

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**Сумський державний університет**Класичний фаховий коледж

(повна назва інституту/факультету)

Циклова комісія «Бакалаврат інженерних спеціальностей»

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

(підпис) Денис ВОЛОВИК
(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)
10 травня 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня**бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171 Електроніка ,

(код та назва)

освітньо-професійної програми 171.00.09 Електронні інформаційні системи

(освітньо-професійної / освітньо-наукової (назва програми))

на тему: Енергоефективність світлодіодних джерел випромінюванняЗдобувача групи ЕІск3 -01б Воловика Дениса Ігоровича

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис) Денис ВОЛОВИК
(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник викладач, к.ф.-м.н. Тетяна ГРИЧАНОВСЬКА

(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант¹⁾ _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання Ім'я та ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

АНОТАЦІЯ

Проблема енергоефективності та енергозбереження одна із центральних в сучасній світлотехніці. Індустріально розвинені країни постійно розширюють спектр заходів з енергозбереження і однією з перспективних в цьому напрямку, є сфера освітлення і телекомунікацій. Процес масового впровадження енергозберігаючих світлотехнічних виробів отримав додатковий стимул для розвитку з появою нових джерел світла як світловипромінювальні діоди. Тому, важливим для вивчення є питання енергетичної ефективності світлодіодних джерел випромінювання їх технічних характеристик і параметрів.

Мета дослідження полягає у всебічному і достовірному вивчення будови і характеристик світловипромінювальних діодів, як складових джерел випромінювання у системах зв'язку та їх енергоефективності.

Відповідно до мети, вирішувалися такі задачі:

- з'ясувати з яких матеріалів виготовляються енергоефективні світловипромінювальні діоди і як хімічний склад матеріалу впливає на їх електричні і оптичні характеристики;
- обґрунтувати важливість оптимального вибору світловипромінювальних діодів для бездротових і волоконно-оптичних системах зв'язку;
- розглянути фактори які впливають на енергоефективність світлодіодних джерел випромінювання і запропонувати способи підвищення їх енергоефективності.

При виконанні роботи використовувалися наукові методи аналізу і синтезу теоретичного матеріалу.

У результаті проведених досліджень встановлено, що енергоефективність окремих світловипромінювальних діодів і світловипромінювальних джерел залежить від складу напівпровідникових гетероструктур, а на фізичні параметри в основному впливають сила струму і температура; отже, живлення СВД повинно бути стабілізованим по струму і забезпечувати стабільність температури *p-n*-переходу.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є світловипромінювальні діоди і світлодіодні джерела випромінювання.

Предметом досліджень є напрямки підвищення енергоефективності світловипромінювальних діодів і світлодіодних джерел випромінювання.

Робота може бути корисною при проектуванні і експлуатації світлодіодних джерел випромінювання.

Робота викладена на _33_ сторінці, у тому числі включає _7__ рисунків, _4_ таблиці, список цитованої літератури із _24__ джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СВІТЛОДІОД, СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

ЗМІСТ

ВСТУП	С. 5
РОЗДІЛ 1 СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНІ ДІОДИ	6
1.1. Принцип дії і будова.....	6
1.2. Основні характеристики.....	10
РОЗДІЛ 2 СВІТЛОДІОДИ В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ	19
2.1. Світлодіоди у бездротових системах зв'язку.....	19
2.2. Світлодіоди у волоконно-оптичних системах зв'язку	21
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ	24
3.1. Оцінка енергоефективності.....	24
3.2. Способи підвищення енергоефективності.....	25
ВИСНОВКИ	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31

ВСТУП

Проблема енергоефективності та скорочення споживання електричної енергії одна із центральних в сучасній техніці світловипромінювальних приладів. Так, за статистичними показниками Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), освітлювальні установки споживають 19% виробленої у світі електроенергії. Індустріально розвинені країни постійно розширюють спектр заходів з енергозбереження і однією з перспективних в цьому напрямку, є широка сфера використання світлодіодів. Процес масового впровадження енергозберігаючих світлотехнічних виробів отримав додатковий стимул для розвитку з появою більш ефективних світловипромінювальних діодів [1-5]. Тому, важливим для вивчення є питання енергетичної ефективності світлодіодних джерел випромінювання їх технічних характеристик і параметрів.

На теперішній час досягнуто значних успіхів у створенні технологічно нових білих світлодіодів, здатних випромінювати 303 лм/Вт і здатних працювати до 10⁵ годин [6 - 10]. Потужні сучасні світлодіоди (HP-LED) або (HO-LED) можуть працювати при струмі від сотень мА до понад ампера, порівняно з десятками мА для інших світлодіодів та випромінювати понад тисячу люменів при щільності потужності до 300 Вт/см²[11].

Але, незважаючи на значні досягнення, сучасні питання підвищення енергоефективності світлодіодних джерел випромінювання залишається актуальним. Оскільки, окрім освітлювальних систем, надпотужних та енергоефективних світлодіодних джерел потребують сучасні бездротові і волоконно-оптичні системи передачі інформації [12, 13].

Отже, метою дослідження стало всебічне достовірне вивчення будови і характеристик світловипромінювальних діодів, як складових джерел випромінювання у системах зв'язку та їх енергоефективності.

РОЗДІЛ 1

СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНІ ДІОДИ

Низьке енергоспоживання, низькі витрати на обслуговування та малий розмір світлодіодів призвели до використання їх як індикаторів стану та дисплеїв на різноманітному обладнанні та установках. З розвитком високоефективних і потужних світлодіодів стало можливим використовувати світлодіоди в освітленні. В розвинених державах заохочують перехід на високоефективне світлодіодне освітлення - світлодіодні лампи [1-3].

1.1 Принцип дії і будова

Світлодіод (LED) — це напівпровідниковий пристрій, який випромінює світло під час проходження через нього струму. Електрони в напівпровіднику рекомбінують з електронними дірками, вивільняючи енергію у формі фотонів. Колір світла (що відповідає енергії фотонів) визначається енергією, необхідною електронам для перетину забороненої зони напівпровідника [2]. Біле світло отримують за допомогою кількох напівпровідників або шару світловипромінювального люмінофора на напівпровідниковому пристрої [3].

Світлодіоди виробляють світло (або інфрачервоне випромінювання) шляхом рекомбінації електронів і електронних дірок у напівпровіднику і цей процес називається «електролюмінесценцією». Довжина хвилі виробленого світла залежить від ширини забороненої зони використовуваних напівпровідників. Оскільки ці матеріали мають високий показник заломлення (тобто схильні до внутрішнього відбиття і фактично не випромінюють світло назовні), конструктивні особливості пристроїв, такі як спеціальні оптичні покриття та форма матриці, необхідні для ефективного випромінювання світла. Світлодіод є довговічним джерелом світла, але певні механізми можуть спричинити повільну втрату ефективності пристрою або раптовий вихід з ладу. Довжина хвилі випромінюваного світла є функцією забороненої зони використовуваного напівпровідникового матеріалу; такі матеріали,

як арсенід галію та інші, з різними легуючими елементами, використовуються для отримання різних кольорів світла. Інший тип світлодіодів використовує квантову точку, властивості та довжину хвилі якої можна регулювати відповідно до розміру. Світлодіоди широко використовуються в функціях індикаторів і дисплеїв, а білі світлодіоди витісняють інші технології загального освітлення.

У фізиці напівпровідників ширина забороненої зони напівпровідника може бути двох основних типів: пряма або непряма заборонена зона. Кожен стан мінімальної енергії в зоні провідності та стан максимальної енергії у валентній зоні характеризуються певним кристалічним імпульсом ($p = \hbar k$ -квазіімпульс) у зоні Бріллюена. Якщо k -вектори різні, матеріал має «непряму заборонену зону». Заборонена зона називається «прямою», якщо кристалічний імпульс електронів і дірок однаковий як у зоні провідності, так і у валентній зоні; електрон може безпосередньо випромінювати фотон [4]. У «непрямому» випадку фотон не може випромінюватися, оскільки електрон повинен пройти через проміжний стан і передати імпульс кристалічній решітці. На рисунку 1.1., а показано, що електрон не може переходити зі стану з найвищою енергією у валентній зоні (червона лінія) до стану з найнижчою енергією в зоні провідності (зелена лінія) без зміни імпульс. Тут майже вся енергія походить від фотона (вертикальна стрілка), тоді як майже весь імпульс походить від фонона (горизонтальна стрілка).

