

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(освітній (освітньо-кваліфікаційний) рівень)

на тему: **Розробка стабілізатора теплового режиму світлодіодних матриць
термоелектричними охолоджувачами Пельтьє.**

Виконав: студент VI курсу, групи ЕТ_м-61

напряму підготовки (спеціальності) 141

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Кобаль М. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Закордонець В.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Габрусква І.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет *прикладних інформаційних технологій та електроінженерії*
(повна назва факультету)

Кафедра *електричної інженерії*
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри *Коваль В.П.*

«_____»

_____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня *магістр*
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*
(шифр і назва)

студенту *Кобаль Максим Володимирович*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розробка стабілізатора теплового режиму світлодіодних матриць термоелектричними охолоджувачами Пельтьє.*

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

Затверджені наказом по університету від *11 жовтня 2024 року № 4/7-988*

2. Термін подання студентом роботи *20 грудня 2024 р.*

3. Вихідні дані до роботи *Технічні параметри напівпровідникових джерел світла та технічні характеристики термоелектричних модулів охолодження Пельтьє.*

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

1. Аналітичний розділ.

2. Проектно-конструкторський розділ.

3. Розрахунково-дослідницький розділ.

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

1. Зовнішній вигляд світлодіодів та світлодіодних матриць.

2. Вплив температури на параметри світлодіодів.

3. Пристрої для забезпечення теплового режиму світлодіодних матриць.

4. Розрахунок теплового режиму світлодіодної матриці з термоелектричним модулем.

5. Охолодження світлодіодної матриці термоелектричним модулем .

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доц. Гурик О.Я.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Клепчик В.М.		
Нормоконтроль	к.т.н., доц. Коваль В.П.		

7. Дата видачі завдання

02 вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Літературний огляд за напрямком дипломної роботи	16.09.24–18.10.24	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки дипломної роботи	21.10.24–01.11.24	
3	Підготовка розділу «Охорона праці та безпека в надзв. ситуаціях»	04.11.24–15.11.24	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	18.11.24–29.11.24	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	02.12.24–13.12.24	
6	Отримання відгуку та рецензії на дипломну роботу, підготовка доповіді на захист	16.12.24–20.12.24	

Студент

(підпис)

Кобаль М.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Закордонець В.С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра Кобаля Максима Володимировича містить: 70 сторінок, 32 рисунки, 4 таблиці, 27 посилань на першоджерела.

В роботі створено математичну модель світлодіода, як складової частини світлодіодної матриці. Виявлено параметри, які найбільше впливають на світловіддачу та якість світла світлодіодів та світлодіодних матриць. Вперше розраховано тепловий режим світлодіодної матриці оснащеної термоелектричним модулем охолодження. Обчислена робоча температура гетеропереходу світлодіода з термоелектричним модулем охолодження та без нього. Проведено порівняльний аналіз роботи приладу в цих умовах. Дано рекомендації для щодо збільшення світловіддачі напівпровідникових джерел світла. Показано,

Ключові слова: світлодіоди, світлодіодні матриці, квантова ефективність, світловіддача, світловий потік, тепловий режим, активна зона, тепловий опір.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1. Принцип роботи та технологія виготовлення	9
1.2. Причини використання світлодіодних джерел світла	21
1.3 Методи та способи стабілізації теплового режиму	22
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	27
2.1 Матеріали для світлодіодів	27
2.2 Електричні характеристики світлодіодів	31
2.3 Матеріали для термоелектричних охолоджувачів	37
2.4 Електротехнічні характеристики термоелектричних охолоджувачів	40
3. РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	43
3.1 Основні співвідношення в термоелектричному модулі	43
3.2 Напівпровідниковий термоелектричний модуль	49
3.3 Побудова математичної моделі	50
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА	
БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	61
4.1 Аналіз шкідливих виробничих факторів, електробезпеки, пожежної небезпеки	61
4.2 Захист персоналу та навколишнього середовища від небезпечних виробничих факторів	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	67

ВСТУП

В останні десятиліття в усьому світі взагалі і в Україні зокрема різко постала проблема енергоощадності. Так, за даними ДТЕК, якщо в Україні на холодильники та морозильники витрачається 11% електроенергії, на приготування їжі - 9%, на кухонні потреби –8%, то на різні види освітлення понад 13%. Елементарні розрахунки показують, що якщо лампа розжарювання потужністю 60 Вт у коридорі працює 4 години на добу, в туалеті і ванній кімнаті по 2 години, в кімнатах і на кухні 10 годин то тільки на освітлення за місяць набереться 36 кВт год електроенергії. Якщо лампи розжарювання замінити світлодіодними лампами, то місячне споживання можна довести до 6 кВт год, тобто зменшити в шість разів. В межах міста чи держави це дасть відчутну економію електроенергії. Це, поряд з іншими заходами енергозбереження, дасть потужний імпульс до збільшення ВВП. У зв'язку з цим повальне впровадження енергоощадних технологій в енергетичну галузь народного господарства є надзвичайно важливим.

Світлодіодні джерела світла не тільки споживають відносно мало енергії, але і дозволяють отримати наперед прогнозований колір світлового забарвлення. Зокрема, в залежності від хімічного складу напівпровідників світлодіод може випромінювати світло різної частоти та різної довжини хвилі. Як правило, світловипромінюючі кристали світлодіодів виготовляють із з'єднань нітриду галію, арсеніду галію, фосфіду галію, з'єднань індію з алюмінієм, та інших. Різноманітні легуючі домішки легко змінюють ширину зони p - n - переходу. При цьому суттєво змінюється як довжина хвилі випромінювання, так і потужність випромінювання [4].

Незважаючи на високу світловіддачу, біля 70% енергії все таки перетворюється в тепло, яке сильно розігріває активну зону світлодіодів. Очевидно, що чим більша електрична потужність світлодіода більше виділиться тепла і тим більший нагрів приладу.

Для збільшення світлового потоку світлодіоди об'єднують в групи і виготовляють освітлювачі у вигляді так званих світлодіодних матриць. З'єднання світлодіодів в світлодіодних матрицях великої потужності монтуються на контактних площадках виготовлених з міді, алюмінію, або іншого теплопровідного матеріалу. Така конструкція сприяє швидкій каналізації виділеного тепла і забезпечує оптимальний тепловий режим роботи приладу. Тілесний кут світлового випромінювання може регулюватися оптичною системою лінз та рефлекторів [4].

Як випливає з практичного досвіду їх експлуатації та технічної документації термін служби приладів сягає ста і більше тисяч годин безвідмовної роботи. Однак, незважаючи на велику різноманітність світлодіодних освітлювачів, вони часто не мають заявлених виробником характеристик. Як наслідок, світлодіодні джерела світла не забезпечують нормативних показників якості освітлення.

Погіршення технічних параметрів, зазвичай, пов'язане з порушенням теплового режиму роботи напівпровідникових джерел світла. Це, в першу чергу, приводить до надмірного розігріву освітлювального приладу [6].

Порушення теплового режиму призводить до:

- зменшення терміну служби;
- зменшення яскравості свічення;
- зменшення світлового потоку;
- зміни кольору випромінювання;
- помутніння оптики;
- руйнування корпусу.

Тому, дуже важливим заходом є стабілізація теплового режиму напівпровідникових джерел світла. Цей факт змушує до пошуку ефективних способів їх терморегулювання та охолодження.

В сучасних радіоелектронних приладах для відведення надлишкового тепла застосовують різноманітні системи регулювання температури [5]. Немає сумніву, що вони успішно можуть бути використані і для стабілізації теплового

режиму напівпровідникової освітлювальної апаратури. Пасивні системи термостабілізації:

- корпуси самих приладів,
- масивні металеві корпуси внутрішнього інтер'єру,
- зовнішні радіатори.

Ці способи хоч і простоті за вирішенням проблеми, та часто не придатні для проктивного застосування в потужних освітлювальних приладах. Наприклад, радіатори часто мають незадовільні масо-габаритні показники, через що неможлива їх інсталяція в освітлювальну систему.

Активні системи термостабілізації досить різноманітні. До них належать:

- повітряні вентилятори;
- теплові трубки;
- водяні помпи,
- термоелектричні модулі охолодження.

Звичайно, що активні системи термостабілізації є ефективнішими, однак для своєї роботи потребують додаткових технічних засобів та відповідного обслуговування [5-15]. Крім того, значно зростає ціна системи термостабілізації та відповідно зменшується її надійність. З огляду на це, пошук оптимальних систем терморегулювання та охолодження є неперервним процесом.

В представленій до захисту роботі, для охолодження та стабілізації температури світлодіодних матриць запропоновано застосувати термоелектричні модулі охолодження (МО) [1, 5-15]. Використання термоелектричних модулів передбачає проведення комплексу досліджень з метою визначення оптимальних параметрів системи охолодження включаючи вибір типу модулів, їх кількість та схему комутації. Завдяки зменшенню температури активної зони кристалів до рівня нижчого від температури навколишнього середовища, вдається досягти значного зростання світлового потоку та збільшити термін служби пристрою. Метою дослідження є підвищення енергоефективності напівпровідникових приладів шляхом виявлення та усунення причин зниження їхнього коефіцієнта корисної дії.

Мета і завдання роботи. Мета роботи полягає в створенні математичної моделі світлодіода та виявленні технічних параметрів, які найбільше впливають на температуру активної зони світлодіода. Завдання полягає в дослідженні впливу потужності приладу, температури зовнішнього середовища, теплового опору систем охолодження на його тепловий режим .

Предмет та об'єкт дослідження. Предметом дослідження світлодіоди та світлодіодні матриці. Об'єктом дослідження є система охолодження світлодіодів та світлодіодних матриць на основі термоелектричних охолоджувачів Пельтьє.

Наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

Представлена нова конструкція світлодіодного освітлювача, в якому тепловий режим матриць забезпечується термоелектричними модулями охолодження Пельтьє. Вперше розраховано тепловий режим світлодіодної матриці, яка охолоджується оснащеної термоелектричним модулем охолодження. Представлена інноваційна схема охолодження дозволить збільшити світловий потік при одночасному зменшенні кількості світлодіодних матриць в світильнику.

Апробація результатів роботи. Результати роботи вперше доповідалися на XIII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-28 грудня 2024., м.Тернопіль. – С.34.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Принцип роботи та технологія виготовлення

В даний час напівпровідникові джерела (НПДС) світла широко використовуються з освітлювальною метою. Через свої витатні чкості вони стали найбільш затребуваними та являють собою найсучасніший, найпрогресивніший і найпопулярніший вид освітлення для найрізноманітніших використань. Завдяки безпосередньому перетворенню електроенергії в світлове випромінювання (в лампах розжарювання випромінювання світла відбувається розігрітою електронами кристалічною ґраткою) їхня ефективність переважає більшість традиційних джерел світла. Зокрема, вона складає майже 30%. Проте, біля 70% енергії все таки перетворюється в тепло, яке сильно розігріває активну зону світлодіодів. Очевидно, що чим більша потужність світлодіода, і чим більша їх кількість у світлодіодній матриці, тим більше виділиться тепла.

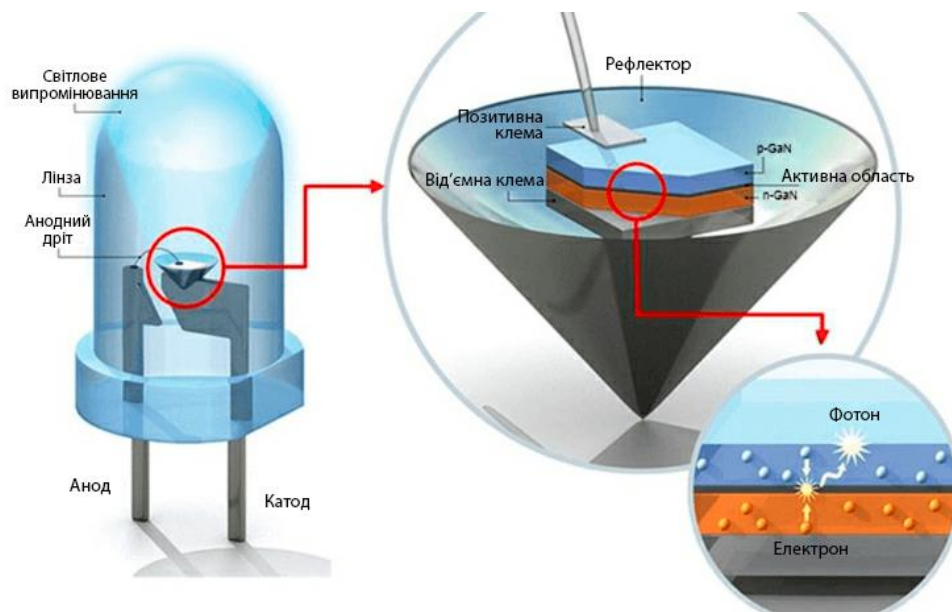


Рис. 1.1. Конструкція типового світлодіода.

Як видно з рисунка 1.1 світлодіодний елемент має два шари напівпровідників n - і p - типу провідності. Напівпровідник n - типу, для визначеності n -GaN знаходиться на підкладці, яка електрично сполучена з від'ємною клемою, а напівпровідник p - типу наприклад p -GaN приєднаний до позитивної клеми. Корпуси СД виготовляють з прозорої пластмаси. Як

правило, вони мають додаткові конструктивні елементи, які покращують роботу приладу: рефлектори, лінзи, теплопроводи та ін..

Надлишкове тепло потрібно відвести від активної зони джерела світла, оскільки бідь який напівпровідник має критичну температуру експлуатації. При наближенні до цієї температури випромінювальна здатність р-п-переходу світлодіода значно зменшується. Також погіршуються і його основні параметри, а саме: довжина хвилі випромінювання, колірна температура, світловий потік, світловіддача, та ін..

