
6. Zakordonets V. Stabilization of LEDs thermal conditions by thermoelectric modules of cooling / Volodymyr Zakordonets, Natalija Kutuzova // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2018. — Vol 90. — No 2. — P. 133–140.
7. Закордонець В.С. Розрахунок системи охолодження світлодіода на базі теплової труби / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова // Термоелектрика. №4, 2018. — С. 60–67.

8. Закордонець В.С. Розрахунок термоелектричної системи охолодження світлодіодів / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова // Термоелектрика. №5, 2018. — С. 45–54.
9. Закордонець В.С. Стабілізація теплового режиму світлодіодів термоелектричними модулями охолодження / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова // Збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій“, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ТНТУ, 2019. — Том 1 : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 287-289. — (Секція: Світлотехніка і електроенергетика).
10. Закордонець В.С., Фера В.І. Розрахунок системи охолодження світлодіода на базі теплової труби. // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 27-28 листопада 2019., м.Тернопіль. – С.34.
11. Закордонець В. С., Кутузова Н. В., Гридовий В. М.. «Вплив термоелектричного охолодження на ефективність світлодіодних матриць»// Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 27-28 листопада 2019., м.Тернопіль. – С.35.
12. Закордонець В.С. Термоерс в напівпровідникових надгратках при розсіюванні носіїв струму на фонах і точкових дефектах / В. С. Закордонець // Термоелектрика. №1, 2021. — С. 23–31.
13. Закордонець В.С., Сисак І.М. Термоелектрична добротність напівпровідникових надграток / В. С. Закордонець, І.М. Сисак // Термоелектрика. №2, 2022. — С. 23–31.
14. Schubert E. F. Light-emitting diodes. – Cambridge, 2006.
15. Huaiyu Y. A review of passive thermal management of LED module / Y. Huaiyu, S. Koh, H. Zeijl, A.W.J. Gielen, Z. Guoqi // J. of Semiconductors. 2011. Vol. 32, N 1.P. 0140081–0140084.

16. Lee H. Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells. – New Jersey: Wiley, 2010.
17. Reay D., Kew P., McGlen R. Heat pipes: theory, design and applications. – Oxford: Elsevier, 2014.
18. Faghri A. Heat pipes: review, opportunities and challenges // *Frontiers in Heat Pipes*. 2014. Vol. 5, Is. 1. P. 1
19. Закордонець В.С., Фера В.І. Розрахунок системи охолодження світлодіода на базі теплової труби. // *Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, 16-17 листопада 2017., м. Тернопіль. – С.138.
20. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. ДНАОП 0.00–1.21–98.
21. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці : підручник / М. П. Гандзюк, Є.П. Желібо, М.О. Халімовський; за ред.. М.П. Гандзюка; МОН України. – 4-е вид. – К. : Каравела, 2008. - 384 с.