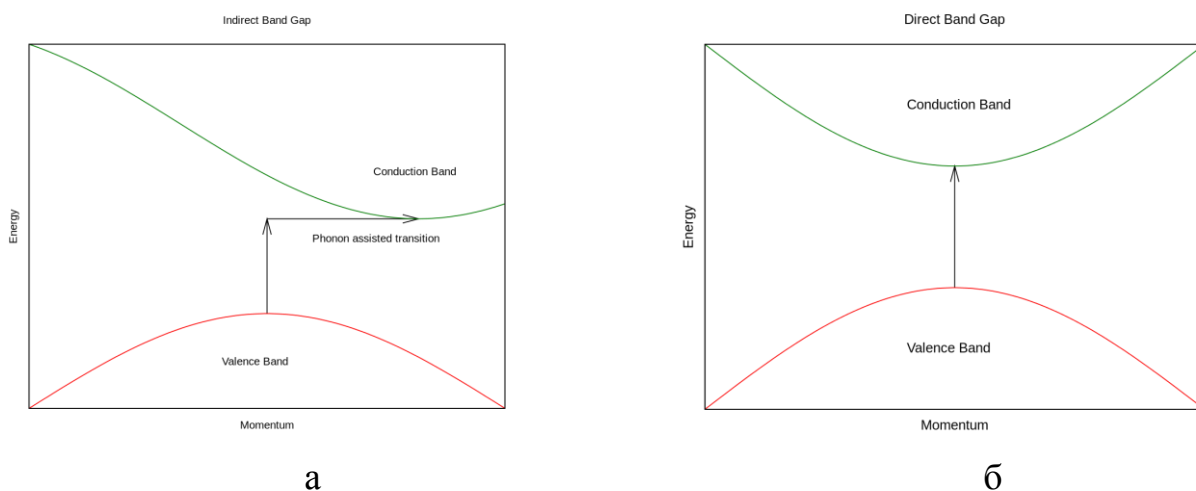


Рис. 1.1. Залежність енергії від імпульсу для кристала напівпровідника з непрямою (а) і прямою забороненою зоною (б) [4]

На рисунку 1.1., б показано, що електрон може переходити зі стану з найвищою енергією у валентній зоні до стану з найнижчою енергією в зоні провідності без зміни кристалічного імпульсу.

Виходячи з переліченого вище, зрозуміло, що світловипромінювальні та лазерні діоди майже завжди виготовляються з матеріалів із прямою забороненою зоною, а не з непрямою забороненою зоною, як у кремнію чи германію.

У будь-якому напівпровідниковому матеріалі з прямою забороненою зоною р-n-перехід випромінює світло, коли через нього протікає електричний струм. Це явище називається електролюмінесценцією. Електрони переходять із n-області та рекомбінують з дірками, що існують у р-області (рис.1.2). Вільні електрони знаходяться в зоні провідності енергетичних рівнів, а дірки - у валентній енергетичній зоні. Таким чином, рівень енергії дірок нижчий, ніж рівень енергії електронів. Деяка частина енергії повинна бути розсіяна для рекомбінації електронів і дірок. Ця енергія випромінюється у вигляді тепла і світла [5].

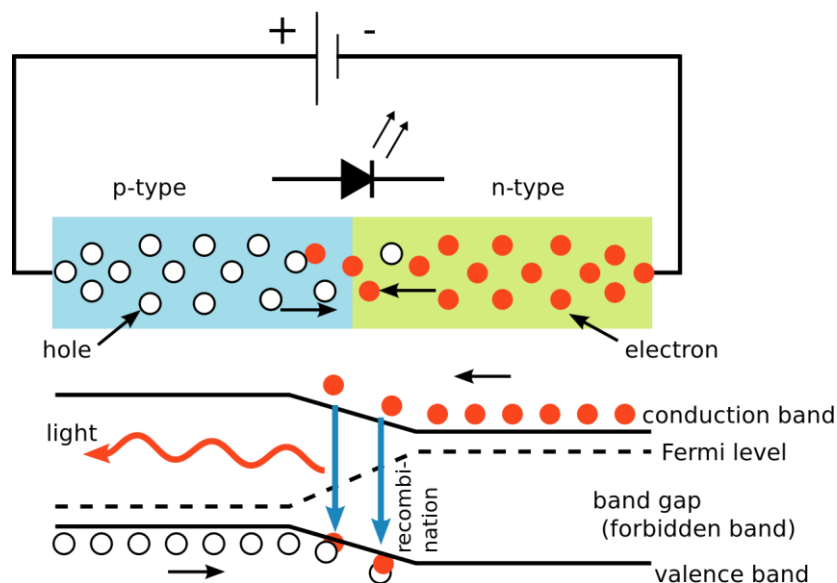


Рис. 1.2. Фізичні основи роботи світловипромінюючого діода: схематичне зображення (вгорі) і енергетична діаграма (внизу) [5]

Електрони розсіюють енергію у вигляді тепла в кристалічних кремнієвих і германієвих діодах, як у матеріалах з непрямою забороненою зоною, але в напівпровідниках з прямою забороненою зоною, таких як фосфід арсеніду галію (GaAsP) чи фосфід галію (GaP) електрони розсіюють енергію, випромінюючи фотони.

Якщо напівпровідник напівпрозорий, то р-n-перехід стає джерелом світла, а діод стає світловипромінювальним діодом (СВД).

Довжина хвилі випромінюваного світла, а отже, його колір залежать від ширини забороненої зони матеріалів, що утворюють р-n-перехід. Матеріали, що використовуються для світлодіодів, мають пряму заборонену зону з енергією, що відповідає ближньому інфрачервоному, видимому або ближньому ультрафіолетовому діапазону випромінювання.

Розробка світлодіодів почалася з інфрачервоних і червоних пристроїв, виготовлених з арсеніду галію, але досягнення в матеріалознавстві дозволили створювати пристрої з дедалі коротшими довжинами хвиль, які випромінюють світло різноманітних кольорів. Зорові відчуття у людських очах викликає електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі десь від 400 до 760 нм з енергією квантів відповідно в діапазоні 1,8 - 2,8 еВ. Отже, для створення видимого випромінювання потрібні широкозонних напівпровідників з шириною забороненої зони (E_g) теж в діапазоні більше 1,8 еВ.

Світлодіоди зазвичай побудовані на підкладці n-типу, з електродом, прикріпленим до шару р-типу, нанесеного на його поверхню. Субстрати р-типу, хоча й менш поширені, також зустрічаються. Багато комерційних світлодіодів, особливо GaN/InGaN, також використовують сапфірові підкладки.

Незважаючи на те, що біле світло можна створити за допомогою окремих червоних, зелених і синіх світлодіодів, це призводить до поганої передачі кольору, оскільки випромінюються лише три вузькі смуги довжин хвиль світла. Відразу за досягненням високої ефективності синіх світлодіодів швидко з'явилась розробка першого білого світлодіода. У цьому пристрої $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ (відомому як «YAG») люмінофорне покриття, леговане церієм, створює жовте світло через флуоресценцію. Поєднання цього жовтого з рештою синього світла сприймається очима білим. Використання різних люмінофорів створює зелене та червоне світло через флуоресценцію.

