

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНІ ДІОДИ ЯК ЕЛЕМЕНТИ
ОПТОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

студент гр.ЕП – 61



Р.М. Скубак

Науковий керівник,
д.ф.-м.н., професор



Л.В. Однодворець

Завідувач кафедри ЕЗПФ,
д.ф.-м.н., професор



І.Ю.Проценко

Суми 2020

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягала у вивченні фізичних та конструктивно-технологічних основ функціонування світловипромінювальних діодів як елементів оптоелектронних систем відображення інформації.

У ході виконання кваліфікаційної роботи розглянуті питання стосовно принципів функціонування і конструкції світловипромінювальних діодів, технології їх виготовлення, основних властивостей, механізмів генерації та застосування світловипромінювальних діодів як активних елементів сучасних оптоелектронних систем. Показано, що світловипромінювальний діод – це напівпровідниковий прилад, призначений для генерації світлового випромінювання при пропусканні крізь його перехід струму.

Узагальнення результатів вимірювань вольт-амперних характеристик світловипромінюючих діодів показує, що при зростанні напруги від 1,5 до 3,5 В величина прямого струму зростає від 20 мкА до 20 мА. Порівняння розрахункових результатів з довідниковими дає задовільне узгодження ($\pm 10\%$), а деяка невідповідність параметрів пов'язана із похибкою вимірювальних приладів. Отримано, що світлодіоди зеленого, блакитного та білого кольору світіння мають лінійну область в діапазоні струмів від 0 до 0,5 мА при напрузі від 0 до 1,4 В. Область насичення відповідає діапазону струму від 3,2 до 4,9 мА при величині напруги на переході від 2,0 до 3,0 В.

Робота викладена на 27 сторінках, містить 9 рисунків, 2 таблиці, список цитованої літератури із 18 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИЙ ДІОД, ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЯ, КОЛІР СВІТІННЯ, ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ШИРИНА СПЕКТРАЛЬНОЇ СМУГИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ДІОДІВ	6
1.1 Загальна характеристика.....	6
1.2 Фізичні основи роботи світлодіодів.....	7
1.3 Характеристика потужності оптичного випромінювання.....	8
1.4 Технологія виготовлення.....	10
1.5 Застосування світлодіодів.....	11
1.6 Спектральні і модуляційні характеристики СД.....	16
2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ	23
2.1 Дослідження вольт-амперних характеристик СД.....	23
2.2 Розрахунок параметрів світлодіодів.....	25
ВИСНОВКИ	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	27

ВСТУП

Основними факторами, що обумовлюють розвиток мікроелектроніки, є розроблення надчистих матеріалів, досконалої технології, підготовка висококваліфікованих кадрів. Для виготовлення активних та пасивних елементів інтегрованих мікросхем (ІМС) широко застосовуються напівпровідникові матеріали. На даний час номенклатура матеріалів, які використовуються в твердотільній електроніці перевищує 500 найменувань. При виготовленні ІМС застосовуються різноманітні фізико-технологічні процеси, які підрозділяють на три основних класи: процеси нанесення речовини у вигляді шарів та плівок на поверхню твердої фази - підкладки; процеси видалення речовини з поверхні твердої фази - підкладки; процеси перерозподілу атомів (іонів) домішок між зовнішнім середовищем та твердою фазою або в об'ємі твердої фази - підкладки. Світловипромінювальний діод як елемент напівпровідникової інтегральної оптики випромінює некогерентне світло при пропусканні через нього електричного струму. Випромінюване світло традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці спектру, а його колір залежить від хімічного складу використаного напівпровідника. Світлодіоди – малоінерційні напівпровідникові джерела випромінювання, які працюють при прямій напрузі. Випромінюване світло лежить у вузькому діапазоні спектра, його колірні характеристики залежать від хімічного складу використаного у ньому напівпровідника. Основними параметрами світлодіодів є потужність, колірні характеристики, кут висвітлення, нагрівання, вага і енергоспоживання.

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягала у вивченні фізичних та конструктивно-технологічних основ функціонування світловипромінювальних діодів як елементів оптоелектронних систем відображення інформації.

Результати роботи були представлені на Міжнародній науково-технічній конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка», м.Суми, 2020 рік.

РОЗДІЛ 1

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СВІТЛОВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ДІОДІВ

1.1 Загальна характеристика

Світловипромінювальний діод (СД) – це напівпровідниковий пристрій, який випромінює некогерентне світло при пропусканні крізь нього електричного струму. Світло, що випромінюється, знаходиться у вузькому діапазоні спектра. Його колір світіння залежить від хімічного складу напівпровідника, який знаходиться у світлодіоді. Позначення світлодіода в електричних схемах зображено на рис. 1.1 (а), будова світлодіода зображена на рис. 1.1 (б).