Основною перевагою напівпровідникових джерел світла перед іншими є їх здатність перетворювати підведену електроенергію безпосередньо в світло. Це відбувається при підключенні анода світлодіода до позитивного полюса джерела живлення, а катода до негативного полюса. Для того, щоб утримувати температуру активної зони в допустимих межах режимом роботи світлодіода треба керувати. Тільки адекватне керування тепловим режимом зможе забезпечити безвідмовну роботу приладу протягом тривалого часу.

Для більшості малопотужних елементів радіоелектронної апаратури, до яких безсумнівно належать індикаторні світлодіоди та освітлювальні світлодіоди малої потужності передача тепла в навколишнє середовище здійснюється шляхом безпосереднього теплообміну з оточуючим повітрям. Здебільшого, шлях каналізації надлишкового тепла завжди однаковий. Починаючи від активної зони (джерела тепла) через контактну площадку, тепловідвід, корпус, оточуюче середовище.

В залежності від хімічного складу використаних напівпровідників світлодіод може випромінювати світло різної частоти та різної довжини хвилі. Як відомо, частота випромінювання пов'язана з швидкістю світла та довжиною хвилі залежністю

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (1.1)$$

де

c - швидкість світла,

λ - довжина хвилі випромінювання.

Як видно із записаного співвідношення, при збільшенні частоти випромінювання, довжина хвилі збільшується, і навпаки, при зменшенні частоти довжина хвилі збільшується.

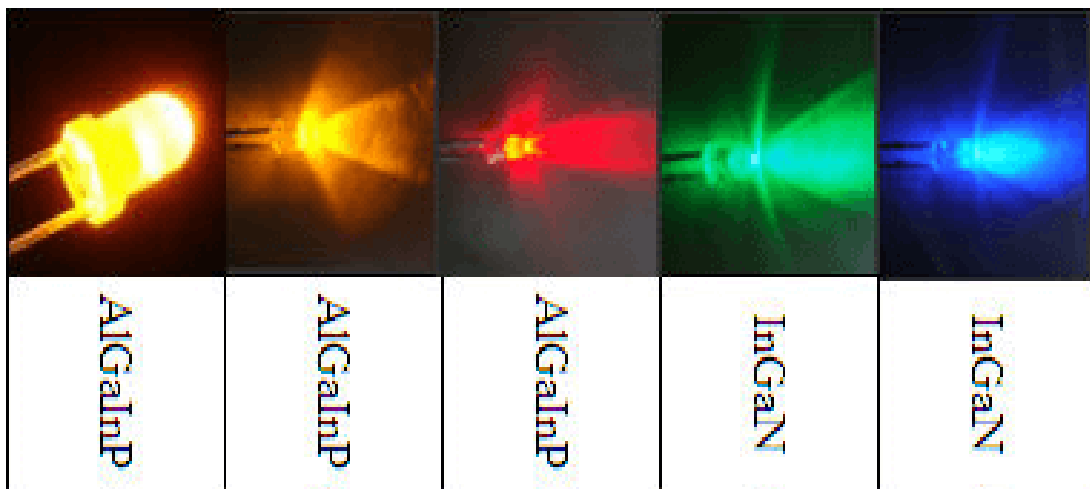


Рис. 1.2. Колір свічення світлодіодів з різним хімічним складом напівпровідникових матеріалів.

При приєднанні світлодіода до полюсів джерела живлення, в його активній зоні відбувається рекомбінація носіїв заряду (електронів і дірок). При цьому виділяється деяка кількість теплової і світлової енергії. Однак, може трапитися так, що частотний спектр випромінювання знаходиться поза межами видимого світла.

Світловипромінюючі кристали світлодіодів виготовляють із з'єднань нітриду галію, арсеніду галію, фосфіду галію, з'єднань індію з алюмінієм, та інших. Різноманітні легуючі домішки змінюють ширину зони *p-n*- переходу. При цьому суттєво змінюється як довжина хвилі випромінювання, так і потужність випромінювання.

З'єднання світлодіодів в світлодіодних матрицях великої потужності монтуються на контактних площадках виготовлених з міді, алюмінію, або іншого теплопровідного матеріалу. Така конструкція сприяє швидкій каналізації виділеного тепла і забезпечує оптимальний тепловий режим роботи приладу. Тілесний кут світлового випромінювання може регулюватися оптичною системою лінз та рефлекторів. Робота світлодіода базується на явищі рекомбінації електронів і дірок в його активній зоні. Для випромінювання

світла необхідно, щоб енергія зовнішнього джерела (електричного джерела живлення) перетворилася не в теплову енергію, а в світлове випромінювання. Таке випромінювання в світлодіоді виникає внаслідок енергетичної взаємодії носіїв струму за допомогою зовнішнього джерела. Щоб створити передумови взаємодії, в напівпровіднику формують дві області з носіями зарядів різних полярностей.

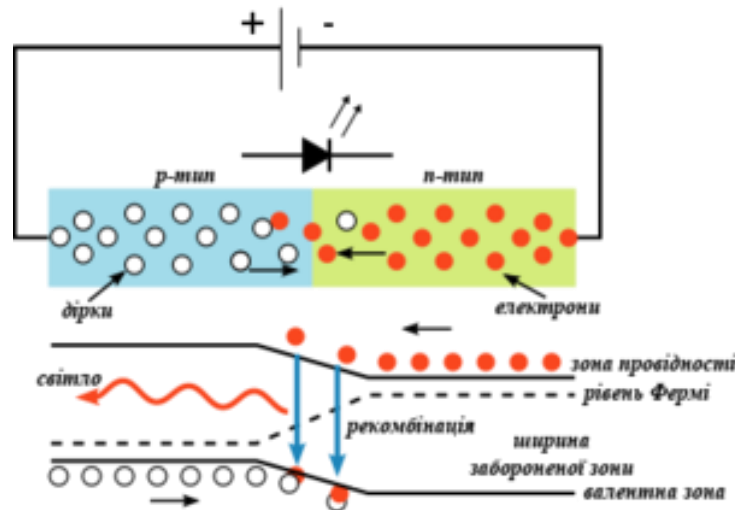


Рис. 1.3. Спрощена схема роботи світлодіода.

Зокрема, якщо електричний струм проходить в напрямку від напівпровідника р- типу в напрямку напівпровідника п- типу, то в області р-п- переходу (в активній зоні) відбувається рекомбінація рухомих носіїв заряду. При зіткненні електрон і дірка відбувається народження кванта енергії, яка випромінюється у вигляді фотона. Його енергія пропорційна ширині забороненої зони напівпровідника. В основному, ці кванти майже не поглинаються активною зоною і покидають межі напівпровідникового кристала. Проте, якщо електрон або дірка в процесі руху зустрине дефект кристалічної ґратки, то народження кванта світла не відбудеться, а вся отримана від електричного поля кінетична енергія передається кристалічній ґратці і піде на її розігрів. При цьому активна зона, і область напівпровідника яка примикає до неї нагріваються [4-7].

Світлодіоди поділяються на два основних типи: індикаторні та освітлювальні.

Індикаторні світлодіоди мають малі розміри, малу споживану потужність, малий кут випромінювання, високу яскравість, широку гаму світлового випромінювання.



Рис.1.4. Зовнішній вигляд індикаторних світлодіодів.

Освітлювальні світлодіоди – (ОСД) мають високу густину світлового потоку і мають відносно велику електричну потужність (порівняно з індикаторними світлодіодами). Здебільшого освітлювальні світлодіоди світяться білим кольором, однак є прилади з голубим та синім відтінками. теплою і холодною температурою свічення. Це дає змогу застосовувати ОСД як для виготовлення освітлювальних ламп, і кімнатних люстр, так і автомобільних фар та освітлювальних прожекторів.



Рис. 1.5 Освітлювальний світлодіод білого кольору свічення електричною потужністю 1 Вт з потоком світла 100 Лм.

В деяких світлодіодах, наприклад SMD, для покращення кольоропередачі і збільшення світловіддачі оптична система приладів покривається тонким шаром люмінофору.



Рис. 1.6. Зовнішній вигляд освітлювальних світлодіодів типу SMD.

Для покращення теплового режиму роботи світлодіода в його корпус вмонтована мідна або алюмінієва пластинка, яка забезпечує механічну міцність приладу і одночасно служить тепловідводом.

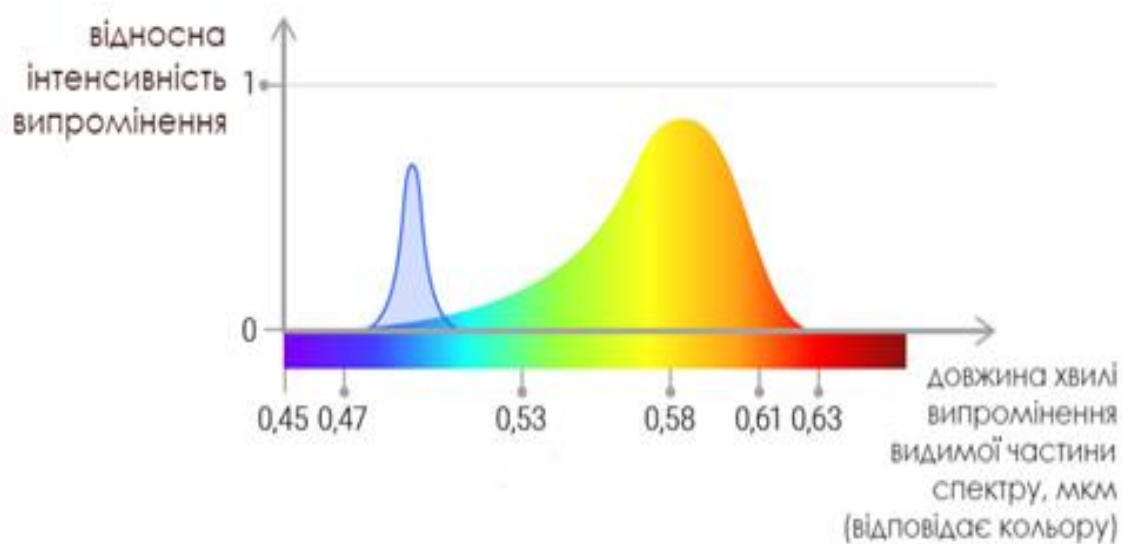


Рис. 1.7. Типовий спектр випромінювання світлодіода білого кольору з люмінофорним покриттям.

Освітлювальні світлодіоди типу COB складаються з декількох десятків світлодіодів синього кольору свічення, які інтегровані в одному корпусі. Вони покриті спільним люмінофорним шаром.

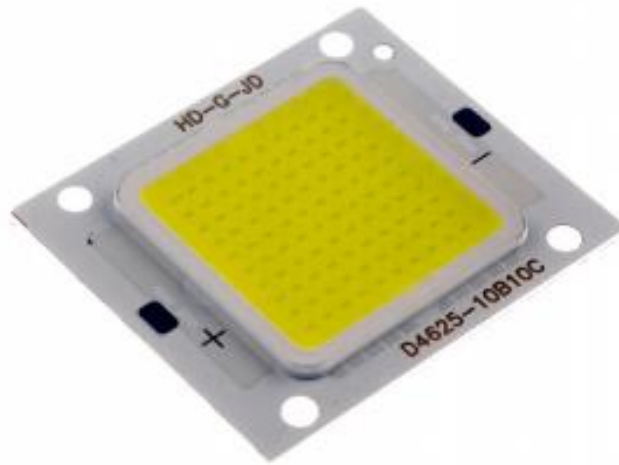


Рис. 1.8. Освітлювальні світлодіоди типу COB



Рис. 1.9. Світлодіодна лампа типу Filament.

Світлодіодна лампа типу Filament для освітлення не застосовуються, оскільки вони мають невеликий світловий потік та низьку світловіддачу. В основному їх використовують з рекламною метою, для оформлення вітрин і для підсвіток декорацій [2,6].

Лазерний світлодіод має певні особливості будови та принципу роботи. Зокрема, його конструкція дозволяє протягом деякого часу утримувати всередині фотони світла. Йде так звана накачка лазера. Тобто, світлові фотони протягом деякого часу накопичуються всередині світловипромінюючого кристала і при досягненні певного рівня концентрації вивільняються у вигляді лазерного імпульсу.



Рис. 1.10. Лазерний світлодіод дискретного випромінювання.

Завдяки лазерним світлодіодам працюють лазерні зчитувальні пристрої, оптоволоконний зв'язок, лазерна оптика і деяке медичне устаткування.

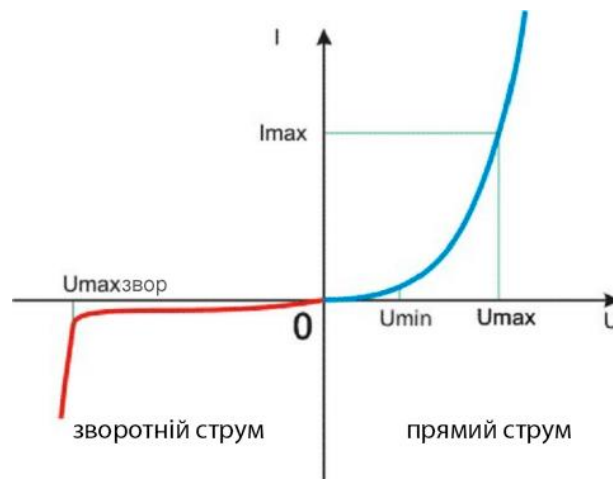


Рис. 1.11. Вольт-амперна характеристика типового світлодіода.

На графіку (1.10) зображена вольт-амперна характеристика типового світлодіода. Величина споживаного струму визначається типом світлодіода і змінюється від моделі до моделі. Проте, всі світлодіоди мають особливість – величина струму при збільшенні напруги зростає експоненційно. При зміні напрямку струму на протилежний світлодіод не буде світитися. При досягненні зворотною напругою певної критичної величини $U_{кр\ звор}$ відбудеться пробій напівпровідника, і світлодіод вийде з ладу. Напруга $U_{кр\ звор}$ називається напругою електричного пробою. Робочим діапазоном напруги світлодіода називають інтервал від U_{min} до $-U_{max}$.