У 2014 році було продемонстровано, що експериментальні білі світлодіоди виробляють 303 люмен на ват електроенергії (лм/Вт); деякі можуть працювати до 10^5

годин [6 - 8]. Світлодіодний чіп інкапсульовано всередині невеликої пластикової білої форми, хоча іноді світлодіодний корпус може включати відбивач. Він може бути інкапсульований за допомогою смоли (на основі поліуретану), силікону або епоксидної смоли, що містить (порошкоподібні) частинки люмінофору YAG, леговані церієм [9]. Необхідно ретельно контролювати в'язкість фосфорно-кремнієвих сумішей [9]. Після нанесення фосфорно-кремнієвої суміші на світлодіод за допомогою таких методів, як струменеве дозування, світлодіоди тестують і розміщують на стрічках для SMT для подальшого використання в світлодіодних джерелах випромінювання. Люмінофор Ce:YAG та епоксидна смола в світлодіодах [100] можуть руйнуватися під час використання, вихідний сигнал світлодіодів може змінитися на жовтий з часом через деградацію матеріалів [10]. Існує кілька варіантів Ce:YAG, і виробники в багатьох випадках не розкривають точний склад своїх пропозицій Ce:YAG. [10]

Потужні світлодіоди (HP-LED) або потужні світлодіоди (HO-LED) можуть працювати при струмі від сотень мА до понад ампера, порівняно з десятками мА для інших світлодіодів. Деякі можуть випромінювати понад тисячу люменів. [11] Було досягнуто щільності потужності світлодіодів до 300 Вт/см^2 . Оскільки перегрів є руйнівним, світлодіоди HP повинні бути встановлені на радіаторі, щоб забезпечити розсіювання тепла. Якщо тепло від HP-LED не відводиться, пристрій виходить з ладу за лічені секунди. Один HP-LED часто може замінити лампу розжарювання в ліхтарику або встановити в масив для створення потужної світлодіодної лампи.

Деякі добре відомі світлодіоди HP у цій категорії — серія Nichia 19, Lumileds Rebel Led, Osram Opto Semiconductors Golden Dragon і Cree X-lamp станом на зараз перевищують 105 лм/Вт [11].

1.2. Основні характеристики

Світловипромінювальні діоди мають дві групи характеристик, це електричні і оптичні, які тісно пов'язані між собою [12, 13]. До основних характеристик СВД можна віднести вольт-амперну характеристику, розподіл носіїв в гомогенних і гетеро-

Таблиця 1.1.

Основні параметри джерел випромінювання на основі СВД [12]


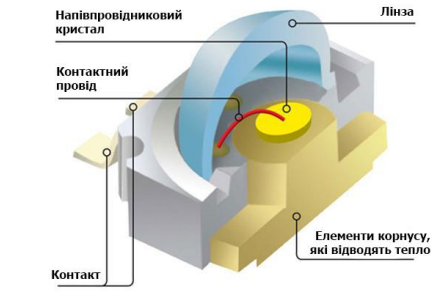
Параметр	Опис
Сила струму	Однокристалльні - 200 мА, багатокристалльні використовують вищий струм. Нестійкість у джерелі живлення може негативно вплинути на яскравість і довговічність світіння, а збільшення струму також змінить колірну температуру і відтінок світла.
Напруга	Напруга елемента залежить від його матеріалу та кольору. Таким чином, за напругою можна визначити його колір, а за кольором - приблизне значення напруги. Білий - 2.7-4.3В Червоний - 1.5-2.6В Інфрачервоний - 1.1-1.6В Помаранчевий - 1.7-2.8В Блакитний - 3.2-4.5В Жовтий - 1.7-2.5В Зелений - 1.7-4В
Потужність	Вимірюється в міліватах. Для розрахунку необхідної потужності LED лампочки замість лампи розжарювання необхідно розділити потужність останньої на 8.
Світловий потік	Світло, що випромінюється світлодіодами, розсіюється під кутом від 100 до 120 градусів. Для поліпшення точності фокусування світла можна використовувати купольні лінзи
Колірна температура	Комфортність сприйняття штучного світла від світлодіодного освітлення залежить від його колірної температури. Тепле світло (2700-3500К) Нейтральне/денне світло (3500-5000К) Холодне світло (понад 5000К)
Габарити	Від декількох мкм до мм

генних *p-n*-переходах, внутрішній і зовнішній квантовий вихід випромінювання, коефіцієнт корисної дії (ККД), спектр випромінювання, кут виводу випромінювання, просторове розподілення випромінювання, температурна залежність інтенсивності випромінювання та інші. При описі характеристик приладів на основі СВД, зазвичай вказують ряд параметрів, важливих для безперебійного функціонування [12, 13]

Світлодіоди постійно вдосконалюються, стають більш універсальними і забезпечують більш ефективне споживання електроенергії (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2.

Порівняння світлодіодних джерел випромінювання

Тип технології [12]	COB	SMD
Будова [14]	<p>Будова COB-світлодіода (Chip On Board)</p>  <p>Кристали випромінюючих діодів Люмінофорне покриття Пластиковая або керамічна основа</p>	<p>Будова SMD-світлодіода (Surface Mount Device)</p>  <p>Напівпровідниковий кристал Лізна Контактний провід Контакт Елементи корпусу, які відводять тепло</p>
Переваги [13]	Тривалий термін служби (до 50 000 годин), рівномірність світіння, висока передача кольору	Простий в обслуговуванні та заміні, доступна ціна, висока яскравість, надійність, висока яскравість
Недоліки [13]	Нездатність ремонту та заміни окремих діодів, висока вартість	Відсутність виявлених недоліків
Енергоефективність [12]	вище 80 лм/Вт	від 50 до 110 лм/Вт

Різні моделі світлодіодних джерел випромінювання користуються все більшою популярністю в порівнянні з традиційними. Вони можуть працювати приблизно в 25 разів довше при меншому споживанні енергії. Світлодіодні лампи з використанням технології COB (Chip on Board) та SMD (Surface Mounted Device) відрізняються своїми характеристиками. Серед найпоширеніших варіантів можна виділити такі SMD-світлодіоди - це яскраві елементи з поверхневим монтажем, протилежність стандартним DIP-світлодіодам. Їх використовують у світлодіодній продукції для освітлення та підсвічування, як-от світлодіодні стрічки, надаючи широкий спектр кольорів і можливість створення монохромних або багатоколірних (RGB) моделей. Дешифрування маркування SMD-світлодіодів відіграє ключову роль, надаючи користувачеві цінну інформацію про характеристики продукту. Наприклад, якщо розглядати світлодіод із маркуванням SMD 2835 UWC 5, розшифровка буде такою: це світлодіод типорозміру 2835 за розмірами 2,8×3,5 мм, які мають потужність 0,5 Вт та світяться білим кольором (таблиця 1.3).

COB-світлодіоди - нова технологія з високою щільністю кристалів, що утворюють компакту матрицю на загальній підкладці. Вони забезпечують більш інтенсивне та однорідне випромінювання світлового потоку, ніж SMD-технологія.

Таблиця 1.3.

Характеристики основних типів SMD джерел випромінювання [12, 13]

Тип SMD	Сила струму, мА	Розміри, мм	Споживає потужність, W	Світловий потік, Lm	Кристалів у компоненті
2835	60/150/300	2.8x3.5x0.8	0.2/0.5/1	20/50/100	1
3014	30	3x1.4x0.75	0.1- 0.12	9-13	1
3528	20	3.5x2.8x1.4	0.02 - 0.06	5-7	1
5050	60/80	5x5x1.6	0.02	18-20	3/4
5630	150	5.6x3x0.75	0.2-0.4	58	1
5730	150/300	5.7x3x0.75	0.5/1	50/158	1/2

Вольт-амперна характеристика світлодіода представлена на рис.1.3. Світлодіод починає випромінювати світло, коли в прямому напрямку подається більше 2-3 вольт. Область зворотного зміщення використовує інший вертикальний масштаб, ніж область прямого зсуву, щоб показати, що струм витоку є майже постійним із напругою, доки не відбудеться пробій. У прямому зміщенні струм спочатку невеликий, але експоненціально зростає з напругою.