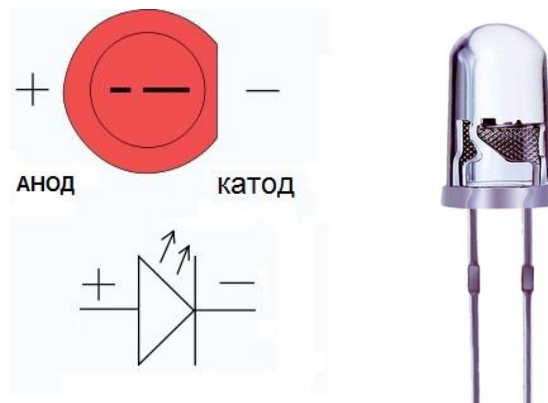


Рис. 1.1. Схематичне позначення СД в електричних схемах та зовнішній вигляд СД. Із роботи [1]

У світлодіодах на основі р-п переходу при пропусканні прямого електричного струму носії заряду (електрони та дірки) рекомбінуються з випромінюванням фотонів. Чим більший струм проходить крізь СД, тим більша кількість носіїв заряду потрапляє у зону рекомбінації за одиницю часу.

Для виготовлення світловипромінювальних діодів використовуються напівпровідникові матеріали, які ефективно випромінюють світло при рекомбінації, наприклад GaAs, InP, ZnSe, CdTe. Також виготовляють кремнієві та германієві СД, але вони майже не випромінюють світла. Для більш повного розуміння процесів, що відбуваються в напівпровідникових

світловипромінювальних діодах, було проведено огляд існуючих матеріалів з висвітленням основних питань щодо генерації випромінювання в напівпровідниках, та фізичних параметрів СД.

1.2 Фізичні основи роботи світлодіодів

При протіканні через діод прямого струму відбувається інжекція електронів. Процес самовільної рекомбінації інжектованих електронів, що відбувається, як в базовій області, так і в самому р-п переході, супроводжується їхнім переходом з високого енергетичного рівня на нижчий. Електрон після рекомбінації знаходиться у дуже нестабільному стані, оскільки він має зайву енергію, в такому стані електрон довго перебувати не може [2, 3]. Він перейде на стаціонарну орбіту з нижчим енергетичним рівнем і випромінить квант світла. Для того, щоб кванти енергії (фотони), які вивільнились при рекомбінації відповідали квантам видимого світла, збільшують кількість р-п переходів. Не всі напівпровідникові матеріали ефективно випромінюють світло при рекомбінації.

Матеріали для світлодіодів повинні мати ширину забороненої зони більше 1,7 еВ. Германій і кремній непригодні для цього, оскільки ширина забороненої зони у них набагато менша. Для сучасних світлодіодів застосовують головним чином фосфід галія GaP та карбід кремнію SiC, а також тверді розчини - GaAlAs, GaAsP. Внесення в напівпровідник фосфору дозволяє одержувати світіння різних кольорів. Крім СД, які дають видиме світіння, випускаються світлодіоди інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) із арсеніду галія GaAs. Їх застосовують у фотореле, різноманітних сенсорах, вони входять до складу оптронів. Існують світлодіоди змінного кольору з двома світловипромінювальними переходами, один із яких має максимум спектральної характеристики в червоній частині спектра, а друга - в зеленій. Колір світіння такого світлодіода залежить від співвідношення струмів через переходи [4].

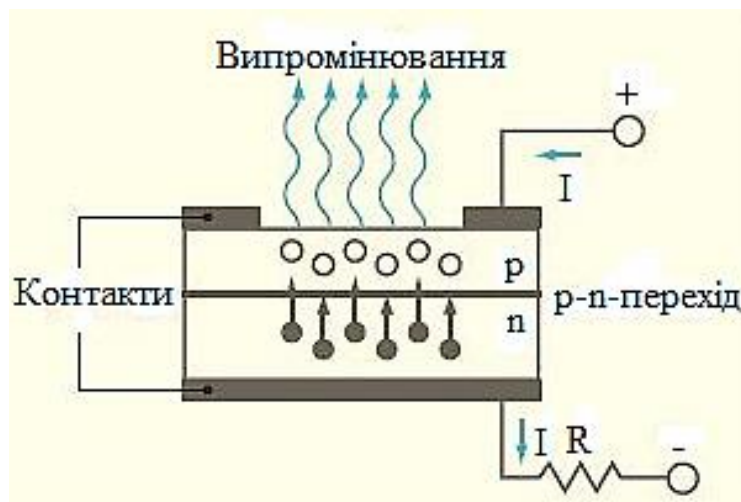


Рис. 1.2. Схематична діаграма принципу роботи світлодіоду. Адаптовано із роботи [5]

1.3 Характеристика потужності оптичного випромінювання

Якщо струм інжекції позначити через I , то потужність оптичного випромінювання СД P описується у вигляді

$$P = \eta_{\text{ex}} h\nu \left(\eta_{\text{spont}} \frac{I}{q} \right), \quad (1.1)$$

де η_{ex} – ККД виведення випромінювання, $h\nu$ – енергія фотона, η_{spont} – ККД світлового випромінювання, I/q – число носіїв, інжекттованих в активний шар в одиницю часу, q – заряд електрона.

Якщо час життя випромінювальної і безвипромінювальної рекомбінації позначити відповідно через τ_r і τ_{Nr} , то ККД світлового випромінювання буде зображатися у вигляді

$$\eta_{\text{spont}} = \frac{1}{1 + \tau_r / \tau_{\text{Nr}}}. \quad (1.2)$$

Таким чином, зі збільшенням складової безвипромінювальної рекомбінації ККД світлового випромінювання падає.