Зовсім недавно на світлотехнічному ринку появилися суперсучасні джерела світла – світлодіодні матриці. Серед них, дуже ефективними вважаються світлодіодні матриці великої потужності серії GREE CMA.



Рис. 1.12. Світлодіодна матриця великої потужності білого свічення серії GREE CMA.

Світлодіодна матриця (СДМ) є об'єднанням в одному корпусі декількох сотень світлодіодів. Світлодіодні кристали покриті зверху люмінофором. Для зменшення ймовірності виходу з ладу приладу, і підвищення надійності його експлуатації світлодіоди з'єднані послідовно-паралельно. Поверхня світлодіодної матриці є ідеально плоскою і оптично прозорою. Це робить можливим встановлення корегуючої оптики, яка забезпечує створення необхідної діаграми просторового розподілу світла.

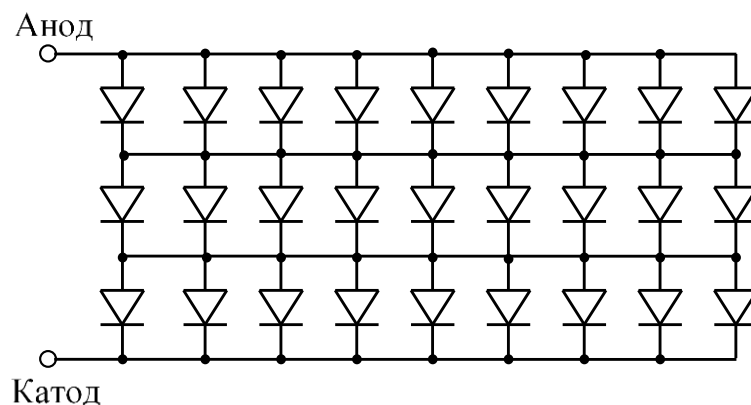


Рис. 1.13. Один з можливих варіантів з'єднання світлодіодів в світлодіодній матриці.

Світлодіодні матриці розміщують на товстій мідній або алюмінієвій пластинці в якій зроблені технологічні отвори для закріплення на тепловідвід або радіатор. Добрий тепловий контакт світлодіодної матриці з охолоджувачем забезпечують добре відшліфованими поверхнями. Це сприяє простоті компоновки напівпровідникових джерел світла і зменшує їх вартість.



Рис. 1.14. Світлодіодні матриці різного конструктивного виконання.

Світлотехнічні параметри деяких зразків 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
Світловий 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 °				

Зведена таблиця світлотехнічних характеристик сучасних освітлювальних приладів

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 очевидних позитивних якостей, світлодіодні джерела світла мають і певні вади. Наприклад, при проходженні струму через р-п-перехід температура активної зони збільшується. Збільшення температури активної зони кристалів згубно впливає на технічні параметри світлодіодів і світлодіодних матриць [5-8]. Вплив збільшення температури на світлотехнічні параметри розглядався в ряді робіт як вітчизняних так і зарубіжних авторів. Так, наприклад, в роботі [5] була побудована математична модель світлодіода, яка описувала вплив прямого струму на температуру активної зони. Була порахована температура активної

зони, контактної площадки та корпусу світлодіода як функція прямого струму та температури довкілля. Дослідження впливу температури активної зони СД на його потік світла експериментально вивчався і в працях [6-8].

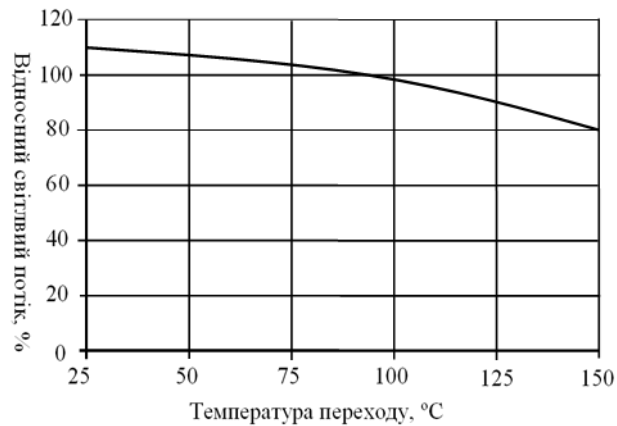


Рис. 1.15. Залежність світлового потоку від температури для світлодіодних матриць СМА.

В результаті аналізу були зроблені висновки щодо ефективності стабілізації температури активної зони при різних способах охолодження та типах радіаторів. Дані рекомендації щодо удосконалення теплового режиму роботи світлодіодів та світлодіодних матриць [8,9,17].

Як видно з представленої графіка, в температурному діапазоні 25°C - 90°C відносний світловий потік знаходиться в процентному діапазоні 110% - 100%. Однак, При збільшенні температури відносний світловий потік приладу дуже швидко зменшується, сягаючи 0,8 від номіналу. Дуже перспективним видається діапазон температур який лежить нижче 25°C. Прогнозуючи величину потоку світла для температур до 25°C логічно допустити, що при подальшому зниженні температури, потік світла буде збільшуватися. Зокрема, при зниженні температури до 0°C світловий потік збільшить в 1,5 рази від номінального значення. Це трапиться, якщо в 1,5 рази збільшити величину струму живлення (напругу вважаємо незмінною). Однак, збільшення потужності споживання прив до збільшення тепловиділення, яке буде розігрівати активну зону. Робота кристалів при підвищених температурах спричинить зменшення світлового потоку світла, яскравості свічення, терміну служби та ін.. Вважають, що при досягненні світловим потоком 0,6 від

номінального значення термін служби приладу закінчується. Таким чином, пріоритетним завданням стає проблема стабілізації температури активної зони [17-21].

1.2. Причини використання світлодіодних джерел світла.

Безсумнівно, що широке впровадження світлодіодних джерел світла в освітлювальну індустрію різко зменшить витрати на освітлення в десятки разів. Це добре видно з таблиці порівняння параметрів світлодіодів та традиційних джерел світла. Очевидно, що для освітлення того самого приміщення, споживана електрична потужність світлодіодних освітлювачів може бути майже в шість разів меншою. Тому, питання масового впровадження напівпровідникових освітлювальних технологій є першорядною.

Порівняльна таблиця відповідності потужності та світлового потоку освітлювальних ламп різної потужності

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

Порівняємо споживання енергії світлодіодної лампи та лампи розжарювання протягом одного року. Нехай в кімнатному світильнику вкручені три лампи розжарювання по 60 Ват кожна. Таким чином, світильник споживає сумарно 180 ват електроенергії. Нехай вона працює в середньому 6 годин на добу. За рік це складе приблизно 360 Кват·год електроенергії. Світлодіодна лампа з аналогічним світловим потоком використає 60 Кват·год електроенергії.

Якщо врахувати, що фіксована ціна на електричну енергію для побутових споживачів з 1 червня 2024 року до 30 квітня 2025 року включно становитиме

4,32 грн за 1 кВт·год (з урахуванням ПДВ) то в грошовому еквіваленті це принесе економію коштів

$$(360 - 60) \cdot 4,32 = 1296 \text{ грн.}$$

Таким чином, світлодіодна освітлювальна лампа принесе майже 1300 гривень економії. Неважко оцінити економію в масштабах одного міста, району, області чи держави в цілому. Тому, питання використовувати чи не використовувати напівпровідникові джерела світла стає чисто риторичним.

1.3. Методи та способи стабілізації теплового режиму

Уточнимо, що треба розуміти під енергоефективністю світлодіодів. З енергетичної точки зору, це світловіддача. Вона рівна відношенню потоку світла світлодіода до потужності, яку він споживає від електромережі. Однак, з точки зору споживача, це відношення світлового потоку до вартості приладу.

Для покращення вказаних параметрів можна намітити кілька шляхів[6-8]. В першу чергу це удосконалення напівпровідникових структур, які беруть участь в процесі перетворення енергії світла в енергію випромінювання. Зокрема, це збільшення внутрішнього і зовнішнього квантового виходів. Максимальні значення внутрішнього квантового виходу наближаються до 1 а зовнішнього 0,3 для червоних і блакитних світлодіодів. Таким чином, при граничному збільшенні внутрішнього квантового виходу до 1 ефективність світлодіода можна збільшити в 2-2,5 рази. Аналіз наукової літератури показує що в найближчій перспективі це цілком реальне завдання.

Однак, наблизити внутрішній квантовий вихід до граничної величини, необхідно синтезувати нові, максимально узгоджені з періодом кристалічної ґратки основного напівпровідника матеріали підкладки. В даний час найбільше використовується сапфір. Однак карбід кремнію підходить краще, адже в нього період кристалічної ґратки ідеально узгоджений з періодом кристалічної ґратки підкладки. Крім того, карбід кремнію має великий коефіцієнт теплопровідності. Це створює умови для каналізації надлишкового тепла. Проте карбід кремнію є досить дорогим. Якщо в найближчому майбутньому вдасться поєднати недорогий кремній з перехідними шарами дорогого карбіду кремнію, то це

дасть можливість об'єднати технології виробництва оптоелектронних приладів з технологією виробництва кристалів на основі кремнію.

Суттєвого росту потоку світла, при теперішньому рівні розвитку технологій можна досягти при збільшенні кількості р-п-пар, які рекомбінують в зоні гетеропереходу за одиницю часу. Для цього треба збільшити струм через р-п-перехід. Однак тут є суттєві перешкоди [5-7]:

- при великих густинах струму в кристалі зменшується термін безвідмовної роботи,
- швидко збільшується концентрація дефектів кристалу, на яких відбувається безвипромінювальна рекомбінація носіїв заструму, що призводить до зменшення світловіддачі,
- при збільшенні струму, квадратично збільшується виділення тепла Джоуля, що ще більше нагріває гетероперехід.

В результаті спільної дії вказаних факторів світловіддача, якість світла, надійність та інші важливі параметри світлодіода погіршуються.

Таким чином, важливого значення набуває високоякісний тепловідвід, низькоомні теплові контакти, використання високотемпературного нітриду галію замість низькотемпературного арсеніду галію. Вказані чинники сприятимуть підвищенню густини струму збільшенню світлової потужності на один світловипромінюючий кристал в декілька разів [8].

Часто збільшення густини струму пов'язана з технологічними труднощами [4]. В такому разі можна збільшувати площу кристала. р-п-переходи сучасних кристалів мають площу майже 1 мм². Подальше збільшення площі кристалів пов'язано із великими технологічними труднощами. Одна з основних причин - нерівномірність розподілу густини струму живлення по поверхні р-п-переходу. Це приводить до нерівномірності нагріву кристалу, локальних перегрівів, нерівномірності випромінювання світла по поверхні активної зони. Наслідок – руйнування кристалу і приладу в цілому. Поки що цю проблему обходять використовуючи багатокристалльні світлодіодні матриці.

Аналіз динаміки росту у світловіддачі найкращих на сьогоднішній день блакитних світлодіодів показує, що в найближчій перспективі слід очікувати

кратного збільшення світловіддачі світлодіодних матриць. Крім того, за рахунок масовості виробництва ціну одного люмена світлодіодного випромінювання вдасться знизити мінімум в 10 разів.

При явних перевагах напівпровідникових джерел світла, їх використання можливе тільки при дотриманні відповідних теплових режимів роботи.

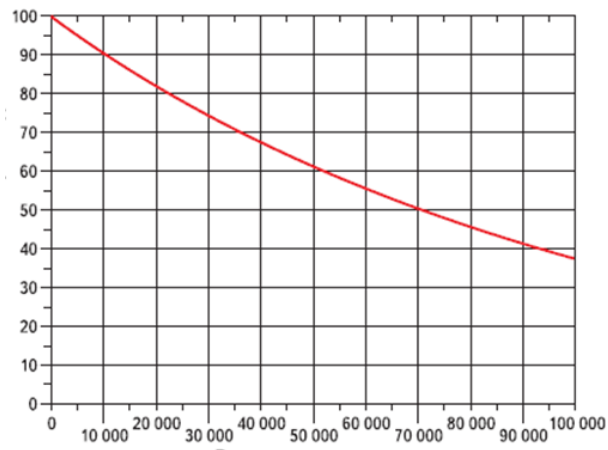


Рис. 1.16. Графічна залежність відносного світлового потоку від часу експлуатації світлодіодної матриці.

Зважаючи на їх чутливість до температури гетеропереходу світловипромінюючих кристалів, виникає гостра необхідність в регулюванні теплового режиму роботи.

Для цієї мети світлодіодні матриці мають товсту мідну або алюмінієву пластинку з круглими отворами для кріплення на радіатор. Добрий тепловий контакт металевієї пластинки із зовнішнім радіатором забезпечується ідеально плоскою поверхнею пластинки. Тому, світлодіодні матриці великої потужності можна кріпити безпосередньо на радіатор чи тепловідвід, фіксуючи їх притискним механізмом, або пайкою.

Щоб розв'язати задачу докорінно, треба покращувати якість напівпровідникового матеріалу. Однак, досягти задовільного результату можна навіть при теперішньому технічному стані справ напівпровідникового матеріалознавства. Зокрема, технічно грамотно розрахована і виготовлена система охолодження може покращити тепловий режим вже існуючих напівпровідникових джерел світла. Особливу увагу треба приділяти якості теплових контактів між складовими теплового кола [21,22]. Для створення

якісних теплових контактів між елементами охолоджуючої системи необхідно застосовувати спеціальні теплоконтактні матеріали. Крім цього, теплопровідні матеріали мусять виконувати і інші корисні функції. Зокрема, електро, гідро, та пароізоляцію вузлів та з'єднань електричного кола, та ін.. Електротехнічні параметри конструкційних матеріалів, які використовуються в світлотехніці приведені в таблиці 2.2. Як видно з таблиці, при застосуванні певного теплоконтактного матеріалу треба враховувати не тільки його теплові характеристики, але і механічні. Наприклад, при обчисленні теплового опору важливо знати площу і товщину клейового шару. Адже, тепловий опір теплового кола системи охолодження обернено пропорційно залежить від площі теплового контакту і прямо пропорційно від його товщини. Зокрема, тонкий і великої площі теплопровідний шар з трохи більшою величиною коефіцієнта питомої теплопровідності може мати менший тепловий опір ніж товстий шар малої площі, але з малим питомим коефіцієнтом теплопровідності.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1. Матеріали для світлодіодів

Світлодіод (СД), це радіоелектронний прилад, виготовлений на основі напівпровідникових матеріалів, як правило із легованих германію або кремнію. Принцип дії СД базується на односторонній провідності з виділенням енергії у вигляді світлового випромінювання.