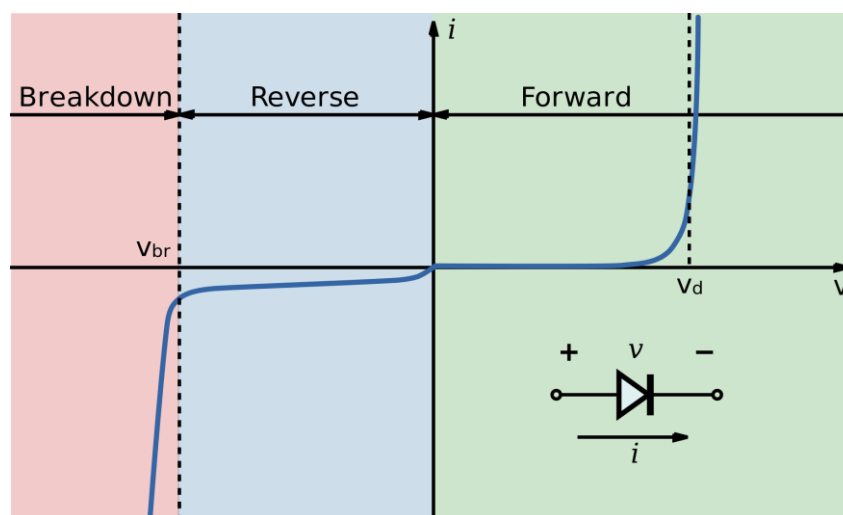


Рис.1.3. Вольт-амперна характеристика світловипромінювального діода [5]

Основною фізичною величиною, що характеризує якість СВД, є зовнішній квантовий вихід η_3 — відношення кількості випромінених фотонів, які вийшли з СВД Φ_B , до повної кількості дірок та електронів, які проходять через p - n -перехід, тобто $N_p + N_n$

$$\eta_3 = \Phi_B / (N_p + N_n). \quad (1.1)$$

Якщо прийняти, що величини Φ_B і $N_p + N_n$ вимірюються за одиницю часу, то сила струму через СВД дорівнює

$$I = e(N_p + N_n). \quad (1.2)$$

Тоді потужність випромінюваного СВД світла визначається як

$$P_{\text{випр}} = \Phi_B h\nu = \eta_3 \cdot (N_p + N_n) \cdot h\nu = \eta_3 \cdot (I/e) \cdot h\nu = I \eta_3 \cdot h\nu/e. \quad (1.3)$$

У співвідношенні (1.3) та далі h і e – константи.

Максимальна гранична частота роботи світлодіода визначається найчастіше часом життя інжектованих в p -базу електронів τ_n :

$$f_{\text{max}} = 1/2\pi \tau_n. \quad (1.4)$$

Наприклад, якщо для виготовлення СВД пропонуються потрібного напівпровідникового з'єднання $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ з шириною забороненої зони E_g якого залежить від параметрів складу:

$$E_g = (0,56 + 1,08x) \quad (1.5)$$

Це дозволяє визначити параметр x у формулі хімічного складу напівпровідника, де E_g визначається з умови потрібної довжина хвилі випромінювання:

$$\lambda = hc/E_g, \quad (1.6)$$

Довжина хвилі пов'язана з енергією фотона $h\nu$ співвідношенням (ν – частота світла):

$$\lambda = hc/h\nu, \quad (1.7)$$

Смуга випромінювання в енергетичних одиницях визначається як інтервал енергій випромінюваних фотонів, квантова інтенсивність яких більше за половину максимальної квантової інтенсивності - $(E_g - \Delta(h\nu)/2; E_g + \Delta(h\nu)/2)$, де $\Delta(h\nu)$ – півширина смуги випромінювання в енергетичних одиницях.

Враховуючи, що енергія випромінюваних фотонів $h\nu$ набагато більша за різницю енергій у смугі випромінювання $d(h\nu)$, можна продиференціювати співвідношення (1.7):

$$d\lambda/(d h\nu) = \lambda^2/hc , \quad (1.8)$$

Замінюючи знак диференціалу d на знак інтервалу Δ , дістаємо співвідношення для півширини смуги випромінювання в одиницях довжини хвилі (півширина спектру)

$$\Delta\lambda = \lambda^2 \cdot \Delta(h\nu)/hc . \quad (1.9)$$

Тоді смуга випромінювання в одиницях довжини хвилі враховується як інтервал $(\lambda - \Delta\lambda/2; \lambda + \Delta\lambda/2)$.

Смугу випромінювання в одиницях частоти можна отримати, обчисливши частоту випромінювання із співвідношення (1.7), а півширину спектру в одиницях частоти – із (1.9):

$$\Delta\nu = c \Delta\lambda / \lambda^2. \quad (1.10)$$

Основною фізичною величиною, що характеризує якість СВД, є зовнішній квантовий вихід η_3 – відношення кількості випромінених фотонів, які вийшли з СВД Φ_B , до повної кількості дірок та електронів, які проходять через р-п-перехід $N_p + N_n$:

$$\eta_3 = \Phi_B / (N_p + N_n). \quad (1.11)$$

Якщо прийняти, що величини Φ_B і $N_p + N_n$ вимірюються за одиницю часу, то сила струму через СВД дорівнює:

$$I = e(N_p + N_n). \quad (1.12)$$

Потужність випромінюваного СВД визначається як

$$P_{\text{випр}} = \Phi_B h\nu = \eta_3 \cdot (N_p + N_n) \cdot h\nu = \eta_3 \cdot (I/e) \cdot h\nu = I \cdot \eta_3 \cdot h\nu/e. \quad (1.13)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) світлодіода визначається за співвідношенням:

$$\eta = P/(I \cdot V), \quad (1.14)$$

де P - потужність оптичного випромінювання, що вийшло за межі світлодіода, добуток $I \cdot V$ - електрична потужність підведена до світлодіода.

Основними оптичними характеристиками світловипромінювальних діодів є яскравісна і спектральна характеристики.

Яскравісна характеристика показує, як яскравість світіння світлодіода залежить від прямого струму, що протікає через СВД (рис.1.4).

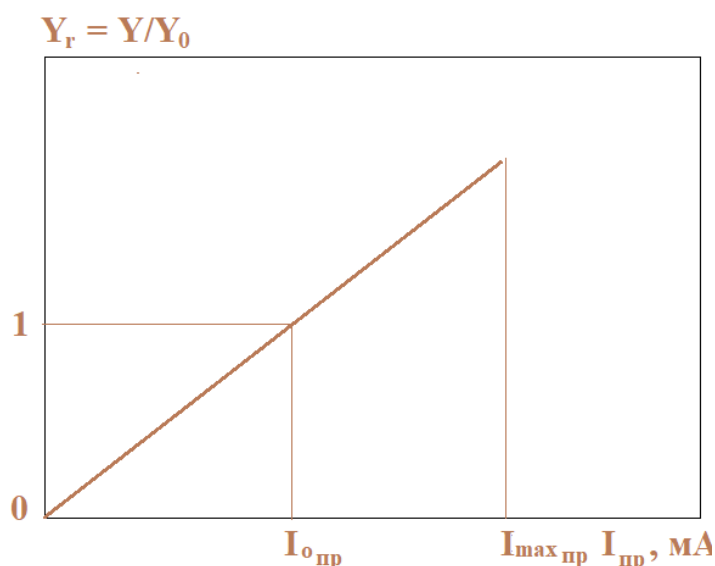


Рис.1.4. Яскравісна характеристика світловипромінювального діода

Яскравісна характеристика світлодіода має лінійний характер і графіком залежності є пряма лінія. Графік ілюструє залежність відносної яскравості світлодіода (Y_r) від величини прямого струму, що протікає через нього ($I_{\text{пр}}$). Відносна

яскравості (Y_r) дорівнює відношенню яскравості при конкретному струмі (Y) до яскравості при струмі «вмикання» світлодіода (I_0 пр), який становить для більшості СВД величину десь 20 мА. Наприклад, якщо через світлодіод протікає прямий струм рівний I_0 пр \approx 20 мА, то відносна яскравість рівна одиниці $Y_r=1$. Якщо прямий струм буде менше $I_{пр} < I_0$ пр, то відносна яскравість буде менше одиниці $Y_r < 1$. Прямий струм через світлодіод не повинен перевищувати максимально допустиме значення, найчастіше це 30-40 мА. Регулюючи струм через світлодіод, можна регулювати його яскравість в допустимих межах.