У η_{ex} враховується ефект зменшення виведеного випромінювання за рахунок самопоглинання в активному шарі, френелівського відбиття від граней

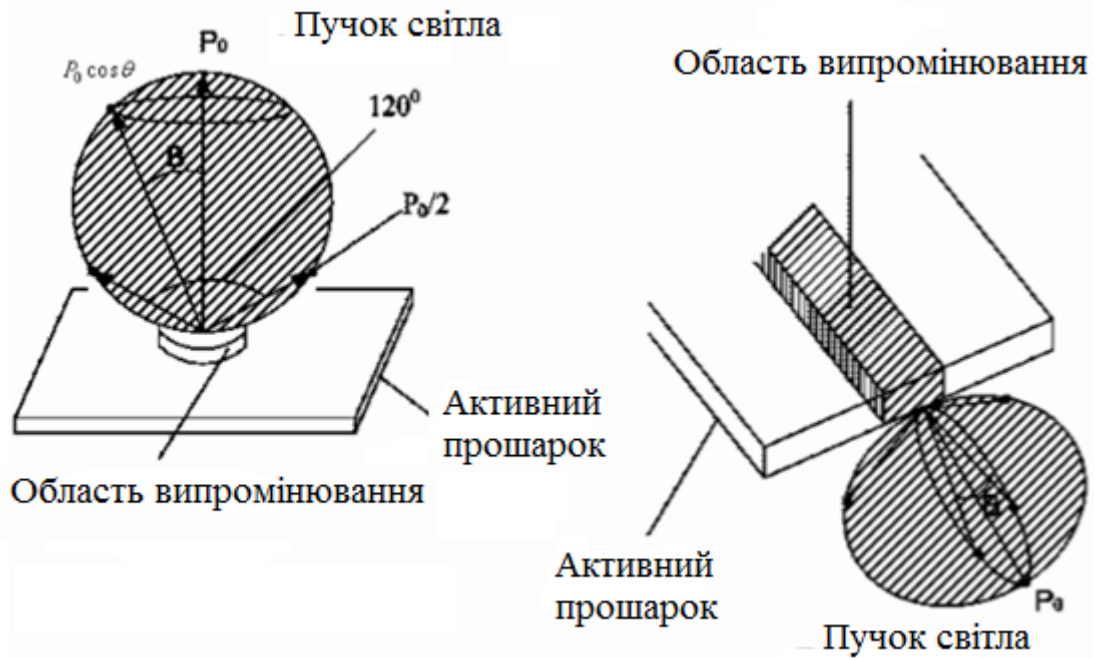


Рис.1.3. Форми пучка випромінювання СД з поверхневим випромінювачем (а) і з торцевим випромінювачем (б). Адаптовано із роботи [6]

кристала і повного внутрішнього відбиття. Зовнішня квантова ефективність у СД з поверхневими випромінювачами складає близько 3%, а в СД з торцевими випромінювачами – 0,5 – 1%, тобто менше в порівнянні з лазерами.

Залежність між струмом і потужністю оптичного випромінювання в СД, як видно з формули (1.1), при постійному $\eta_{\text{спон}}$ носить лінійний характер. Практично зі збільшенням струму інжекції через зростання безвипромінювальної рекомбінації виникає нелінійність у вигляді опуклості, що особливо помітна в GaInAsP СД.

Причиною нелінійності є такі механізми безвипромінювальної рекомбінації:

- 1) рекомбінація на границі розподілу гетеропереходів;
- 2) витік (просочування) інжектованих зарядів через гетеробар'єр;
- 3) оже-рекомбінація.

Зокрема, у GaInAsP СД ширина забороненої зони невелика і значний ефект Оже. Цей ефект зростає пропорційно квадрату концентрації носіїв, тому навіть у AlGaAs СД з великим рівнем легування ($5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), він стане дуже значним, що призведе до різкого зменшення ККД світлового випромінювання.

1.4 Технологія виготовлення

Основна технологія вирощування кристалів – металоорганічна епітаксія. Для цього процесу необхідні чисті гази. У сучасних установках присутній автоматичний контроль хімічного складу газів та температури підкладки. Товщина вирощуваних шарів вимірюється і контролюється у межах від десятків ангстрем до кількох мікрон. Усі шари необхідно легувати домішками, донорами або акцепторами, щоб створити р-n перехід з великою концентрацією електронів в n-області та дірок в р-області. За один процес тривалістю декілька годин можна виростити структури на 6-12 підкладках діаметром 50-75 мм. Дуже важливо забезпечити та проконтролювати однорідність структур на поверхні підкладок. Важливим етапом технології є планарна обробка плівок: травлення, створення контактів, покриття металічними плівками для контактних виводів. Плівку, вирощену на одній підкладці можна розрізати на декілька тисяч чипів розмірами від $0,24 \times 0,24$ до 1×1 мм². Наступним етапом є створення світлодіодів із цих чипів. Необхідно змонтувати кристал у корпусі, зробити контактні виводи, виготовити оптичні покриття, які просвічують поверхню для вивода або відображення випромінювання [7]. Якщо це білий світлодіод, то необхідно рівномірно нанести люмінофор. Треба забезпечити відбиття тепла від кристала та корпусу, зробити пластиковий купол, фокусуючий випромінювання у відповідний тілесний кут. Через підвищення потужності та збільшення світлового потоку традиційна форма корпусу перестала задовольняти виробників у зв'язку з низьким тепловідводом. Тому на зміну традиційній та SMD-технології прийшла більш вдосконалена COB-технологія (chip on board).