Як і будь-який напівпровідниковий прилад, світлодіод являє собою з'єднання напівпровідникового кристалу р – типу (легованого трьохвалентним напівпровідником – наприклад індієм) з напівпровідником п – типу (легированим п'ятивалентним матеріалом – наприклад арсенідом), яке утворює р – n перехід.

Кристал р – типу має властивості «діркової» провідності. Основними носіями заряду в таких кристалах є позитивно заряджені ділянки ковалентних зв'язків кристалу, яким бракує електронів (див. рисунок).

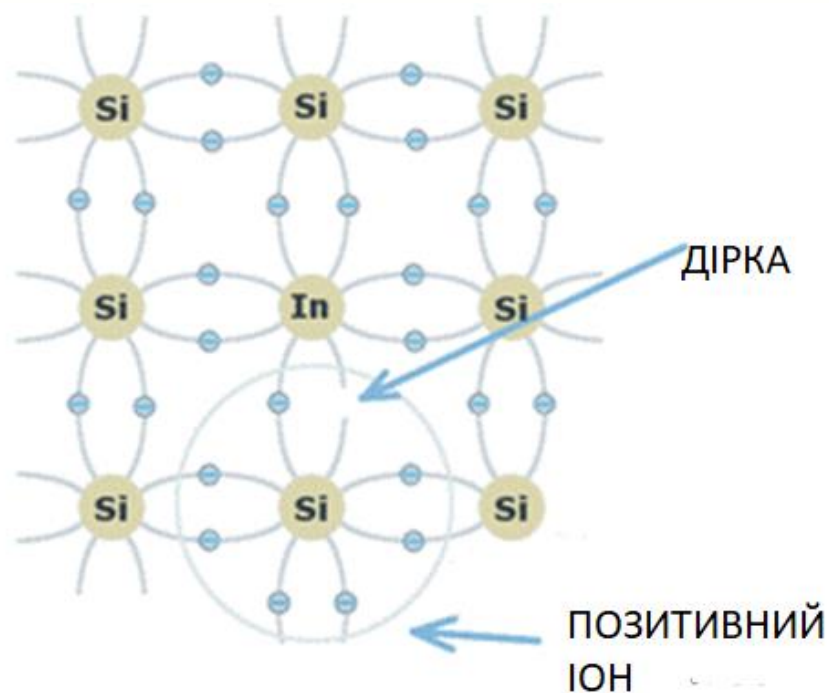


Рис. 2.1. Механізм виникнення дікової провідності в напівпровіднику

Кристал п – типу має електронну провідність. Носіями заряду в електронних кристалах є негативно заряджені вільні електрони.

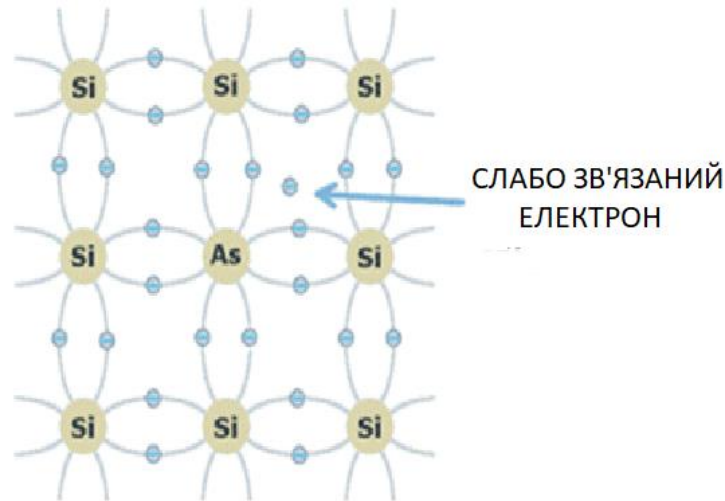


Рис. 2.2. Механізм виникнення дікової провідності в напівпровіднику

При з'єднанні кристалу p – типу з кристалом n – типу в області їх контакту утворюється p – n перехід, який має властивості закриваючого шару. В місці контакту двох напівпровідників n -типу і p -типу виникає дифузія: дірки з p -області дифундують в n -область, а електрони навпаки, з n -області в p -область. В результаті цього процесу в n -області в зоні закриваючого шару зменшується концентрація основних носіїв (електронів). Виникає позитивно заряджений шар. В p -області в зоні закриваючого шару навпаки, спостерігається зменшення концентрації дірок і виникає негативно заряджений шар. Таким чином, в області, яка безпосередньо примикає до контакту напівпровідникових структур відбувається утворення подвійного закриваючого шару, електричне поле якого перешкоджає дифузії електронів в p -область а дірок в n -область.

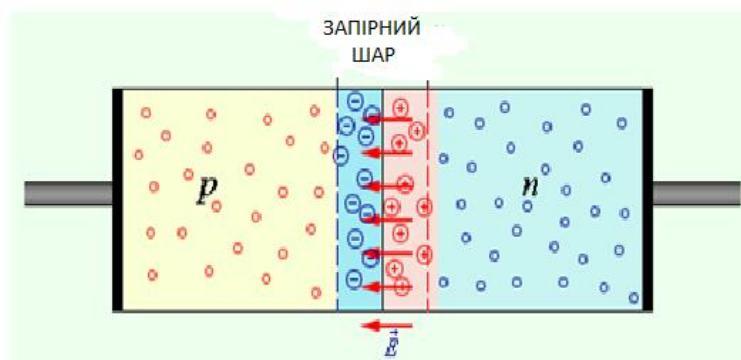


Рис. 2.3. Схема виникнення потенціального бар'єру на контакті напівпровідників з різним типом провідності.

У випадку приєднання n – p -переходу до зовнішнього джерела напруги так, щоб його позитивний полюс був з'єднаний з p -областю, а негативний з n -областю, величина напруженості електричного поля в закриваючому шарі зменшиться і полегшить перехід основних носіїв струму через потенціальний бар'єр контактного шару. Внаслідок цього, дірки з p -області і електрони з n -області будуть рухатися назустріч один одному, долаючи потенціальний бар'єр, що приведе до створення струму в прямому напрямку (прямого струму).

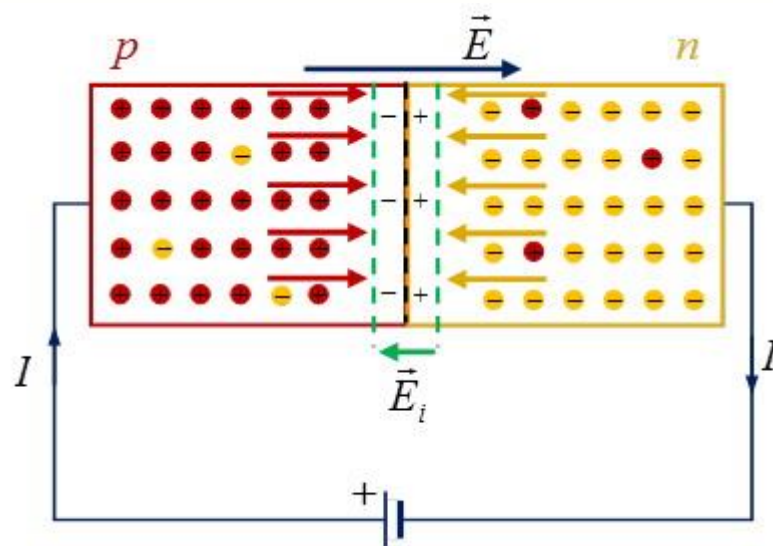


Рис. 2.4. Схема прямого включення.

В місці контакту напівпровідників в активній зоні при прикладанні прямої напруги відбувається рекомбінація електронів і дірок. При цьому відбувається вивільнення енергії у вигляді квантів видимої частини спектру випромінювання.



Рис. 2.5. Вивільнення квантів світла з активної зони СД.

На відміну від традиційних діодів, світлодіод в місці контакту має велику площу дотику. Завдяки цьому об'єм рекомбінації більший, а значить більший світловий потік та інтенсивність свічення.

Колір випромінювання світлодіодів залежить від ширини забороненої зони р-п-переходу, оскільки в р-п-переході відбувається рекомбінація електронів і дірок з випромінюванням фотонів світла. Отже, колір свічення залежить як від матеріалу напівпровідників так і від легуючих домішок. Чим синіший колір свічення, тим вища енергія квантів подолання забороненої зони р-п-переходу, а значить, тим більшою повинна бути ширина забороненої зони. З цього випливає, що змінюючи ширину забороненої зони р-п-переходу, взагалі кажучи, можна отримати будь який колір.

Для того, щоб отримати білий колір, необхідно змішати отримані кольори. Це можна зробити кількома способами.

- 1) Змішування кольорів свічення згідно з технологією RGB. Метод змішування полягає в тому, що на одній підкладці щільно формуються червоний, синій і зелений світлодіоди. Їх випромінювання змішується при допомозі оптичної лінзи. Внаслідок цього виникає біле світло.

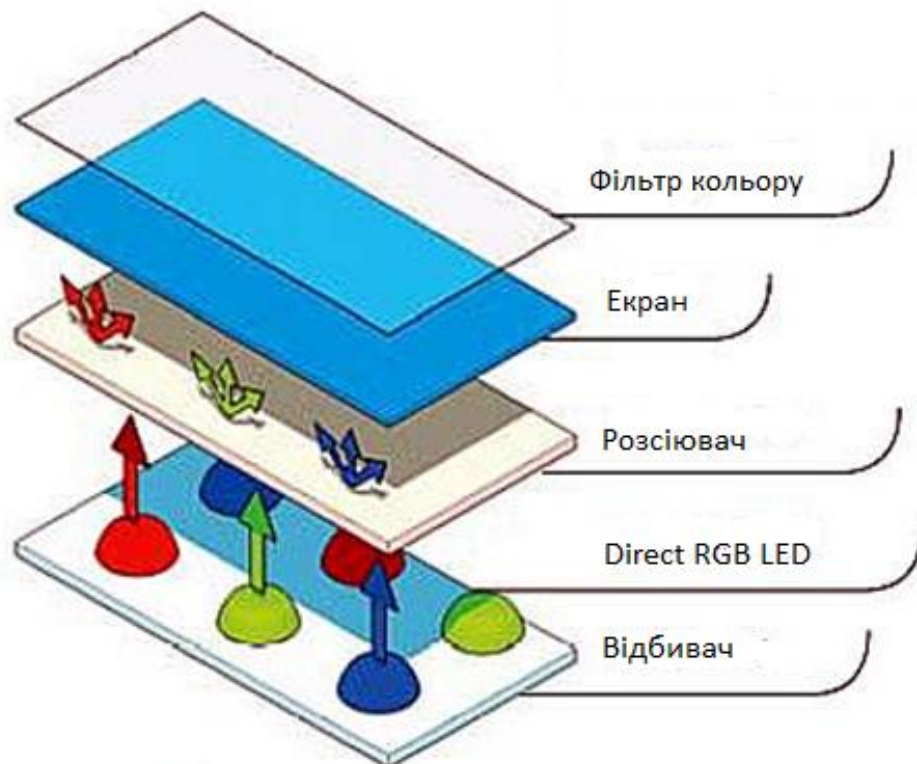


Рис. 2.6. Змішування кольорів.

2) За основу беруться три світлодіоди, які випромінюють ультрафіолетове світло. При цьому, на поверхню кожного із світлодіодів наноситься покриття з люмінофору синього, зеленого і червоного кольору. Таким чином, люмінофор починає одночасно світитися трьома кольорами. При змішуванні кольорів лінзою отримують білий колір.

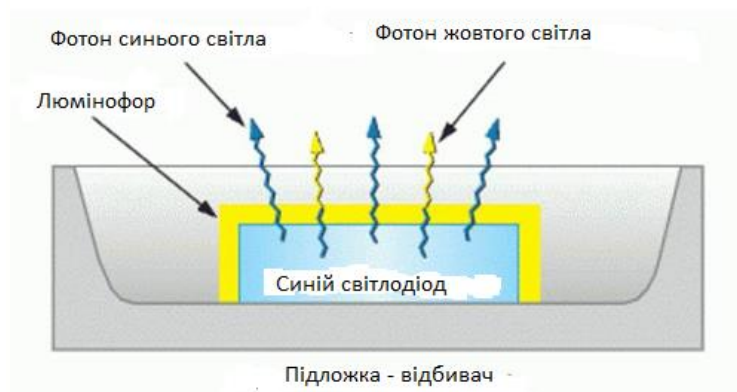


Рис. 2.7. Технологія виготовлення білих світлодіодів з нанесенням люмінофору.

3) За основу береться синій світлодіод. На його поверхню наноситься зелений і червоний люмінофор. Таким способом отримують біле, або близьке до білого світло.

Кожен спосіб отримання білого світла має свої плюси і мінуси. Зокрема, RGB технологія дозволяє змінювати колір і температуру свічення світлодіодів, шляхом зміни величини струму в кожному з них. Крім того, концентроване розміщення трьох світлодіодів в матриці дозволяє отримати високий загальний світловий потік і світловіддачу. Проте дана система не може забезпечити рівномірність свічення всієї світлової плями, оскільки в центрі освітлювальної системи буде свічення яскравіше ніж по краях. Це пояснюється явищем аберації оптичної системи СД. Виготовлення світлодіодів з використанням люмінофору набагато дешевше ніж RGB – технологія. Однак, недоліком цього способу є швидке старіння люмінофору і проблеми з рівномірним нанесення люмінофорного шару на поверхню світловипромінюючого кристалу.