Важливою оптичною характеристикою світлодіода є його спектральна характеристика, тобто спектр випромінювання конкретного світлодіода. Світлодіод випромінює цілу смугу електромагнітних хвиль, а дана характеристика показує залежність відносної яскравості (або інтенсивності) випромінювання від довжини хвилі (рис. 1.5).

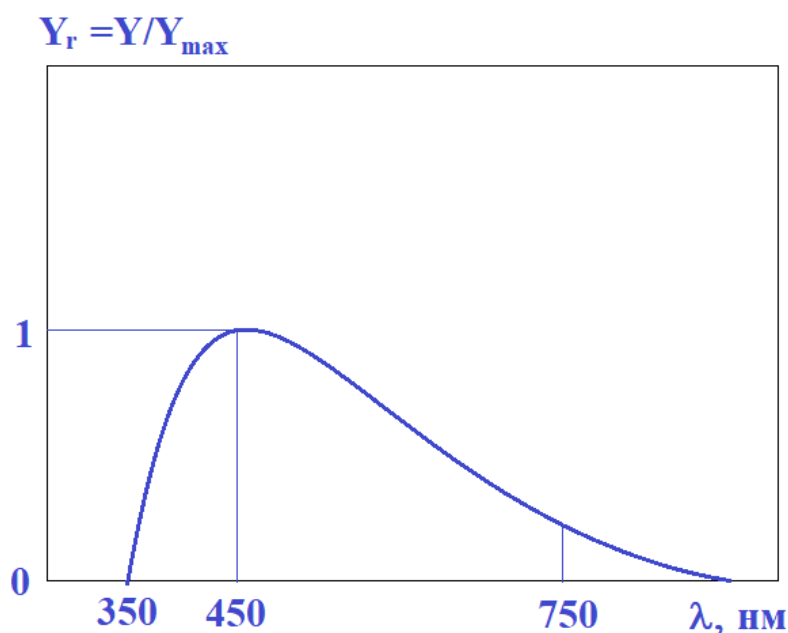


Рис.1.5. Спектральна характеристика світлодіода

Незважаючи на те, що ширина смуги випромінювання світлодіода може бути відносно великою, кожен тип світлодіодів має характерну довжину хвилі, що відповідає максимуму відносної яскравості. Ця довжина хвилі (відповідна частота) визначає колір випромінювання світлодіода.

РОЗДІЛ II

СВІТЛОДІОДИ В СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

Світлодіоди виготовляються в різних упаковках для різних застосувань. Один або кілька світлодіодних переходів можуть бути упаковані в один мініатюрний пристрій для використання в якості індикатора або контрольної лампи. Світлодіодна матриця може включати схеми керування в одному пакеті, який може варіюватися від простого резистора, керування миганням або зміною кольору або адресного контролера для пристроїв RGB. Пристрої з білим випромінюванням більшої потужності будуть встановлені на радіаторах і використовуватимуться для підсвічування. Буквено-цифрові дисплеї в матричному або стовпчастому форматах широко доступні. Спеціальні пакети дозволяють підключати світлодіоди до оптичних волокон для високошвидкісних каналів передачі даних.

2.1. Світлодіоди в бездротових системах зв'язку

Світлодіоди можуть використовуватися як у бездротових, так і у волоконно-оптичних системах зв'язку. Бездротові системи зв'язку - це системи дистанційного керування побутовими приладами - телевізорами та музичними центрами, а також засоби зв'язку комп'ютерів із периферійними пристроями. Світлодіоди, що застосовуються у волоконно-оптичних системах зв'язку, повинні забезпечувати передачу даних на відстані до кількох кілометрів зі швидкостями, часто перевищують рівень 1 Гбіт/с. Практично всі оптичні волокна, що використовуються спільно зі світлодіодами, є багатомодовими (зі ступінчастим або градієнтним профілем показника заломлення). Однак іноді застосовуються і одномодові волокна [13].

Світлодіоди, що використовуються в бездротових системах зв'язку, як правило, складаються з активних областей GaAs або InGaAs, вирощених на підкладках GaAs. Шари InGaAs псевдоморфні, тобто достатньо тонкі, випромінюють когерентне світло, вони не мають дислокацій. Довжини хвиль випромінювання світлодіодів GaAs та InGaAs обмежені ІЧ-діапазоном довжин хвиль від 870 нм (для активних областей

GaAs) до 950 нм (для активних областей InGaAs). Світлодіоди, що випромінюють світло в ІЧ-діапазоні довжин хвиль, добре підходять для роботи в бездротових системах зв'язку, оскільки їх світло невидиме для людського ока. Оскільки системи дистанційного керування, як правило, забезпечують передачу сигналів відстані менше 100 м, то вважається, що середовище передачі (повітря) немає ні дисперсії, ні втрат.

Для світлодіодів, що працюють у бездротових системах зв'язку, важливою характеристикою є повна потужність випромінювання, тому внутрішній квантовий вихід випромінювання та коефіцієнт оптичного виведення світлодіодів повинні бути якнайбільше. Інший важливий параметр світлодіодів - просторовий розподіл чи діаграма спрямованості випромінювання, яка має бути досить широкою для полегшення зв'язку випромінювача з приймачем.

Дослідники досягли значно більших відстаней, використовуючи некогерентні джерела світла від світлодіодів високої інтенсивності. У 2007 році вперше було повідомлено про передачу сигналу на 278 км (173 милі) [15]. Однак фізичні обмеження обладнання використовували обмежену смугу частот приблизно до 4 кГц. Висока чутливість, необхідна від детектора для покриття таких відстаней, зробила внутрішню ємність фотодіода домінуючим фактором у високоімпедансному підсилювачі, який слідував за ним, таким чином природним чином утворюючи фільтр низьких частот із частотою зрізу 4 кГц. Лазери можуть досягати дуже високих швидкостей передачі даних, які можна порівняти з оптоволоконним зв'язком.

Прогнозовані швидкості передачі даних і вимоги щодо майбутніх передачі даних відрізняються. Недорогий білий світлодіод (GaN-люмінофор) , який можна використовувати для освітлення простору, зазвичай можна модулювати до 20 МГц [16]. Швидкість передачі даних понад 100 Мбіт/с може бути легко досягнута за допомогою ефективних схем модуляції , а компанія Siemens стверджувала, що досягла понад 500 Мбіт/с у 2010 році [17] . Дослідження, опубліковане в 2009 році, використовувало подібну систему для керування автомобільним трафіком за допомогою автоматизованих систем і зі світлодіодними світлофорами. [18, 19].

У вересні 2013 року pure LiFi, єдинбурзький стартап, який працює над Li-Fi, також продемонстрував високошвидкісне з'єднання «точка-точка» за допомогою будь-якої готової світлодіодної лампочки. У попередній роботі для досягнення високої швидкості передачі даних використовувалися спеціальні світлодіоди з високою пропускну здатністю. Нова система, Li-1st, максимізує доступну оптичну смугу пропускання для будь-якого світлодіодного пристрою, тим самим знижуючи вартість і покращуючи продуктивність розгортання внутрішніх систем FSO. [19]

2.2. Світлодіоди у волоконно-оптичних системах зв'язку

Світлодіоди застосовуються в системах волоконно-оптичного зв'язку, передають дані на порівняно короткі відстані з низькими та середніми швидкостями. Оскільки час життя спонтанного випромінювання в сильно збуджених напівпровідниках становить ~ 1 нс, максимально досяжні швидкості передачі даних у системах зі світлодіодами обмежені значенням 1 Гбіт/с. Тому в волоконно-оптичних системах на основі світлодіодів не можна передавати дані зі швидкістю кілька Гбіт/с. Проте швидкості передачі в кілька сотень Мбіт/с повністю задовольняють вимогам більшості систем локального зв'язку [13].