Світлодіоди на основі SMD- та COB-технологій монтуються безпосередньо на загальну підкладку, яка може виконувати роль радіатора. У такому випадку підкладка виготовляється із металу. Так створюються світлодіодні модулі, які можуть мати лінійну, круглу або прямокутну форму. Раніше у світлодіодних стендах було багато світлодіодів. Але зараз, за рахунок збільшення потужності, світло діодів стає менше, але оптична система, яка направляє світловий потік у відповідний тілесний кут, відіграє все більш важливу роль.

1.5 Застосування світлодіодів

Світлодіоди знаходять своє застосування майже в усіх областях електронної техніки. Завдяки широкому спектру кольорів, компактності та різноманітності модулів світлодіоди дають можливість реалізації багатьох оригінальних інноваційних світлотехнічних рішень в області дизайну. Компактні розміри світлодіодних модулів забезпечують монтаж у тісних умовах. При цьому монохроматичне випромінювання світлодіодів сприяє високій насиченості кольору. Окрім компактного розміру, перевагою світлодіодів є також малі затрати енергії, великий строк служби та низькі затрати на технічне обслуговування. Витрати на експлуатацію світлодіодного устаткування також мінімальні [8].

Матеріали для світлодіодів повинні мати ширину забороненої зони більше 1,7 еВ. Германій і кремній непригодні для цього, оскільки ширина забороненої зони у них набагато менша. Для сучасних світлодіодів застосовують головним чином фосфід галія GaP та карбід кремнію SiC, а також тверді розчини - GaAlAs, GaAsP. Внесення в напівпровідник фосфору дозволяє одержувати світіння різних кольорів [9].

Крім світлодіодів, які дають видиме світіння, випускаються світлодіоди інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) із арсеніду галія GaAs. Їх застосовують у фотореле, різноманітних сенсорах, вони входять до складу оптронів. Існують світлодіоди змінного кольору з двома світло-випромінювальними переходами, один із яких має максимум спектральної характеристики в червоній частині спектра, а друга – в зеленій. Колір світіння такого світлодіода залежить від співвідношення струмів через переходи.

Основними параметрами світлодіодів є: яскравість - відношення сили світла до площини поверхні, яка світиться (10 - 1000 Кд на см²); постійна пряма напруга (2 - 3 В); колір світіння та довжина хвилі, які відповідають максимальному світловому потоку; максимальний постійний прямий струм (1 - 10 мА); діапазон температур навколишнього середовища, при яких світлодіод може нормально працювати (-60 - +70°C); швидкодія (10⁻⁸ с) [10, 11].

Основні характеристики світлодіодів наступні: яркісна – це залежність яскравості від прямого струму, світлова – залежність величини світлового потоку від величини прямого струму, спектральна – залежність довжини хвилі від величини світлового, темного або фотоструму, вольт-амперна – залежність напруги від величини світлового, темного та фотоструму; діаграма напрямленості випромінювання.

Сучасні світлодіоди можуть випромінювати на довжині хвилі від інфрачервоної до близького ультрафіолету, та навіть існують методи поширення смуги випромінювання і створення білих світлодіодів. На відміну від ламп розжарювання, які випромінюють світловий потік широкого спектру рівномірно на всіх напрямках класичні світлодіоди випромінюють світло певної довжини хвилі і в певному напрямі. Світлодіод був розвинений до лазерних діодів, які працюють на тому ж принципі, але дозволяють направлене випромінювання когерентного світла.

Патент на перший світлодіод – прилад, що дає випромінювання на напівпровідниковому переході при пропусканні електричного струму, був отриманий компанією «Texas Instruments» в 1961 році, і світлодіоди на основі GaAs і GaP почали випускати для індикаторних систем [12, 17]. Перший світлодіод, який працює у видимому діапазоні був зконструйований групою Ніка Холоняка в компанії «General Electric» в 1962. У 1960-70-х минулого століття були створені прилади, які мали колір світіння від червоного до зеленого на основі матеріалів GaP (червоний - зелений) та GaAsP (жовтий – високо-ефективний червоний). Використання нового матеріалу GaAlAs (галій-алюмінієвий арсенід) в 1980 році дозволило підвищити ефективність приладів в 10 разів, що привело до нових використань у зовнішніх знаках та надписах, зчитуванні штрих-коду, передачі даних через оптичне волокно і медичному обладнанні. Але GaAlAs мав недолік – робота тільки у червоній ділянці спектру (660 нм) та короткий час життя (більш 50% падіння ефективності після 100 000 годин роботи). працював тільки у червоній ділянці спектру (660 нм) та мав короткий час життя (більш 50% падіння ефективності після 100 000 годин роботи). Частково проблеми були вирішені за рахунок лазерних діодів та

нового люмінесцентного матеріалу InGaAlP, який дозволив плавне підстроювання кольорів за рахунок зміни ширини забороненої зони напівпровідника [17]. Метод нанесення MOCVD (метал–оксидне хімічне парове нанесення, Metal Oxide Chemical Vapor Deposition) дозволив створити більш складний пристрій з ефективністю до 90%. У той же час корпорація «Nichia» запропонувала перші блакитні світлодіоди на основі GaN (нітриді галію), InGaN (індій-галій-нітриді) та SiC (карбіді кремнію). Досягненням електронної галузі стало створення Лабораторією фундаментальних досліджень компанії NTT світлодіода, випромінюючого хвилі в ультрафіолетовій частині спектру $\lambda = 210$ нм. Випромінювання з такою короткою довжиною хвилі знайшло широке застосування в медицині і техніці.