2.2. Електричні характеристики світлодіодів

Світлодіод, це низьковольтний напівпровідниковий прилад випромінювання енергії в оптичному діапазоні. Інтервал живлення звичайних індикаторних світлодіодів лежить в інтервалі від 2 до 4 вольт при струмі споживання до 50 мА. Світлодіодні лампи, які призначені для освітлення приміщень живлять тією самою напругою, однак струм споживання таких приладів набагато більший і може сягати кількох десятків ампер.

Часто, для підвищення надійності окремі світлодіоди з'єднують в послідовно-паралельні групи. Це збільшує як їх сумарний струм так і сумарну напругу.

У зв'язку з особливістю вольт-амперної характеристики світлодіодів (Рис. 2.8), навіть при невеликому збільшенні напруги, струм споживання збільшується експоненційно. Це може призвести до перегріву приладу і передчасного його виходу з ладу. Тому, для стабілізації напруги живлення світлодіодної матриці використовують стабілізатори струму (драйвери).

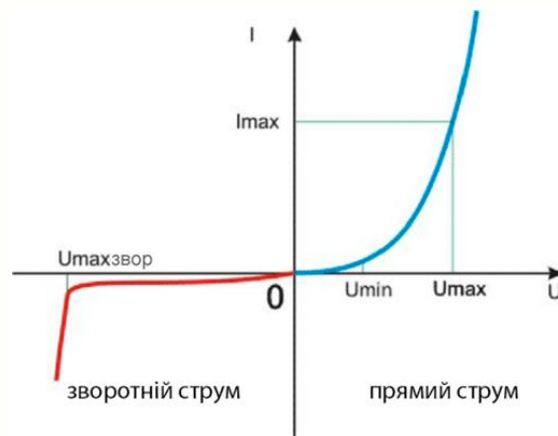


Рис. 2.8. Експоненційна ВАХ світлодіодів.

Зміну яскравості свічення СДМ ні в якому разі не можна здійснювати шляхом зменшення напруги живлення. Це роблять шляхом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Даний метод полягає у застосуванні імпульсно-модульованого струму з частотою вихідного сигналу від сотень до тисяч герц, з можливістю зміни ширини імпульсів і інтервалів між ними. Використовуючи ШІМ, середня яскравість світлодіодного модуля стає керованою. В той же час СДМ не гасне.

Термін служби СДМ, в основному, залежить від режиму експлуатації. Якщо це малопотужний світлодіод індикаторного типу, то його середній термін роботи дуже великий. Це зв'язано з тим, що струм живлення малий і не розігріває р-п-перехід до критичної температури. Проте, потужні світлодіодні матриці розраховані на термін роботи в 20-50 тисяч годин. Внаслідок великих струмів живлення, активна зона швидко нагрівається, атомна ґратка розхищується і руйнує цілісність р-п-переходу. Таким чином, старіння активної зони СД в кінці кінців виливається в зменшенні яскравості. Прийнято вважати, що коли яскравість світлодіода (СДМ) зменшується на 30% від початкової яскравості, то його треба замінити.

2.3. Вибір типу та потужності джерел світла

Особливістю світлодіодів і світлодіодних матриць є велика густина потоку світла, високий ККД та світловіддача. В таблицях приведені технічні параметри деяких матриць серій СХА і СХВ. Визначальною особливістю є при мінімальних затратах виготовляти як окремі освітлювальні прилади так і різноманітні освітлювачі. Зокрема, світлодіодні матриці білого світла типу СХА і СХВ на сьогоднішній день є найпотужнішими та найперспективнішими для світлотехнічних застосувань. Сумарні кошти, на проектування, виготовлення та інсталяцію сучасних освітлювачів на основі світлодіодних матриць (потужних світлодіодів) є набагато меншими ніж проектування та виробництво освітлювачів на основі окремих елементів.

При цьому розрахована за спеціальним алгоритмом тривалість гарантованого терміну роботи, навіть при температурі 115°C перевищує 5 років.

Основні технічні параметри матриць серії CXA

Таблиця 2.5

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 CXA

Таблиця 2.6

Параметр							
Тип світлодіода	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 CXA.

Таблиця 2.7

Параметр				
Тип світлодіода	CXA 1304	CXA 1507	CXA 1510	CXA 1512
Розміри, мм	13.35*13.35	15.85*15.85	15.85*15.85	15.85*15.85
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	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
Прямий струм, А (макс.)	1 0.5 0.25	0.75/0.35	0.9/0.45	1.2/0.6
Споживана потужність, Вт (тип/макс)	3.7/10	7.5/14	9/16	13/24

Основні технічні параметри світлодіодних матриць серії CXB.

Таблиця 2.8

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	33
Прямий струм, А (тип.)	0.7 0.35	0.5
Прямий струм, А (макс.)	1.4 0.7	1.4
Споживана потужність, Вт (тип/макс)	12.6/24	16.5/49

Деякі параметри світлодіодних матриць CXB з діаметром вікна до 14мм.

Таблиця 2.9.

Параметр						
Тип світлодіоду	CXB1304	CXB1507	CXB1512	CXB1816	CXB1820	CXB1830
Розміри, мм	13.35*13.35	15.85*15.85		17.85*17.85		
Діаметр випромінювача, мм	6	9		12		14
Світловий потік, лм	300... 1100	600... 1950	600... 3100	1400... 4500	1950... 5500	2100...7200
Пряма напруга, В	8.6 17.3 34.5	17.3/34.5	17.2/34.3	35	35	35
Прямий струм, А (тип.)	0.4 0.2 0.1	0.4/0.2	0.7/0.35	0.45	0.55	0.8
Прямий струм, А (макс.)	1 0.5 0.25	0.75/0.35	1.2/0.6	0.9	1.05	1.4
Споживана потужність, Вт (тип/макс.)	3.5/10	7/14	12/22	16/34	20/40	28/53

Основні параметри світлодіодів серії CXB

Таблиця 2.10

Параметр						
Тип світлодіода	CXB320	CXB2340	CXB3050	CXB3070	CXB3390	
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	5500... 12500	4000... 14000	8000... 18000	
Пряма напруга, В	35	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 СХА

Таблиця 2.11

Параметр				
Тип світлодіоду	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	35	69
Прямий струм, А (тип.)	0.7	0.5	1.4	1.2
Прямий струм, А (макс.)	1.05	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 при тих же геометричних розмірах. Часто світлодіодні лампи використовуються разом з рефлекторами.



Рис. 2.4. Оптика та арматура кріплення для світлодіодних матриць

2.3. Матеріали для термоелектричних охолоджувачів

Для виготовлення термоелектричних охолоджувачів використовуються напівпровідникові термоелектричні матеріали, які мають найвищий коефіцієнт перетворення електричної енергії в холод. Список речовин, які мають термоелектричні властивості досить великий (тисячі сплавів і сполук), однак тільки деякі з них можуть використовуватися з термоелектричною метою.

Сучасна наука постійно шукає нові напівпровідникові композити. Внаслідок складності фізичних процесів, які протікають в термоелектричних матеріалах, прогрес в цій області забезпечується не стільки теорією скільки практикою. Можна гарантовано сказати, що в даний час не існує такого термоелектричного матеріалу, який би повністю задовольняв промисловість своїми властивостями. Головним способом в створенні такого матеріалу є експеримент. Найважливішими властивостями напівпровідникового матеріалу для термоелектричних холодильників є:

- ККД: бажано якнайбільший коефіцієнт корисної дії (для підвищення ефективності);
- Технологічність: можливість будь яких видів обробки;
- Вартість: бажано відсутність в складі рідкісних елементів або їх мінімальна кількість, широка сировинна база;
- Коефіцієнт термо-ЕРС: бажано якнайбільший (для спрощення конструкції);
- Токсичність: бажано відсутність, або малий процентний вміст токсичних елементів (наприклад: свинцю, вісмуту, телуру, селену та ін.) або їх інертний стан (в складі сплавів);
- Робочі температури: бажано якнайширший температурний діапазон для використання високопотенціального тепла і, як наслідок, збільшення холодильного коефіцієнта.

Ефект Зеебека [1] є об'ємним термоелектричним ефектом, який є базовим для всіх термоелектричних перетворень енергії. Суть ефекту криється в тому, що між кінцями розімкнутої термоелектричної вітки, яка складається з двох з'єднаних послідовно напівпровідників з різною провідністю, генерується

термоелектрорушійна сила. Така конструкція називається термоелектричною парою. Ефект Зеебека будемо пояснювати так. Якщо кінець напівпровідника, для визначеності нехай він буде n-типу підігріти до температури T_1 , а інший охолодити до температури T_2 , то електрони на більш гарячому кінці матимуть більшу швидкість і кінетичну енергію ніж на холоднішому. В результаті цього електрони будуть рухатися в бік холоднішого кінця накопичуючись на ньому. Холодний кінець зарядиться негативно, а гарячий кінець зарядиться позитивно.

Крім цього, в напівпровіднику при рості його температури концентрація електронів також буде рости. При цьому процесі на гарячому кінці їх буде набагато більше ніж на холодному кінці. В результаті спільної дії вказаних факторів, в напівпровідниковому зразку n- типу у напрямку від гарячого кінця до холодного кінця виникне перепад концентрації електронів. При цьому, знову ж таки на гарячішому кінці накопичуватиметься позитивний заряд. Процес сепарації зарядів буде тривати до моменту, коли різниця електричних потенціалів, яка виникла, не ініціює протилежний потік електронів, який знищить первинний. Теоретично, коефіцієнт термоелектрорушійної сили описується аналітично:

$$\alpha = \frac{k}{e} \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{kT} - \zeta \right),$$

тут k - стала Больцмана,

e – модуль заряду електрона,

$\bar{\varepsilon}$ – середня кінетична енергія носіїв заряду,

$\zeta = \eta/kT$ - безрозмірний хімпотенціал,

η - хімпотенціал носіїв.

Розглянутий механізм сепарації дірок в напівпровідниках p - типу протікає по такій самій схемі. Правда є суттєва різниця. Адже в напівпровідниках p – типу на гарячішому кінці буде більше негативного заряду. Логічно допустити, що в термоелектричному елементі, який складається з послідовно з'єднаних гілок з p – типом і n – типом провідності термоелектрорушійна сила гілок буде сумуватися. Сумарна термоелектрорушійна сила термоелектричного елемента має вигляд:

$$E_{te} = (\alpha_n + \alpha_p) \cdot (T_1 - T_2) = \alpha_{pn} (T_1 - T_2), \quad (2.1)$$

де α_p - коефіцієнт термоелектрорушійної сили зразка p - типу,

α_n - коефіцієнт термоелектрорушійної сили зразка n - типу,

$\alpha_{pn} = \alpha_p + \alpha_n$ - сумарний коефіцієнт термоелектрорушійної сили.

Ефект Пельтьє являється поверхневим ефектом. Суть цього ефекту полягає в тому, що при протіканні струму через термоелектричну пару, в місці з'єднання зразків виділиться або поглинеться теплова енергія (в залежності від того в якому напрямку протікає струм) [27]

$$P_{II} = \Pi_{pn} I, \quad (2.2)$$

де

$\Pi_{pn} = \alpha_{pn} T$ – коефіцієнт Пельтьє,

T – абсолютна температура контакту,

I – величина струму.

Причиною генерації тепла Пельтьє є проходження електронів через місце з'єднання напівпровідників. Причому, в місці з'єднання різнотипних матеріалів виникає потенціальний бар'єр. Якщо електрони проходять потенціальний бар'єр від в напрямку від нижчого до вищого то в місці контакту поглинається енергія кристалічної ґратки. Контакт буде охолоджуватися. При зміні напрямку струму, тобто при переході електронів через з'єднання в напрямку від напівпровідника n -типу до напівпровідника p -типу в місці контакту додатково буде генеруватися теплова Пельтьє, а кристалічна ґратка буде розігріватися.

2.4. Електротехнічні характеристики термоелектричних охолоджувачів

Застосування термоелектричних охолоджувачів для стабілізації теплового режиму світлодіодів і світлодіодних матриць великої потужності показало їх високу ефективність. Однак, при цьому треба дотримуватися певної процедури застосування, який впливає з технічних особобливостей конструкції

освітлювального приладу. При цьому велику роль відіграє потужність термоелектричного модуля, яка визначається його конструкцією, кількістю термопар в ньому та лінійними розмірами. Для полегшення вибору типу модулів охолодження в таблиці 2.1 наведені технічні характеристики деяких типів термоелектричних модулів.

Типи термоелектричних модулів АТМ

Таблиця 2.1

Тип термоелектричного модуля	Характеристики					
	I_{max} (А)	U_{max} (В)	$P_{c\ max}$ (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

При виборі потужності і типу і термоелектричного охолоджувача важливо забезпечити необхідну швидкість та інтенсивність охолодження. Зрозуміло, що термоелектричний охолоджувач малої потужності не

забезпечить необхідну холодильну потужність. Дуже швидко це призведе до порушення теплового режиму охолоджуваної світлодіодної матриці і її передчасного виходу з ладу. Однак є й інша крайність. При виборі термоелектричного модуля надто великої потужності призведе до надмірного зниження температури холодного спаю МО, подоланні точки роси, накопиченню кристалів льоду та короткого замикання.

3. РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1. Основні співвідношення в термоелектричному модулі охолодження.

Найважливішою перевагою термоелектричного охолодження перед іншими способами охолодження є інваріантність процесів переносу по відношенню до масштабних розмірів [1]. Тому, найважливіші енергетичні співвідношення можна отримати розглядаючи процеси лише в одній термоелектричній парі. В подальшому будемо розглядати тільки термопари, виготовлені з напівпровідникових матеріалів. Причина полягає в тому, що вони мають на кілька порядків більшу термоелектричну добротність ніж металеві.