Світлодіоди, що застосовуються у волоконно-оптичних системах, сильно відрізняються від освітлювальних світлодіодів. У світлодіодів для систем зв'язку важливим параметром є ефективність введення випромінювання в оптичне волокно. Тут корисним вважається випромінювання, що виходить лише від однієї поверхні кристала світлодіода, що межує із оптичним волокном. Тому в світлодіодах, призначених для роботи у волоконно-оптичних системах, прагнуть отримати максимальне випромінювання з боку цієї поверхні. Очевидно, що для таких світлодіодів важливою характеристикою є потужність випромінювання одиниці поверхні, тоді як для світлодіодів у бездротових системах визначальним параметром вважається повна потужність випромінювання світлодіодів.

Щоб отримати максимальну ефективність введення випромінювання світлодіода в оптичне волокно, область випромінювання світлодіодів має бути

набагато менше діаметра серцевини волокна. Для роботи з багатомодовими волокнами, зазвичай, використовують світлодіоди з круговими областями випромінювання діаметром 20-50 мкм. Діаметр серцевини багатомодових кварцових волокон зазвичай дорівнює 50-100 мкм [13].

Полімерні світловоди можуть мати діаметри більше 1 мм, тому для роботи з ними можуть застосовуватися світлодіоди з більшою областю випромінювання.

Світлодіодна передача світла є малоефективною, лише близько 1% вхідної потужності, або близько 100 мікват, врешті перетворюється на випущену потужність, з'єднану з оптичним волокном. Тому були розроблені світлодіоди, які використовують кілька квантових ям для випромінювання світла на різних довжинах хвиль у широкому спектрі, і в даний час використовуються для програм локального мультиплексування за довжиною хвилі (WDM), а також суперлюмінесцентні діоди.

Суперлюмінесцентний діод (SLED або SLD) — це напівпровідникове джерело світла, що дає випромінювання, засноване на суперлюмінесценції . Він поєднує в собі високу потужність і яскравість лазерних діодів з низькою когерентністю звичайних світлодіодів. Його оптична смуга випромінювання, також описана як повна ширина на половині максимуму, може коливатися від 5 до 750 нм [20].

Суперлюмінесцентний світловипромінювальний діод, подібно до лазерного діода, заснований на електрично керованому р-п-переході, який, коли зміщений у прямому напрямку, стає оптично активним і генерує посилене спонтанне випромінювання в широкому діапазоні довжин хвиль. Пікова довжина хвилі та інтенсивність SLED залежать від складу активного матеріалу та рівня струму інжекції. SLED розроблені таким чином, щоб мати високе однопрохідне підсилення для спонтанного випромінювання, що генерується вздовж хвилеводу, але, на відміну від лазерних діодів, недостатній зворотний зв'язок для досягнення лазерної дії. Це дуже успішно досягається завдяки спільній дії нахиленого хвилеводу та граней з покриттям проти відблиску (ARC).

Коли подається пряма електрична напруга, генерується струм інжекції в активній області SLED. Як і більшість напівпровідникових приладів, SLED складається з позитивної (р-легованої) секції та негативної (п-легованої) секції.

Електричний струм буде протікати від р-секції до n-секції та через активну область, яка затиснута між р- і n-секціями. Під час цього процесу світло генерується через спонтанну та випадкову рекомбінацію позитивних (дірки) і негативних (електрони) носіїв електричного струму, а потім посилюється під час руху по хвилеводу SLED. Р-n-перехід напівпровідникового матеріалу SLED розроблений таким чином, що електрони та дірки мають безліч можливих станів (енергетичних зон) з різними енергіями. Таким чином, рекомбінація електронів і дірок генерує світло з широким діапазоном оптичних частот, тобто широкосмугове світло.

Вихідна потужність ідеального SLED може бути описана простою моделлю, не враховуючи спектральні ефекти та враховуючи як однорідний розподіл густини носіїв, так і нульові відбиття від граней.

$$P_{out} = (h/c) \cdot v \cdot \Pi \cdot R_{sp} \cdot (\exp((g - \alpha) \cdot L) - 1) / (g - \alpha) \quad (2.1)$$

де h — постійна Планка, v — оптична частота, Π — розмір оптичної моди, R_{sp} — швидкість спонтанного випромінювання в напрямлену моду, g — модальне підсилення, α — нерезонансні оптичні втрати, L — довжина активного діапазону, і c — швидкість світла у вакуумі.

Отже, вихідна потужність лінійно залежить від швидкості спонтанного випромінювання та експоненціально від оптичного посилення. Очевидно, що для отримання високої оптичної вихідної потужності необхідний високий модальний коефіцієнт посилення.

Загальна оптична потужність, випромінювана SLED, залежить від струму. На відміну від лазерних діодів, інтенсивність випромінювання не має різкого порогу, але вона поступово зростає зі струмом.

Максимальне значення струму, що забезпечує безпечну роботу пристрою, залежить від моделі і становить від 70 мА (для SLED малої потужності) до 500 мА для найпотужніших пристроїв.

РОЗДІЛ III

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

2.1. Оцінка енергоефективності

При виготовленні і експлуатації джерел випромінювання важливо заздалегідь визначати витрати матеріалів, електроенергії і брати до уваги їх енергетичну ефективність. Ефективність джерела випромінювання залежить від ряду факторів - енергетичної ефективності (світлової віддачі), терміну експлуатації, світлотехнічних параметрів стабільності параметрів, світлотехнічних параметрів та інше. Важливими також є вартість конструкції, монтажних робіт, обслуговування. А ще, особливу увагу приділяти мінімальному енергоспоживанню.

В роботі [15] зазначається, що енергетична ефективність ε джерела випромінювання (опромінюючої установки) визначається співвідношенням

$$\varepsilon = Q_e / Q_y = q_e / q_y, \quad (3.1)$$

де Q_e – ефективне значення енергії, яку випромінює джерело, Q_y - енергія, яку споживають джерела випромінювання всієї установки, q_e , q_y – відповідно, питомі значення енергії джерел випромінювання, яка припадає на одиницю площі опромінюваної поверхні.

Якщо потужність та продуктивність установки не змінюється з часом, то її ефективність можна виразити як відношення потужностей:

$$\varepsilon = N_e / N_y, \quad (3.2)$$

де N_e – ефективне значення потужності джерела чи установки; N_y – повна потужність джерела чи установки. З іншого боку, ефективне значення потужності установки N_e чисельно дорівнює ефективному потоку випромінювання, що дозволяє рівняння (3.2) записати у вигляді:

$$\varepsilon = \Phi_e / N_y, \quad (3.3)$$

де Φ_e – ефективний потік випромінювання, який попадає на робочу поверхню приймача.

Отже, підвищення енергетичної ефективності джерел випромінювання прямо пов'язане із зниженням енергозатрат на їх експлуатацію, заходами по підборі оптимального робочого режиму, підвищенню термінів їх експлуатації, що може гарантувати зменшення терміну окупності.

Оскільки основним конструктивним елементом світлодіодних джерел випромінювання є різні типи світловипромінювальних діодів, то в першу чергу постає питання підвищення ккд системи живлення, температурної стабілізації параметрів світлодіодів, концентрації потоку випромінювання та інше.

2.2. Способи підвищення енергоефективності

Важливим етапом у забезпеченні тривалого і стабільного терміну функціонування світлодіодного джерела випромінювання є вибір джерела живлення. Зазвичай світлодіоди живлять постійним струмом, від величини і пульсацій якого залежать яскравість і стабільність світлового потоку СВД. Стандарти допускають коливання пульсацій світлового потоку не більше 10% - 20% [13]. Поширеними є два способи регулювання прямого струму СВД:

- за ВАХ світловипромінювального діода визначається подавана напруга для забезпечення необхідного значення прямого струму. Конструктивно це досягається застосування джерела напруги і резистора. Істотний недолік даного способу - незначні зміни прямої напруги приводять до значної зміни струму;

- управління світлодіодами за допомогою джерела стабілізованого струму. Цей спосіб регулювання струму СВД кращий, оскільки усуваються зміни струму при зміні прямої напруги.

Більш ефективними, у порівнянні з лінійними джерелами живлення СВД, є імпульсні джерела живлення світлодіодів з гальванічною розв'язкою чи без неї.