На сучасному етапі розвитку мікро- і наноелектроніки проводиться розробка органічних світлодіодів, які дозволять виробництво дешевих та екологічно безпечних пристроїв з білим світлом та просування далі у короткохвильову область [13, 14, 17].

Основним фізичним процесом, на якому базується робота напівпровідникових випромінювачів є люмінесценція - нетеплове випромінювання з тривалістю, яка значно перевищує період світлових коливань. На відміну від світіння розжарених тіл для люмінесценції непотрібно нагрівання тіла, хоча підведення енергії в тому чи іншому вигляді необхідно. Крім того, на відміну від розсіювання світла люмінесценція триває декілька секунд після зняття енергії. Тобто поглинена провідником енергія на деякий час затримується в ньому, а потім частково перетворюється в оптичне випромінювання, частково – в теплоту [12]. Залежно від виду енергії, збудливою люмінесценцію, розрізняють фото-, електро- та інші види люмінесценції. Світитися можуть тверді, рідкі і газоподібні тіла. У оптоелектронних напівпровідникових приладах використовується люмінесценція кристалічних домішкових напівпровідників з широкою забороненою зоною.

Світлодіодні модулі (рис.1.4) знаходять своє застосування [15]: у світловій рекламі, в оформленні інтер'єрів, у сигналізації автотранспорту, в

освітленні для орієнтації у приміщенні, у позначенні шляхів евакуації, у декоративних та вбудованих світильниках, у світлових покажчиках.

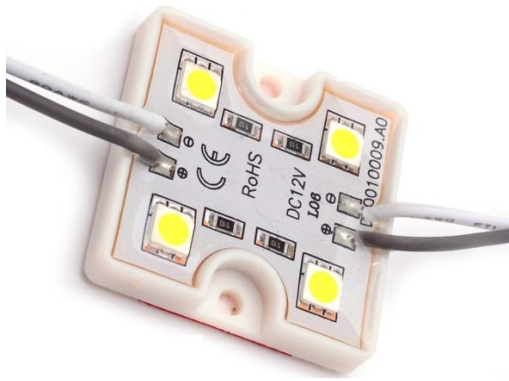


Рис.1.4. Зовнішній вигляд світлодіодного модуля. Із роботи [13]

У роботі [14] відмічається, що світлодіоди випромінюють світло видимого спектру, коли через них протікає електричний струм. Прилади в металевому корпусі зі скляною лінзою забезпечують спрямоване випромінювання світла, а виготовлені в пластмасових корпусах, виконаних з оптично прозорого компаунда, створюють розсіяне випромінювання. Хоча колір (довжина хвилі) випромінювання визначається використаним матеріалом, кількість світла, що випускається світлодіодом, залежить від струму збудження і швидко збільшується із зростанням щільності струму. Слід зазначити, що червоні GaP-світлодіоди починають випромінювати при малих щільності струму, проте їх випромінювання досягає насичення при відносно низьких щільності струму в порівнянні з світлодіодами з інших матеріалів. Галузі застосування СД дуже широкі (рис.1.5). Світловипромінюючі діоди є основою більш складних приладів таких як: лінійна світлодіодна шкала - інтегральна мікросхема, яка складається із світлодіодних структур (сегментів), кількість яких від 5 до 100, та розміщені послідовно [14].

Такі шкали заміняють щитові вимірювальні прилади та використовуються для відображення інформації, яка постійно змінюється; цифро-літерний світлодіодний індикатор – інтегральна мікросхема із декількох діодних структур, які розміщені так, щоб при відповідній комбінації сегментів одержується зображення літери або цифри; багатоелементний блок – електронна система одержання складних зображень [15].



Рис.1.5. Галузі застосування світлодіодів

Фізичною основою напівпровідникових випромінювачів є люмінесценція. Під люмінесценцією розуміють електромагнітне нетеплове випромінювання, що має тривалість, яка значно перевищує період світлових коливань. Таким чином, у визначенні підкреслюється той факт, що на відміну від світіння розжарених тіл для люмінесценції непотрібно нагрівання тіла, хоча, звичайно, підведення енергії в тому чи іншому вигляді необхідно. Крім того, на відміну від розсіювання світла люмінесценція триває декілька секунд після зняття енергії. Інакше кажучи, поглинена провідником енергія на деякий час затримується в ньому, а потім частково перетворюється в оптичне випромінювання, частково – в теплоту [15].