Побудуємо теплову фізичну модель. Вважатимемо, що струм живлення протікає в напрямку від термоелемента n -типу провідності до термоелемента p -типу провідності (в подальшому p – тип і p – тип). Нехай струм проходить через послідовне з'єднання термоелементів в напрямку від p - типу до n – типу. Термоелементи з'єднані металевою (найчастіше мідною) комутаційною шиною (колектором). Колектор знаходиться в кондуктивному контакті із джерелом тепла, інший колектор з тепловідводом (радіатором).

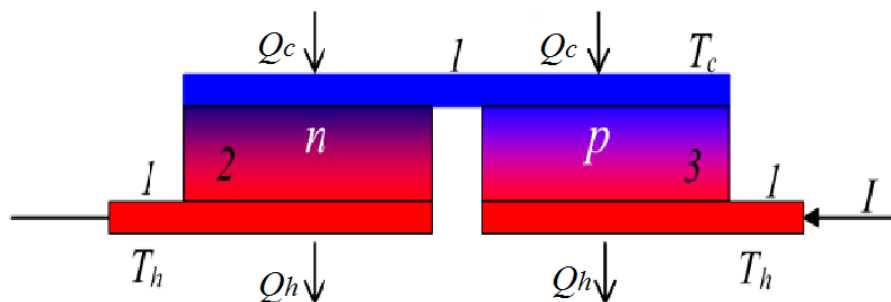


Рис. 3.1 Схема термопари. 2.-термоелемент n – типу, 2.-термоелемент p – типу, 1 – гарячий колектор, 4 – холодний колектор.

Термопара складається з двох термоелементів [1]. Вони мають електронний (n -тип) і дірковий (p -тип) провідності. Причому, термоелемент n -типу має від'ємний коефіцієнт Зеебека, а термоелемент p -типу позитивний. Загальний опір термоелектричної пари визначимо як суму опорів термоелементів:

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

Загальну теплопровідність двох паралельних гілок термопари визначимо як суму теплопровідностей окремих гілок

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

тут l_1 і l_2 – довжини, σ_1 і σ_2 – коефіцієнти питомої електропровідності, k_1 і k_2 – коефіцієнти питомої теплопровідності, S_1 і S_2 – площі поперечного перерізу гілок термоелементів.

Загальний опір R і загальна теплопровідність K є взаємо залежними. Вони обидві залежать від розмірів елементів. Тоді добуток

$$KR = \left[\left(\frac{k_1}{\sigma_1} \right)^{1/2} + \left(\frac{k_2}{\sigma_2} \right)^{1/2} \right]^2, \quad (3.3)$$

причому,

$$\frac{l_1 S_2}{l_2 S_1} = \left(\frac{\sigma_1 k_1}{\sigma_2 k_2} \right)^{1/2}. \quad (3.4)$$

При протіканні струму через послідовно сполучені термоелементи в місці їх контакту (в комутаційній шині) виділяється або поглинається теплова енергія.

Якщо струм протікає в напрямку від p - типу до n – типу (як зображено на рисунку), то в місці контакту носії заряду (електрони) будуть проходити потенціальний бар'єр і забирати теплову енергію від комутаційної шини. Шина буде охолоджуватися (холодний колектор). Навпаки, інша шина буде нагріватися (гарячий колектор).

Кількість поглинутої теплової енергії описується формулою,

$$Q_c = \Pi_{pn} I, \quad (3.5)$$

а кількість виділеної формулою,

$$Q_h = \Pi_{np} I, \quad (3.6)$$

де

$$P_{pn} = \alpha_{pn} \left(T - \frac{\Delta T}{2} \right), \quad (3.7)$$

причому,

$$P_{pn} = -P_{np} \quad (3.8)$$

- коефіцієнт Пельтьє,

$$\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n, \quad (3.9)$$

диференціальна термоЕРС,

α_p - коефіцієнт термоЕРС вітки p -типу,

α_n - коефіцієнт термоЕРС вітки n -типу,

$$T = \frac{T_h + T_c}{2} \quad (3.10)$$

- середня абсолютна температура колекторів,

T_h - абсолютна температура гарячого колектора,

T_c - абсолютна температура холодного колектора,

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (3.11)$$

- перепад температур між гарячим і холодним колектором.

Крім тепла в контактах (поверхневий ефект) в об'ємі термоелемента виділяється тепло Джоуля (об'ємний ефект)

$$Q_R = I^2 \cdot R \quad (3.12)$$

Хоч ефект Джоуля є об'ємним, будемо вважати, що половина тепла виділяється на гарячому колекторі а друга половина на холодному.

Крім вказаних теплот, до холодного колектора підходить, а від гарячого колектора відходить тепло кондукції, яке згідно із законом теплопровідності Фур'є визначається співвідношенням

$$Q_K = +K \cdot (T_h - T_c), \quad (3.13)$$

$$Q_K = -K \cdot (T_h - T_c), \quad (3.14)$$

Знак плюс береться якщо тепло підходить до колектора, а знак мінус, якщо відходить.

Складемо рівняння балансу тепла для кожного із спаїв. Будемо вважати, що до спаїв підходить тільки половина тепла джоуля. Тому, для холодного спаю отримаємо [5]

$$Q_c = \alpha_{pn} \cdot T_c \cdot I - \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot (T_h - T_c), \quad (3.15)$$

і для гарячого

$$Q_h = \alpha_{pn} \cdot T_h \cdot I + \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot (T_h - T_c), \quad (3.16)$$

Як випливає із закону збереження енергії, кількість тепла, яка виділяється на гарячому колекторі більша від кількості тепла, яка поглинається холодним колектором на величину потужності, яку витрачає джерело живлення

$$W = Q_h - Q_c. \quad (3.17)$$

Причому, ця потужність має дві складових. Перша складова відповідає за перенос електронів у напрямку, протилежному до напрямку дії термоелектричної електрорушійної сили, яка виникає внаслідок ефекту Зебека

$$W_z = \alpha_{pn} \cdot I \cdot (T_h - T_c), \quad (3.18)$$

а друга відповідає за виникнення тепла Джоуля

$$W_d = I^2 \cdot R. \quad (3.19)$$

Таким чином,

$$W = Q_h - Q_c = \alpha_{pn} \cdot I \cdot (T_h - T_c) + I^2 \cdot R. \quad (3.20)$$

Для аналізу охолоджувальної здатності введемо безрозмірний коефіцієнт, який рівний відношенню поглинутої термоелементами кількості енергії до величини енергії, яку витрачає джерело живлення [10]. Він називається холодильним коефіцієнтом:

$$\varepsilon = \frac{Q_c}{W} = \frac{\alpha_{pn} \cdot T \cdot I - \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot \Delta T}{\alpha_{pn} \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R}. \quad (3.21)$$

Визначається середньою температурою колекторів, різницею температур між колекторами, коефіцієнтом диференціальної термоЕРС елементів, їх опором та теплопровідністю, величиною струму. Для термоелектричних модулів Пельтьє, виготовлених з напівпровідника на базі телуриду вісмуту

холодильний коефіцієнт складає величину $\varepsilon = 0,30 \div 0,80$. Очевидно, що при $I = 0$, та $\Delta T = 0$

$$\varepsilon = \lim_{I \rightarrow 0, \Delta T \rightarrow 0} \frac{\alpha_{pn} \cdot T \cdot I - \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot \Delta T}{\alpha_{pn} \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R} = \infty. \quad (3.22)$$

Це співвідношення, має глибокий фізичний зміст. Зокрема, виявляється що отримати високу охолоджуючу ефективність термоелектричного охолоджувача можна, при його живленні мінімальним струмом. Мінімальну границю струму оцінюють теоретично або знаходять експериментально. Зокрема, струм потрібно зменшувати до тих пір, поки його ще досить для компенсації потоку тепла від гарячого колектора до холодного викликаного теплопровідністю. Таким чином, для отримання високої холодопродуктивності, треба використовувати термоелектричні модулі охолодження, які мають велику кількість термоелементів.

Режимом роботи ТЕМ можна керувати шляхом зміни величини струму. Запишемо умову екстремуму функції багатьох змінних $\varepsilon = \varepsilon(I, \Delta T)$ [10-12].

$$d\varepsilon = \frac{\partial \varepsilon(I)}{\partial I} dI + \frac{\partial \varepsilon(I)}{\partial \Delta T} d\Delta T = 0. \quad (3.23)$$

Максималізуємо холодильний коефіцієнт. Очевидно, що холодильний коефіцієнт $\varepsilon = \varepsilon(I, \Delta T)$ стане максимальним при оптимальній величині струму

$$I_{opt} = \frac{\alpha_{pn} \cdot (T_h - T_c)}{R \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{Z \cdot (T_h - T_c)}{2}} - 1 \right]}. \quad (3.24)$$

Підставляючи (3.23) в (3.20) після математичних перетворень отримаємо, що

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \frac{\sqrt{1 + \frac{Z \cdot \Delta T}{2}} - \frac{T_h}{T_c}}{\sqrt{1 + \frac{Z \cdot \Delta T}{2}} + 1} \approx \frac{T_c}{T_h - T_c} \frac{\sqrt{1 + \frac{Z \cdot \Delta T}{2}} - 1}{\sqrt{1 + \frac{Z \cdot \Delta T}{2}} + 1} \quad (3.25)$$

Максимальну холодопродуктивність знайдемо з умови екстремуму функції двох змінних $Q_c = Q_c(I, \Delta T)$. Диференціюючи по струму формулу (3.20)

$$\frac{dQ_c(I)}{dI} = 0. \quad (3.26)$$

Знайдемо ε_d при якому холодопродуктивність досягне максимальної величини

$$\varepsilon_d = \frac{1}{2T_h} \left(T_c - \frac{2 \cdot \Delta T}{ZT_c} \right). \quad (3.27)$$

Представлені розрахунки доводять, що холодильний коефіцієнт найбільше залежить від величини термоелектричної добротності. Термоелектрична добротність – параметр розмірності оберненої температури. Він залежить від матеріальних параметрів напівпровідникових матеріалів. Термоелектрична добротність описується формулою

$$Z = \frac{\alpha_{pn}^2 \sigma}{k}, \quad (3.28)$$

тут

α_{pn} - диференціальний коефіцієнт термоЕРС,

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p \quad (3.29)$$

σ_n - питомий коефіцієнт електропровідності n-вітки,

σ_p - питомий коефіцієнт електропровідності p-вітки,

$$k = k_n + k_p \quad (3.30)$$

k_n - питомий коефіцієнт електропровідності n-вітки,

k_p - питомий коефіцієнт електропровідності p-вітки.

Як видно із формул для холодопродуктивності і холодильного коефіцієнта відповідно (3.14) і (3.20), вони збільшуються при збільшенні параметра Z . Зокрема, при $Z \rightarrow \infty$ холодильний коефіцієнт він стає рівним холодильному коефіцієнту машини Карно

$$\varepsilon_k = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} = \frac{\alpha_{pn} \cdot I \cdot T_c}{\alpha_{pn} \cdot I \cdot (T_h - T_c)} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (3.31)$$

Максимальна холодопродуктивність важлива в системах термостабілізації при відборі малих, або дуже малих потужностей. В цьому випадку економія електроенергії не актуальна.

Навпаки, в системах термостабілізації з необхідністю відбору великих теплових потужностей слід працювати при максимальному холодильному коефіцієнті [5-7].

Переходити від одного режиму роботи термоелектричного модуля до іншого можна змінюючи силу струму. На рис.3.2 приведена серія навантажувальних характеристик при різних струмах. Звичайний модуль працює в інтервалі струмів $I = (0.25 \div 0.85) \cdot I_{\max}$. Таким чином термоелектричне охолодження має велику функціональну гнучкість.

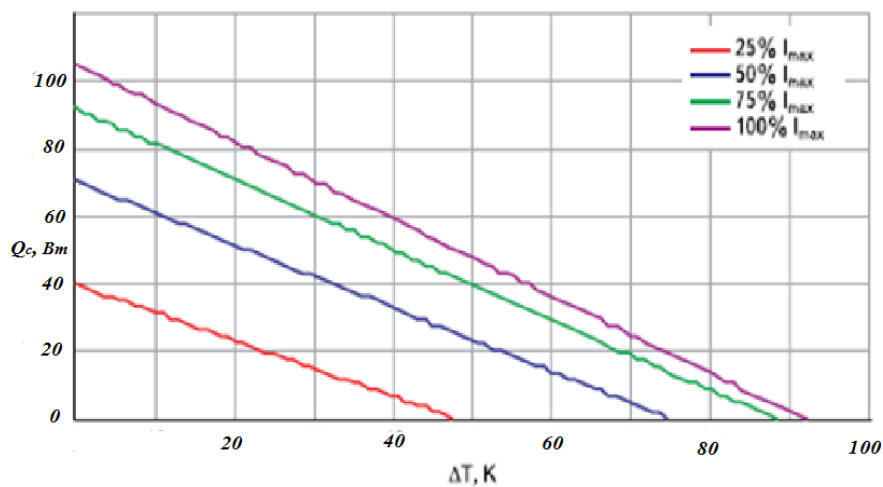


Рис.3.2. Графік залежності холодної потужності від різниці температур між гарячим і холодним колекторами при різній величині струму живлення.

Як видно із графіка, максимальну різницю температур між гарячим і холодним колекторами термоелемента можна отримати при нульовій холодопродуктивності $Q_c = 0$. Навпаки, при відсутності різниці температур між колекторами $\Delta T = 0$, холодопродуктивність Q_c максимальна.