Наприклад, зворотньоходові гальванічно ізольовані перетворювачі застосовуються в пристроях невисокої потужності тоді, як півмостові резонансні використовують у пристроях потужністю понад 100 Вт [13, 22].

В основу дії імпульсного джерела живлення покладено процес перетворення змінного струму електромережі у постійний електричний струм, необхідний для роботи діодів. До складу будь-якого імпульсного джерела входить мостовий випрямляч і накопичувальний конденсатор (рис. 3.1). Це дозволяє джерелу живлення споживати енергію періодично в моменти коли мережева напруга близька до максимального значення [13, 22], а в інші моменти житися за рахунок енергії накопиченої конденсатором.

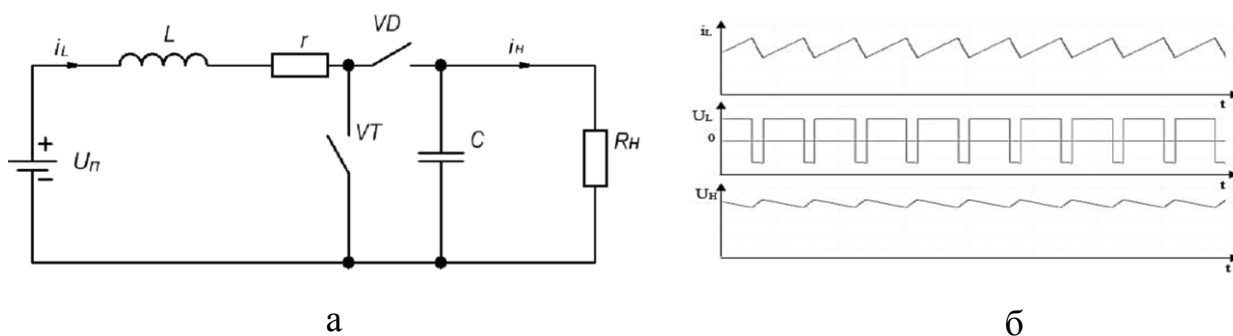


Рис. 3.1. Схема підвищуючого перетворювача (а) і його часові діаграми (б) [22]

При роботі в такому режимі сила струму буде не синусоїдальною, зі значною кількістю гармонік, а це призведе до збільшення перешкод і енергоспоживання. Подібні пристрої мають низький коефіцієнт потужності: 0,5 - 0,7 і для його підвищення постає необхідність використання коректора коефіцієнта потужності, який дозволяє корегувати фазу і форму споживаного струму за фазою і формою мережевої напруги. В залежності від потреб, є можливість використовувати однокаскадні імпульсні джерела чи багатокаскадні перетворювача з активною корекцією коефіцієнта потужності [22]. Найпопулярнішим в якості коректора коефіцієнта потужності є підвищувальний перетворювач (рис.3.1., а), завдяки відносній прості схеми і безперервності режиму вхідного сигналу (струму) [22].

При виборі імпульсного джерела живлення для світлодіодного випромінювача, також слід звертати увагу на його коефіцієнт корисної дії (ККД):

$$\eta = P/(P - \Delta P), \quad (3.4)$$

де P – вихідна активна потужність, $(P - \Delta P)$ – вхідна активна потужність, ΔP – втрати активної потужності у напівпровідникових елементах.

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3, \quad (3.5)$$

де ΔP_1 , ΔP_2 – втрати при протіканні прямого і зворотного струму, відповідно; ΔP_3 – втрати на перемикання.

Отже, для зменшення втрат і підвищення енергоефективності світлодіодних джерел випромінювання, потрібно шляхом оптимального підбору комплектуючих досягати підвищення ККД. Це можливо при використанні більш сучасних мікросхеми з незначним споживанням енергії, швидкодіючих напівпровідникових перемикачів (ключів) з незначним внутрішнім опором і відповідними частотними характеристиками та інше.

Ще одним важливим етапом у забезпеченні тривалого і стабільного терміну функціонування світлодіодного джерела випромінювання є контроль температурного режиму p - n переходу. Робота СВД при постійній напрузі, супроводжується виділенням тепла внаслідок процесу безвипромінювальної рекомбінації, а отже, поглинання фотонів. Нагрівання p - n - переходу викликає небажані зміни експлуатаційних характеристик напівпровідникового діоду і знижує тривалість використання. За формулою Варшні, температурна залежність ширини забороненої E_g зони напівпровідника має вигляд:

$$E_g = E_g|_{T=0K} - \alpha T^2/(T+\beta), \quad (3.6)$$

де α , β – емпіричні параметри Варшні (таблиця 3.1).

Параметри Варшні для напівпровідників [13, 23, 24]

Напівпровідник	E_g при 0 К, еВ	$\alpha \cdot 10^{-4}$ еВ/К	В, К	Межі застосування
AlN	6,026	18,0	1462	$T \leq 300\text{K}$
GaN	3,47	7,7	600	$T \leq 600\text{K}$
GaP	2,34	6,2	460	$T \leq 1200\text{K}$
GaAs	1,519	5,41	204	$T \leq 1000\text{K}$
GaSb	0,813	3,78	94	$T \leq 300\text{K}$
InN	1,994	2,45	624	$T \leq 300\text{K}$
InP	1,425	4,50	327	$T \leq 800\text{K}$
InAs	0,415	2,76	83	$T \leq 300\text{K}$
InAb	0,24	6,0	500	$T \leq 300\text{K}$
Si	1,170	4,73	636	$T \leq 1000\text{K}$
Ge	0,744	4,77	235	$T \leq 700\text{K}$

На рисунку 3.2 представлені приклади температурної залежності ширини забороненої зони (E_g) для ряду найпоширеніших напівпровідників, що використовуються для виготовлення СВД. Відомо, що зміна ширини забороненої зони це той головний фактором від якого залежить температурна зміна напруги на СВД. Отже, існує безпосередній зв'язок між температурною залежністю прямої напруги (V_f) СВД і температурною залежністю ширини забороненої зони.

Розрахункові значення dV_f/dT , наведені автором у роботі [23] для світловипромінювальних діодів, з хімічним складом нітриду галію (GaN), якісно узгоджуються з експериментом. Так, дані отримані в ході експериментів показали, що зміна прямої напруги при зміні температури становить $dV_f/dT = -2,3$ мВ/К, тоді як аналітичні розрахунки теж дали схожий результат - $dV_f/dT = -1,76$ мВ/К. Розходження між теоретичними та експериментальними даними у роботі [23] пояснюється температурним коефіцієнтом питомого опору (ТКО) нейтральних областей, що зменшується зі зростанням температури.