Залежно від виду енергії, збудливою люмінесценцію, розрізняють фото, електро та інші види люмінесценції. Світяться можуть тверді, рідкі і газоподібні тіла. У оптоелектронних напівпровідникових приладах використовується люмінесценція кристалічних домішкових напівпровідників з широкою забороненою зоною.

На сучасному етапі розвитку оптоелектроніки розпочата розробка бездротових мереж нового покоління з використанням світлодіодних ламп.

Американські розробники на чолі з професором Томасом Літл (Thomas Little) отримали грант Національного фонду науки (NSF) на створення наступного покоління мереж бездротових комунікацій, заснованого на абсолютно несподіваному принципі - взамін радіохвиль для передачі сигналу використовується видиме світло.

Основою технології виступає одна з головних особливостей світловипромінюючих діодів, - здатність швидко, непомітно для людини включатися і вимикатися. Мерехтіння світла, що відбувається з великою частотою, дозволить передавати інформацію без помітних змін у рівні освітленості кімнати.

Мережі на світлодіодних лампах буде більш швидкою і захищеною. Така технологія може з успіхом застосовуватися і на вулиці - наприклад, для зв'язку між автомобілями. Відразу приходить на розум можливість використання її для зв'язку в противоугонних пристроях сигналізації із швидкістю передачі даних від 1 до 10 Мбайт/с. Потенційна пропускна здатність таких мереж може бути набагато вище, ніж у нині існуючих радіохвильових. Крім того, оскільки видиме світло не проникає через непрозорі поверхні, такі як стіни, подібні мережі будуть краще захищені від прослуховування, ніж традиційні - на радіочастотах.

Основним недоліком даної технології є необхідність розташовувати мережеві пристрої в зоні видимості світлодіодних ламп. Але в порівнянні з перевагами і зручностями технології це не здається таким великим мінусом.

1.6 Спектральна і модуляційна характеристики СД

Якщо припустити, що в розподілі інжекттованих носіїв усередині енергетичної зони найбільший внесок у випромінювання СД вносять носії в енергетичній смузі шириною $3kT$, тоді повна ширина спектральної смуги на піввисоті буде мати вигляд [16]:

$$\Delta\lambda = \frac{3kT}{hc} \lambda^2, \quad (1.3)$$

де h – постійна Планка, k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура.

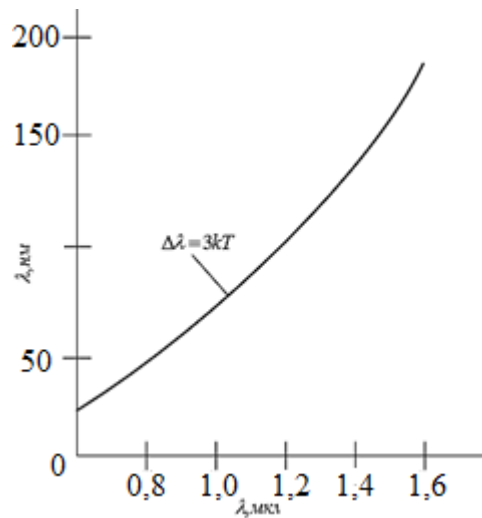


Рис.1.6. Залежність ширини спектральної смуги $\Delta\lambda$ на піввисоті від довжини хвилі λ (суцільна лінія відповідає розрахунковим значенням)

На рис.1.6 показана залежність між шириною спектральної смуги і довжиною хвилі випромінювання, при цьому суцільною лінією зображена крива, розрахована за вищенаведеною формулою. Як видно з рисунка, дані розрахунку й експерименту збігаються. Так, для GaInAsP СД на довжині хвилі 1,3 мкм λ складає 100–110 нм, а для AlGaAs СД на довжині хвилі 0,85 мкм $\Delta\lambda$, виявляється рівною 30–45 нм.

Модуляція інтенсивності випромінювання в СВД здійснюється шляхом модуляції струму інжекції, причому смуга модуляції обмежується часом життя інжекттованих носіїв. Промодульована потужність оптичного випромінювання описується таким співвідношенням:

$$L_m(\omega) = \frac{L_m(0)}{\sqrt{1+(2\pi\tau_s f)^2}}. \quad (1.4)$$

На рис.1.7 приведена модуляційна характеристика СВД. Смуга модуляції звичайно визначається за частотою, на якій визначаюча здатність ($\sim L_m^2(\omega)/L_m^2(0)$) зменшується вдвічі, іншими словами, коли має місце таке співвідношення [4]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_s} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{Nr}} \right). \quad (1.5)$$