3.2. Напівпровідниковий термоелектричний модуль

Зменшення розмірів напівпровідникових джерел світла і збільшення кількості випромінюючих кристалів на одиницю площі в одному освітлювачі призводить до збільшення величини теплового потоку. Це неминуче відбивається на тепловому стані освітлювальної системи. Для стабілізації

теплого режиму освітлювальних приладів все частіше використовуються зовнішні системи охолодження. Найперспективнішими з них є напівпровідникові термоелектричні модулі охолодження (ТЕМ) [1, 2]. Типовий термоелектричний модуль охолодження зображений на рисунку (3.2). Він складається з великої кількості послідовно сполучених напівпровідникових термопар, кожна з яких контактує з одним із колекторів тепла. При проходженні струму живлення, між колекторами тепла ТЕМ виникає різниця температур. При цьому температура одного з колекторів зменшується а другого збільшується. Холодніший використовується для поглинання надлишкового тепла, яке виділяє джерело світла.

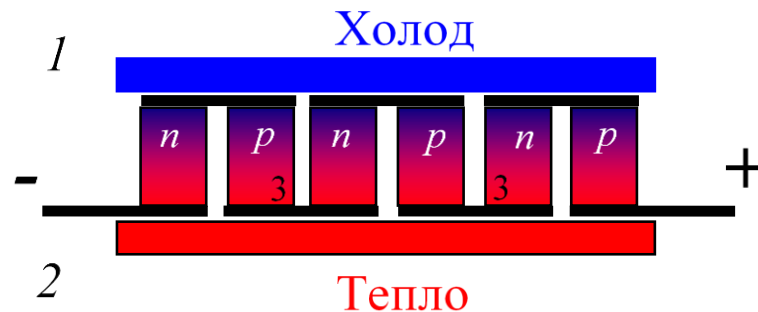


Рис. 3.3. - Схема модуля охолодження: 1 – холодний колектор; 2 – гарячий колектор, 3 – напівпровідникові стовпчики.

По суті, ТЕМ являє собою тепловий насос, який забирає тепло від холоднішого колектора до гарячішого. Гарячіший колектор ТЕМ примусово охолоджують радіаторами, які обмінюються теплом з навколишнім середовищем. Зрозуміло, що навіть при ідеальному теплообміні, температура активної зони світлодіодів не може бути меншою від температури оточуючого середовища.

Крім функції термостабілізації ТЕМ дозволяє знизити температуру світлодіода до температури нижчої від температури довкілля. Це є суттєвою перевагою перед іншими системами, адже має наступні переваги: малу вагу, безшумність роботи, високу надійність, компактність, високу швидкодію.

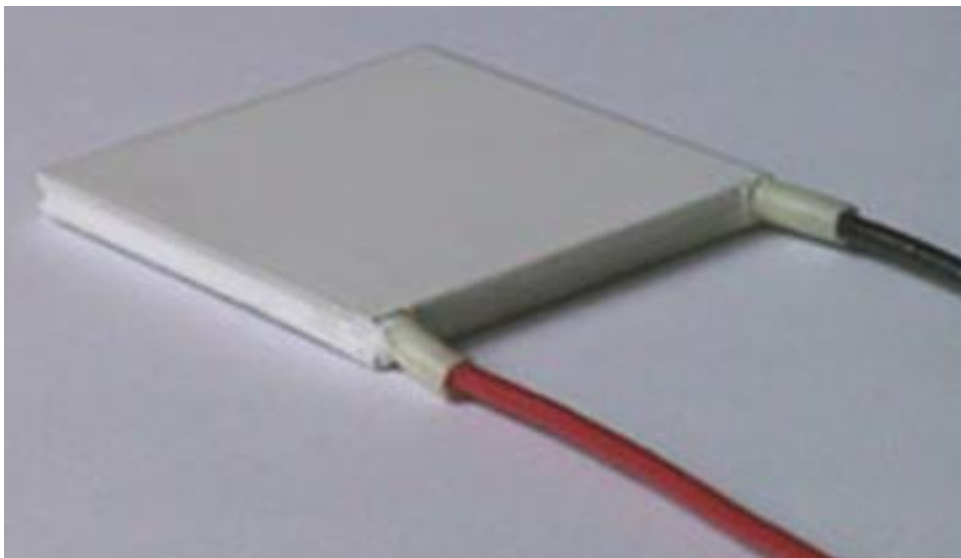


Рис. 3.4. ТЕМ типу А ТМО 12.2-131-11.4 HR2

Напівпровідниковий термоелектричний модуль охолодження містить декілька десятків термоелектричних пар. Термопари між собою сполучені послідовно і закріплені між двома металокерамічними колекторами тепла. Кераміка має малий коефіцієнт електропровідності і великий коефіцієнт теплопровідності (рис. 3.3). Термоелектричні пари мідними комутаційними пластинками сполучені в послідовне електричне коло, до якого від джерела живлення підводиться постійний струм. Потужні модулі можуть мати до кількох сотень штук термоелектричних пар. Це відкриває широкі можливості в проектуванні термоелектричних модулів охолодження з наперед прогнозованою холодопродуктивністю. Оскільки термоелектричний модуль охолодження не може працювати в режимі ‘холостого ходу’, то до холодного колектора потрібно приєднати теплове навантаження (об’єкт охолодження). В свою чергу, холодний колектор необхідно приєднати охолоджуючий радіатор.

3.3. Побудова математичної моделі для розрахунку температури світлодіода

Збільшувати потужність випромінювання світлодіодних матриць можна двома шляхами, екстенсивним та інтенсивним. Інтенсивний шлях полягає у збільшенні струму та напруги живлення. Цей шлях має обмеження на потужність розсіювання. Екстенсивний шлях полягає в постійному збільшенні кількості випромінюючих кристалів. В зв’язку з цим, потужні світлодіодні

матриці містять десятки і сотні сполучених між собою світлодіодних кристалів. При цьому кількість виділеного тепла постійно зростає. Для того, щоб активна зона матриці не перегрівалася необхідно передбачити стабілізацію її теплового режиму. Для цього передбачають різноманітні засоби охолодження. Найперспективнішими на сьогодні є термоелектричні системи охолодження. Для розрахунку теплового режиму матриці потрібно побудувати її математичну модель [5-8].



Рис. 3.5. Схематична будова напівпровідникового світлодіода.

Для спрощення моделі вважатимемо, що всі світлодіоди матриці знаходяться в однакових теплових умовах. Це дає підстави розрахунок теплового режиму матриці замінити розрахунком теплового режиму окремого світлодіода.

Кількість теплової енергії, яке виділяє матриця знайдемо із закону Джоуля

$$Q_t = (1 - \eta_e) \cdot U_f \cdot I_f, \quad (3.32)$$

де η_e – квантова ефективність гетеропереходу, U_f і I_f прикладена напруга та споживаний матрицею струм.

Будемо нехтувати розсіюванням тепла, яке матрицею розсіюється поза колектором охолоджувача. Зокрема, будемо вважати що виділене матрицею тепло повністю поглинається холодним спаєм термоелектричного модуля

$$Q_h = Q_t \quad (3.33)$$

Розрахунок температури активної зони світлодіода проведемо методом електротеплової аналогії [4,5], який полягає в тому, що готові розв'язки задач

електричних кіл постійного струму можуть бути використані для розрахунку аналогічних задач теплових кіл. Аналогічна схема теплового кола світлодіода разом із системою його термостабілізації зображена на рисунку.

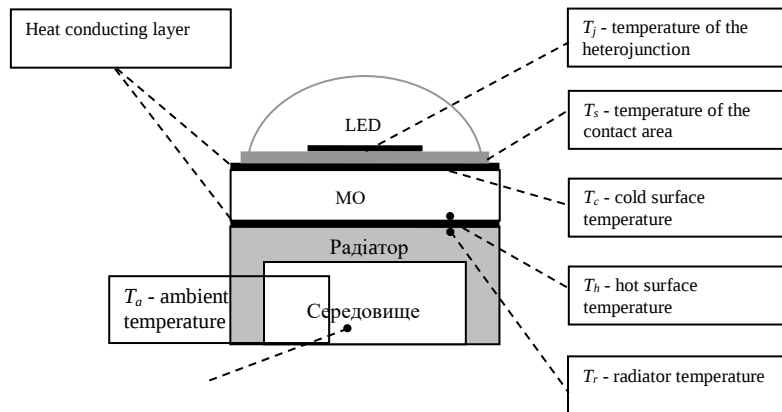


Рис. 3.6. Схематична будова стабілізації теплового режиму СД термоелектричними модулями охолодження Пельтьє.

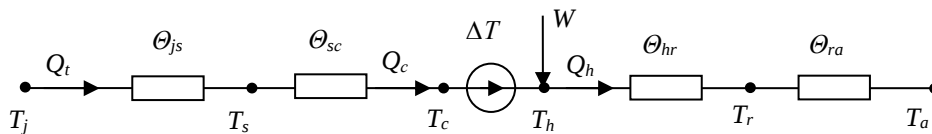


Рис. 3.7. Еквівалентна схема теплового кола стабілізації СД термоелектричними модулями охолодження Пельтьє.

де

$\Delta T = T_h - T_c$ - перепад температур між спаями (колекторами тепла),

Θ_{js} - тепловий опір між активною зоною СД і контактною площадкою,

Θ_{sc} - тепловий опір між контактною площадкою і холодним спаєм

Θ_{hr} - тепловий опір між гарячим спаєм і радіатором,

Θ_{ra} - тепловий опір між радіатором та довкіллям.

Використаємо другий тепловий закон Кірхгофа. Він полягає в тому, що алгебраїчна сума перепадів температур на теплових елементах вітки, дорівнює

перепаду температури між кінцями вітки. потоків Зокрема, можна записати рівняння

$$T_j = T_a + P_c \cdot (\Theta_{js} + \Theta_{sc}) + P_h \cdot (\Theta_{hr} + \Theta_{ra}) - \Delta T, \quad (3.34)$$

Знайдемо кількість тепла, яке в одиницю часу поглинається холодним спаєм

$$P_c = \alpha_{pn} \cdot T_c \cdot I - \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot \Delta T, \quad (3.35)$$

Знайдемо кількість тепла, яке в одиницю часу віддається гарячим спаєм

$$P_h = \alpha_{pn} \cdot T_h \cdot I + \frac{I^2 \cdot R}{2} - K \cdot \Delta T, \quad (3.36)$$

В рамках побудованої теплової моделі будемо вважати що від гарячого спаю до навколишнього середовища при допомозі радіатора в одиницю часу відводиться кількість тепла P_h .

Використовуючи метод балансу потужності (закон збереження енергії) можна записати, що теплова потужність, яка виділяється на гарячому спайі більша від теплової потужності, яку поглинає холодний спай на величину електричної потужності, яку віддає джерело живлення [10]

$$P_h = P_c + W \quad (3.37)$$

Потужність джерела живлення W витрачається на переміщення носіїв струму проти термоелектрорушійної сили, яка виникає термоелектричному колі, і на теплоту Джоуля:

$$W = P_h - P_c = \alpha_{pn} \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R \quad (3.38)$$

Визначимо холодильну ефективність роботи термоелектричного охолоджувача Пельтьє як відношення P_c/W

$$\varepsilon = \frac{P_c}{W} = \frac{P_c}{P_h - P_c}. \quad (3.39)$$

Використовуючи другий тепловий закон Кірхгофа знайдемо температуру активної зони світлодіода

$$T_j = T_a + Q_c \cdot \Theta_c + Q_c \cdot \Theta_h + (\alpha_{pn} \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R) \cdot \Theta_h - \Delta T. \quad (3.40)$$

З цієї формули можна знайти температуру перевищення активної зони світлодіода над температурою довкілля

$$\Delta T_j = T_j - T_a = Q_c \cdot (\Theta_c + \Theta_h) + \left(\alpha_{pn} \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R \right) \cdot \Theta_h - \Delta T, \quad (3.41)$$

де

$\Theta_c = \Theta_{js} + \Theta_{sc}$, - тепловий опір з боку холодного спаю,

$\Theta_h = \Theta_{hr} + \Theta_{ra}$ - тепловий опір з боку гарячого спаю,

$$\Delta T = \frac{1}{K} \cdot \left(\alpha_{pn} \cdot T_c \cdot I - \frac{I^2 \cdot R}{2} - Q_c \right), \quad (3.42)$$

перепад абсолютних температур між спаями.

Отже, температура активної зони світлодіода в першу чергу визначається споживаною електричною потужністю, температурою довкілля, повним тепловим опором вітки починаючи від активної зони закінчуючи радіатором теплообміну з довкіллям. Керування режимом роботи модуля Пельтьє здійснюється шляхом зміни величини струму живлення. Для конкретного термоелектричного модуля дуже важливим є знайти таку величину струму споживання, при якій відбувається ефективне зниження температури активної зони.

Основні технічні параметри світлодіодної 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

З'ясуємо, як впливає величина струму споживання термоелектричного модуля Пельтьє на температурний режим активної зони світлодіодної матриці. Виберемо сучасну матрицю XL 2590 CXA. Її технічні параметри наведені в таблиці 3.2.

Як видно з таблиці, при зміні струму, електрична потужність споживання змінюється в діапазоні від 80 до 125 Вт. Зрозуміло, що теплова потужність матриці має бути меншою від максимальної холодопродуктивності термоелектричного модуля Пельтьє. В нашому випадку це:

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

При проведенні числового моделювання нами були взяті технічні характеристики серійних модулів охолодження Пельтьє А-ТМ 11.2-127-1.4 HR2. Зокрема, максимальний струм споживання $I_{\max} = 11,2 \text{ А}$, максимальна напруга $U_{\max} = 15,4 \text{ В}$. Найбільша продуктивність холоду ε буде при відсутності різниці температури між спаями $\Delta T = 0$ і при цьому $P_{c, \max} = 108 \text{ Вт}$. При $\varepsilon = 0$ перепад температури складає $T_{\max} = 68 \text{ К}$.

Застосування термоелектричного модуля охолодження вимагає передбачає застосування радіатора (активного або пасивного), який має каналізувати виділення тепла світлодіодної матриці і тепловиділення модуля охолодження. Як видно з літературних джерел, тепловий опір радіаторів оснащених вентилятором знаходиться в інтервалі $\Theta_{ra} = 0,2 - 0,8 \text{ К/Вт}$.