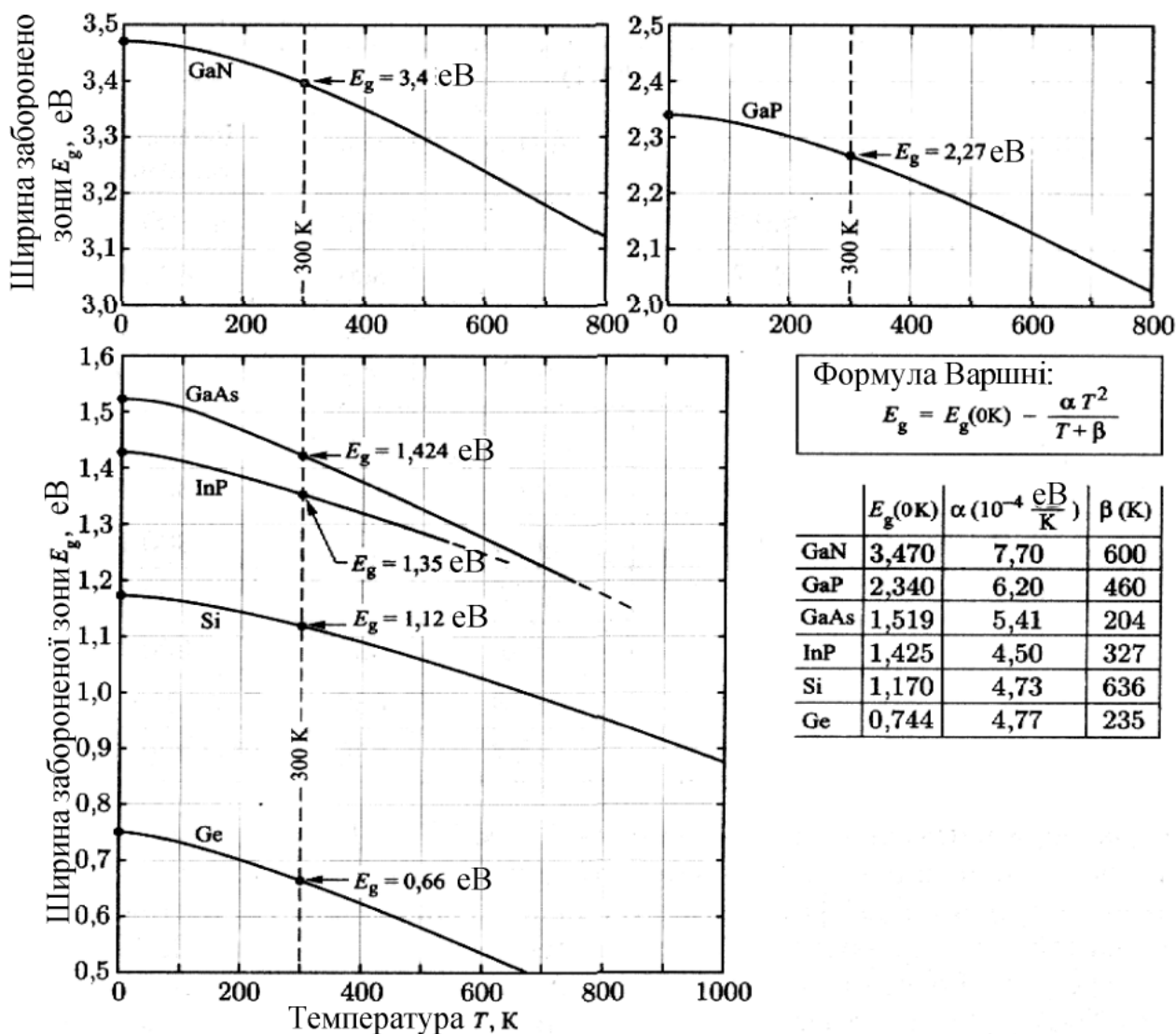


Рис.3.2. Температурна залежність ширини забороненої зони GaAs, InP, Si, Ge. Наведені залежності є апроксимаціями експериментальних даних за формулою Варшні з емпіричними коефіцієнтами α та β [23]

Відвід тепла здійснюється кристалотримачем, з'єднаннями, друкованою платою, ізолюючими підкладками, теплопровідними пастами, радіаторами та інш.

ВИСНОВКИ

1. Енергоефективність світловипромінювальних діодів не залежить від форми та розміру а визначається складом напівпровідникової гетероструктури; так використовуючи фосфід арсеніду галію (GaAsP) можна отримати червоне випромінювання, нітрид галію (GaN) – синє з енергоефективністю від 50 до 110 лм/Вт, тоді як з'єднання $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ (відомому як «YAG») люмінофорне покриття, леговане церієм, дає біле випромінювання з енергоефективністю до 300 лм/Вт;
2. В залежності від типу і характеристик, світлодіоди можуть використовуватися як у бездротових, так і у волоконно-оптичних системах зв'язку; так бездротові системи передачі інформації використовують світлодіоди складу GaAs або InGaAs з ІЧ-діапазоном випромінювання тоді, як волоконно-оптичні системи використовують суперлюмінесцентні або лазерні світлодіоди діаметром 20-50 мкм;
3. Енергоефективність світлодіодних джерел випромінювання можна підвищити використовуючи імпульсні джерела живлення з корекцією коефіцієнта потужності, використовуючи температурний режим р-п переходу не вище 100 °С і зменшуючи кількість перетворюючих елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. By Lisa Zyga, White LEDs with super-high luminous efficacy could satisfy all general lighting Needs August 31 2010 https://phys.org/news/2010-08-white-super-high-luminous-efficacy.html#google_vignette .
2. Edwards D., Kimberly D. "Light Emitting Diodes" . Каліфорнійський університет, Ірвайн., с. 2.
<https://web.archive.org/web/20190214175634/http://faculty.sites.uci.edu/chem11/files/2013/11/RDGLLED.pdf>
3. Центр дослідження освітлення. «Як створюється біле світло за допомогою світлодіодів?» . Політехнічний інститут Ренсселера .
<https://web.archive.org/web/20210502084248/https://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/led/whiteLight.asp>.
4. By S-kei - Own work based on: PnJunction-LED-E.PNG, CC BY-SA 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=14985902>.
5. By Profjohn - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3994494>
6. ["The Nobel Prize in Physics 2014"](#) (press release). Nobel Prize Committee, 7 October 2014.
7. ["Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier"](#). Archived July 28, 2018, at the [Wayback Machine](#)
8. [LM301B | SAMSUNG LED | Samsung LED Global Website](#). Samsung.com
9. [LED Packaging for Lighting Applications: Design, Manufacturing, and Testing](#). John Wiley & Sons. July 5, 2011
10. DU Aochen¹, DU Qiyuan , LIU Xin, YANG Yimin, XIA Chenyang , ZOU Jun, LI Jiang, Ce:YAG Transparent Ceramics Enabling High Luminous Efficacy for High-power LEDs/LDs. Journal of Inorganic Materials. Vol. 36 No. 8, Aug., 2021
11. ["Xlamp Xp-G Led"](#). Cree.com. Cree, Inc. Archived from [the original](#) on March 13, 2012

12. <https://svetum.com.ua/ua/blog/sovety-pokupatelyam/vidy-svetodiodov-kakie-byvayut-markirovka-i-parametry-svetodiodov/>
13. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. - 2-е изд. - М.: Физматлит, 2008. - 496 с.
14. <https://ledtest.vestum.ua/uk/study/riznicja-mizh-svitlodiodami-cob-ta-smd/>
15. Turner, Clint (October 3, 2007). ["A 173-mile 2-way all-electronic optical contact"](#). *Modulated light web site*.
16. J. Grubor; S. Randel; K.-D. Langer; J. W. Walewski (December 15, 2008). ["Broadband Information Broadcasting Using LED-Based Interior Lighting"](#). *Journal of Lightwave Technology*. **26** (24): 3883–3892.
17. ["500 Megabits/Second with White LED Light"](#). *news release*. Siemens. January 18, 2010. Archived from [the original](#) on March 11, 2013.
18. Lee, I.E.; Sim, M.L.; Kung, F.W.L. (February 2009). "Performance enhancement of outdoor visible-light communication system using selective combining receiver". *IET Optoelectronics*. **3** (1): 30–39.
19. Westaway L., Pure LiFi transmits data using light
<https://www.cnet.com/tech/mobile/pure-lifi-transmits-data-using-light-video/>
20. Ooi, B. S.; Cha, D.; Ng, T. K.; Majid, M. A.; Khan, M. Z. M. (2013-10-01). "Simultaneous quantum dash-well emission in a chirped dash-in-well superluminescent diode with spectral bandwidth >700 nm". *Optics Letters*. **38** (19): 3720–3723. [doi:10.1364/OL.38.003720](https://doi.org/10.1364/OL.38.003720)
21. Костик Л., Оптимізація енергетичної ефективності опромінювальних установок за параметрами приймача. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2007. Том 12. № 3., - с. 119 – 126.
22. Шуаїбов О.К., Низьковольтна імпульсна електроніка. Навчальний посібник. / Шуаїбов О.К., Шевера І.В., Малініна А.О., Малінін О.М. – Ужгород, Ужгородський національний університет, 2018, –236с.
23. 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.

24. Неєжмаков П.І. , Пітяков О.С. , Шпак С.В. , Кислиця С.Г. , Кожушко Г.М. ,
Стан енергоефективності та якості світла світлодіодної продукції, Ukrainian
Metrological Journal, 2022, No 1, 12-19.