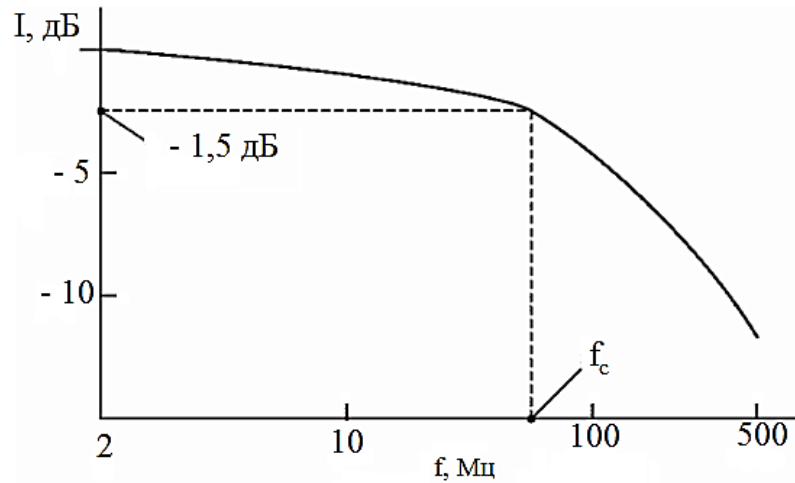


Рис.1.7. Модуляційна характеристика СВД. Вісь ординат відповідає значенням $|L_m(\omega)/L_m(0)|$ у децибелах

При модуляції на частоті, що перевищує f_c , концентрація носіїв в активному шарі змінюється не тільки в залежності від часу життя носіїв τ_s , тому модуляційна чутливість, як показано на рис.1.7, буде падати. Далі, варто звернути увагу на те, що відповідно до вищенаведеної формули смуга модуляції визначається впливом двох складових: випромінювальної і безвипромінювальної рекомбінації. Складова випромінювальної рекомбінації $1/\tau_r$ пропорційна сумі концентрацій легуючої домішки p_0 та інжекттованих носіїв n і виражається співвідношення:

$$\frac{1}{\tau_r} = B(p_0 + n), \quad (1.6)$$

де B – коефіцієнт рекомбінації.

Якщо вважати $n = \tau_r J / qd$, то час життя τ_r можна показати як функцію концентрації легуючої домішки p_0 і густини струму інжекції J :

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{2J/qd}{[p_0^2 + 4J/qdB]^{1/2} - p_0}. \quad (1.7)$$

В активному шарі n -типу замість p_0 в цій формулі буде n_0 .

При незначній безвипромінювальній рекомбінації смуга модуляції визначається формулою (1.7), тобто вона є функцією p_0 , J і d . Значення B

визначається експериментально і виявляється рівним $5 \cdot 10^{-11} - 2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$. На рис.1.8 приведені розраховані смуги модуляції при $B = 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$. При невеликій концентрації домішок в активному шарі смуга модуляції зростає пропорційно $\sqrt{J/d}$. У цьому випадку f_c приблизно визначається виразом

$$f_c = \sqrt{\frac{BJ}{qd}}. \quad (1.8)$$

Розрахунки отримані на підставі формули (1.8): $B = 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$; d – товщина активного шару; діаметр джерела випромінювання 50 мкм.

Для забезпечення швидкодії необхідно або збільшувати струм інжекції, або зменшувати товщину активного шару СД. Однак густина струму J через теплове випромінювання звичайно не перевищує $15 \text{ кА}/\text{см}^2$. Це значення в СВД з діаметром джерела випромінювання 50 мкм і товщиною $d = 1 \text{ мкм}$ відповідає струму $I \cong 300 \text{ мА}$. Частота f_c при цьому дорівнює 50 МГц [4].

З іншого боку, при високій концентрації домішок смуга модуляції розширюється. У цьому випадку, як видно з рис.1.8, залежність f_c від J/d зникає і $f_c \approx (B/2\pi)p_0$. Однак з підвищенням концентрації домішки виникають проблеми, пов'язані з різким зростанням безвипромінювальної рекомбінації і зменшенням ККД джерела випромінювання. Оскільки в СД і ефективність зв'язку з волокном також виявляється низькою, то прагнення мати по можливості велику потужність випромінювання, приводить до виготовлення таких діодів, у яких f_c складає кілька десятків МГц.

Переваги, які має світловипромінювальний діод в порівнянні з традиційними лампами, дозволяють з упевненістю стверджувати, що поява нових типів освітлювальних приладів на основі СД стане революційним технологічним проривом в світлотехніці.

У 90-х роках минулого століття був сформований новий функціональний матеріал - нітрид галію GaN на сапфірі, що дозволив досягти світіння світлодіодів білого кольору. Фірма «Nichia» (Японія) і її колеги-конкуренти з інших супутніх фірм, які розробили п'ять технологічних блоків процесу

виготовлення світильників: зростання кристалів сапфіру за методом Кіропулоса; механічну обробку кристалів сапфіра, в т.ч. різання, шліфування і полірування пластин до 14 класу [19]; епітаксійних нарощування нітриду галію на полірованих підкладках сапфіру методом газотранспортних реакцій; - виготовлення на епітаксійних структурах методом електронної літографії чіпів світлодіодів; складальне виробництво світлодіодів.

У даний час кристали світлодіодів поставлені на масове виробництво, і щорічно загальносвітовий приріст обсягів їх випуску збільшується на 30-40%. За результатами 2008 р., світовий ринок світлодіодів досяг 25-30 млрд долларів. Розроблена ціла серія освітлювальних приладів, в т.ч. ідентичних по цоколю ламп розжарювання потужністю від 40 до 100 Вт, з енергоспоживанням 4-10 Вт. Значно розширені сфери, в яких можуть бути використані прилади. Фактично мова йде про можливу заміну існуючих ламп розжарювання та люмінесцентних ламп світильниками на СД [18, 19].