Перспективними для стабілізації теплового режиму потужних світлодіодних матриць можуть стати теплові трубки, які можуть зменшити тепловий опір в кілька разів.

В роботі, шляхом числового комп'ютерного моделювання при допомозі пакета прикладних програм Mathcad були отримані функціональні залежності. Так, на рис. 3.6 зображена функціональна залежність температури активної зони світлодіодів матриці від струму модуля Пельтьє при різних значеннях потужності освітлювача.

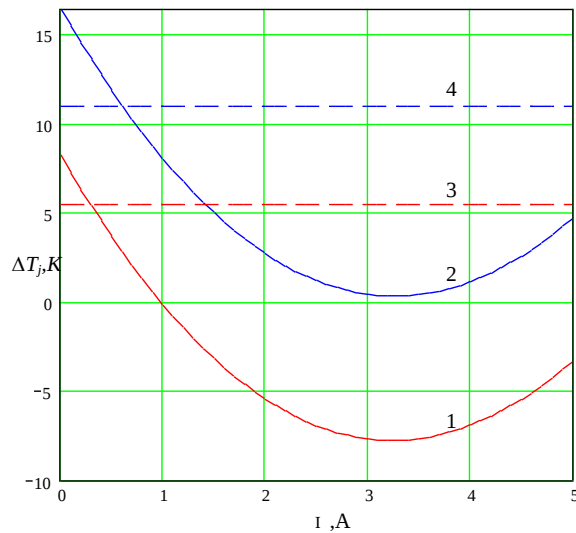


Рис.3.7. Функціональна залежність температури гетеропереходу світлодіода від величини струму термоелектричного модуля при потужності охолодження $Q_c=100\text{ W}$ при параметричній зміні теплового опору Θ_h . Суцільні лінії 1 і 2 відповідно при $\Theta_h=0,2\text{ K/Bm}$ і $\Theta_h=0,6\text{ K/Bm}$. Штрихові - при $\Theta_h=0,2\text{ K/Bm}$ і $\Theta_h=0,6\text{ K/Bm}$ і при відсутності термоелектричного охолодження.

Область функції $\Delta T_j(I)$ в околі мінімуму відповідає за роботу модуля Пельтьє режимі максимальних значень ефективності, при яких досягається мінімум температури активної зони світлодіода. Отже, можна зробити висновок, що при величинах струмів, близьких до оптимальних, термоелектрична система охолодження на базі модуля Пельтьє дає можливість досягти температур нижчих ніж традиційна. На функціональній залежності штриховими лініями нанесені температурні залежності без охолоджувальних модулів, які розраховані за співвідношенням (2.27) при таких же величинах теплового опору.

Функціональна залежність температури гетеропереходу світлодіода від величини струму термоелектричного модуля при різних величинах теплового опору з боку гарячих спаїв представлена на рисунку 3.8.

Очевидно, що із збільшенням теплового опору з боку гарячих спаїв якість охолодження зменшується а екстремуми функції $\Delta T_j(I)$ зміщуються в напрямку

менших струмів. При певних співвідношеннях між потужністю термоелектричного модуля Пельтьє і потужністю напівпровідникового джерела світла може настати момент, коли температура гетеропереходу стане рівною температурі довкілля (а іноді навіть меншою). Це дуже важливо коли джерело світла працює в екстремальних умовах, наприклад, якщо температура довкілля дещо перевищує температуру гетеропереходу.

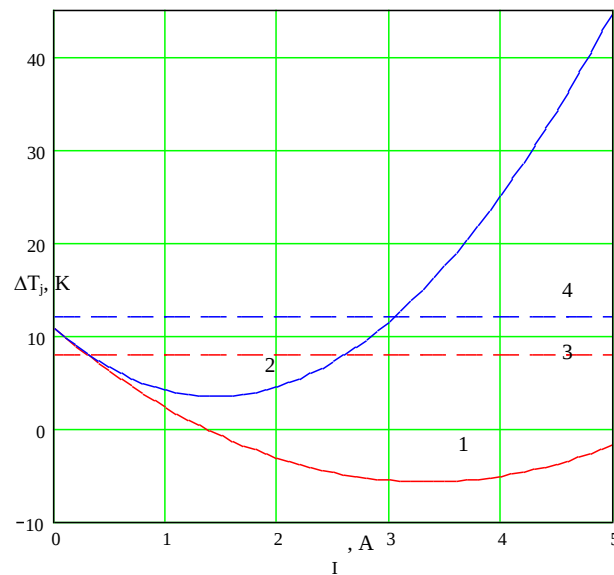


Рис.3.8. Функціональна залежність температури гетеропереходу світлодіода від величини струму термоелектричного модуля при потужності охолодження $Q_c=100 \text{ W}$ при параметричній зміні теплового опору Θ_h . Суцільні лінії 1 і 2 відповідно при $\Theta_h = 0,2 \text{ K/Bm}$ і $\Theta_h = 0,6 \text{ K/Bm}$. Штрихові - при $\Theta_h = 0,2 \text{ K/Bm}$ і $\Theta_h = 0,6 \text{ K/Bm}$ і при відсутності термоелектричного охолодження.

З представленої залежності можна зробити наступні висновки:

- із збільшенням величини струму різниця температур спаями збільшується;
- перепад температур між спаями визначається тепловим навантаженням.
- при зменшенні теплової потужності джерела світла різниця температур між спаями збільшується і навпаки, при збільшенні теплової потужності різниця температур зменшується.

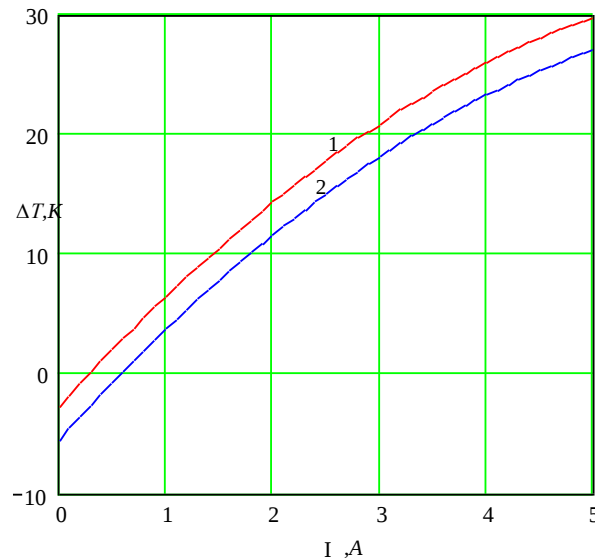


Рис.3.9. Функціональна залежність різниці температур між спаями модуля охолодження від струму при різних потужностях. Крива 1 при $Q_c=100\text{Вт}$, крива 2 при $Q_c=200\text{Вт}$.

Важливим наслідком використання термоелектричних модулів охолодження Пельтьє є можливість керувати температурою гетеропереходу в діапазоні від критично високої до температури рівної або навіть нижчої від температури довкілля. Це дасть змогу суттєво збільшити світловіддачу світлодіодних матриць без зміни конструкції р-п-переходу

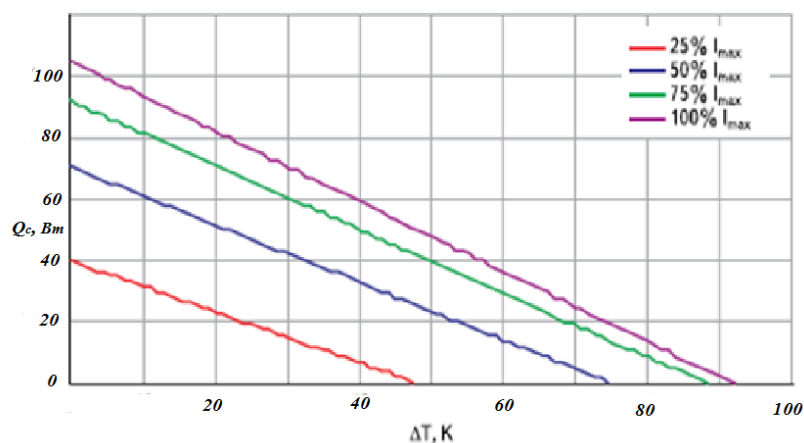


Рис.3.10. Функціональна залежність потужності генерації холоду в залежності від різниці температур між спаями для термоелектричного модуля охолодження АТМ 11.2-127-11.4 HR2.

Із представленої функціональної залежності видно, що максимальна різниця температур між спаями можлива при нульовій генерації холоду $Q_c = 0$. Навпаки, при відсутності різниці температур між спаями генерується найбільша кількість холоду $Q_{\max} = 0$.

Максимальна холодильна потужність модуля Пельтьє $Q_{\max} = 0,6 K/Vm$ залежить лише від висоти термоелектричних елементів і площі поперечного перерізу. В даний час промисловість випускає термоелектричні модулі холодильною потужністю понад $400 Wm$.

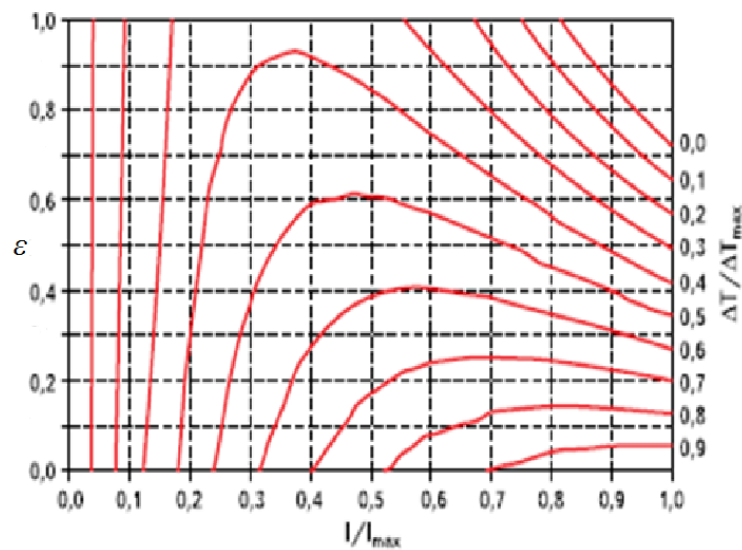


Рис.3.11. Функціональна залежність холодильного коефіцієнта від відносного струму модуля охолодження Пельтьє при різних відносних перепадах температур між спаями.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

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

Підстерігати небезпека у вигляді різних негативних факторів нас може практично скрізь [23-27]. 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 короточасному 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 легеневих 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.

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 десятків 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.

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 неізолювані алюмінієві провідники заборонено.

Таким чином, при дотриманні вимог викладених у ПУЕ-7, щодо улаштування 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 застосування напівпровідникових джерел світла в освітлювальній промисловості є їх економічна ефективність. Світлодіоди споживають майже в шість разів менше електроенергії порівняно з традиційними джерелами світла.

2. Не дивлячись на те, що напівпровідникові джерела світла вважаються холодними, майже 75% споживаної ними нергії перетворюється в теплову. Це приводить до підвищення їх температури і, як наслідок, до зменшення ефективності та світловіддачі.

3. В рамках побудованої математичної моделі системи термостабілізації були виявлені ключові параметри, які найбільше впливають на її тепловий режим.

4. Встановлено, що зменшення загального теплового опору системи охолодження приводить до зменшення температури активної зони матриці.

5. Термоелектрична система охолодження дозволяє значно зменшити, а в деяких випадках навіть повністю ліквідувати тепловий опір системи охолодження.

6. Охолодження напівпровідникових джерел світла термоелементами Пельть'є ефективним і економічно вигідним тільки тоді, коли їх загальна електрична потужність не перевищує 1 кВт. В іншому випадку маса, розмір та вартість системи охолодження значно збільшаться.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Анатичук Л.І. Термоелементи і термоелектричні пристрої. – К.: Наук. думка, 1979. –768 с.
2. Курант Р., Гільберт Д. Методи математичної фізики. Переклад з німецької З.Г. Лібіна, Ю.Л. Рабиновича. Видання 2-е, виправлене. 1951.
3. 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
4. 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.
5. 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.
6. 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).
7. 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).
8. 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.

9. Закордонець В.С. Розрахунок системи охолодження світлодіода на базі теплової труби / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова // Термоелектрика. №4, 2018. — С. 60–67.

10. Закордонець В.С. Розрахунок термоелектричної системи охолодження світлодіодів / В. С. Закордонець, Н. В. Кутузова // Термоелектрика. №5, 2018. — С. 45–54.

11. 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 I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 287-289. — (Секція: Світлотехніка і електроенергетика).

12. 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.

13. Закордонець В. С., Кутузова Н. В., Гридовий В. М.. «Вплив термоелектричного охолодження на ефективність світлодіодних матриць»// Мат. VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Актуальні задачі сучасних технологій», 27-28 листопада 2019., м.Тернопіль. — С.35.

14. Закордонець В.С., Кобаль М.В., Шуба К.Ю. М..Термоелектричний конвертер низькопотенціальної теплової енергії. // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-28 грудня 2024., м.Тернопіль. — С.34.

15. 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.

16. Закордонець В.С., Сисак І.М. Термоелектрична добротність напівпровідникових надграток / В. С. Закордонець, І.М. Сисак // Термоелектрика. №2, 2022. — С. 23–31.

17. Schubert E. F. Light-emitting diodes. – Cambridge, 2006.
18. 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.
19. Lee H. Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells. – New Jersey: Wiley, 2010.
20. Reay D., Kew P., McGlen R. Heat pipes: theory, design and applications. – Oxford: Elsevier, 2014.
21. Faghri A. Heat pipes: review, opportunities and challenges // Frontiers in Heat Pipes. 2014. Vol. 5, Is. 1. P. 1
22. 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.
23. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
24. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. ДНАОП 0.00–1.21–98.
25. 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.
26. Жидецький В. Ц, Джигирей В. С, Мельников О. В. Основи охорони праці. Підручник. — Вид. 5-те, доповнене. — Львів: Афіша, 2000, — 350 с.
27. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.