Таким чином, підкреслимо основні переваги ламп на світлодіодах [17, 18]:

- низьке енергоспоживання (у 10 разів нижче, ніж у звичайної лампи розжарювання, і на 20-25% нижче, ніж у енергозберігаючої люмінесцентної лампи);
- лампи на СД не вимагають особливої системи прийому, адже вони, на відміну від люмінесцентних ламп, екологічно нешкідливі;
 - екологічність; мініатюрні розміри;
 - пожежо- та вибухобезпечність;
 - повна колірна гама випромінювання; високий ККД; спектр сучасних люмінофорних діодів аналогічний спектру люмінесцентних ламп, які давно використовуються в побуті;
 - мала інерційність; малий кут випромінювання; безпека – невисокі робочі напруги; стійкість до низьких температур.

Проаналізуємо основні характеристики світлодіодів.

Сила світла – світловий потік, який випромінюється діодом, що приходить на одиницю тілесного кута в напрямку, перпендикулярно до

площини випромінюючого кристала. Вказується при заданому значенні прямого струму і вимірюється в канделах.

Яскравість випромінювання – величина, що дорівнює відношенню сили світла до площі поверхні яка світиться. Вона вимірюється в канделах на квадратний метр при заданому значенні прямого струму через діод.

Постійна пряма напруга – значення напруги на СД при протіканні крізь нього постійного прямого струму.

Максимально допустимий постійний прямий струм – максимальне значення постійного прямого струму, при якому забезпечується задана надійність при тривалій роботі СД.

Максимально допустима зворотна напруга – максимальне значення постійної напруги, прикладеної до СД, при якому забезпечується задана надійність при тривалій роботі.

Параметри деяких СД видимого діапазону наведено в таблиці 1.1. Хоча колір випромінювання визначається використаним матеріалом, кількість світла, що випромінюється, швидко збільшується із зростанням щільності струму. Динамічний опір червоних світлодіодів складає від 1 до 2 Ом, у той час як для матеріалів, що дають більш короткохвильове випромінювання, воно становить від 7 до 15 Ом.

Таблиця 1.1

Параметри світлодіодів видимого діапазону хвиль. Із роботи

Тип приладу	Колір світіння	Номинальні робочі параметри при T=25°C				Максимально допустимі параметри при T=25°C	
		I _v , мкКд	I _{пр} , мА	U _{пр} , В	λ _{макс} , нм	I _{пр.макс} , мА	U _{зв.макс} , В
АЛ102АМ	червоний	130	5	2,8	0,69	20	2
АЛ102БМ	червоний	200	10	2,8	0,69	20	2
АЛ102ГМ	червоний	400	10	2,8	0,69	20	2
АЛ307АМ	червоний	200	10	2	0,665	22	2
АЛ307БМ	червоний	900	10	2	0,665	22	2
АЛ307КМ	червоний	2000	10	2	0,665	22	2
АЛ307ЛМ	червоний	6000	10	2	0,665	22	2
АЛ336А	червоний	6000	10	2	0,67	20	2
АЛ336Б	червоний	20000	10	2	0,67	20	2
АЛ336К	червоний	40000	10	2	0,67	20	2
АЛ307ДМ	жовтий	400	10	2,5	0,57	22	2
АЛ307ЕМ	жовтий	1500	10	2,5	0,57	22	2
АЛ307ЖМ	жовтий	6000	10	2,5	0,57	22	2
АЛ336Д	жовтий	4000	10	2,5	0,69	20	2
АЛ336Ж	жовтий	15000	10	2,5	0,69	20	2
АЛ310Д	жовтий	600	10	3,5	0,7	12	4
АЛ310Е	жовтий	250	10	3,5	0,7	12	4
АЛ314Д	жовтий	150	10	2,8	0,69	22	2
АЛ314Е	жовтий	500	10	2,8	0,69	22	2
АЛ102ВМ	зелений	450	20	2,8	0,53	22	2
АЛ102ДМ	зелений	600	20	2,8	0,53	22	2
АЛ336Г	зелений	10000	10	2,8	0,56	20	2
АЛ336В	зелений	10000	10	2,8	0,56	20	2

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ

2.1. Дослідження вольт-амперних характеристик СД

Для побудови вольт-амперних характеристик (ВАХ) світлодіодів різного кольору світіння були проведені вимірювання напруги при зміні величини прямого струму від 0 до 4 мА. Дослідження ВАХ було проведено за допомогою лабораторного стенду, який має наступні блоки (рис. 2.1): світлодіоди різних типоніменів (різний спектральний діапазон); вузол комутації (на основі перемикачів SA1 та SA2); вимірювальні прилади (використано два мультиметри типу DT-830A); змінний резистор типу ППБ-1А з опором 2,2кОм; імпульсне джерело живлення на базі Push-down генератора з напругою до 10 В.

Принципова схема лабораторного стенду для вимірювання робочих характеристик СД має наступний вигляд (рис. 2.2). Були проведені вимірювання напруги при зміні прямого струму для кожного із світлодіодів. До лабораторного стенду підключені два мультиметри: один для регулювання величини струму, другий – для показника значень напруги. Перемикаємо світлодіоди з одного на другий здійснюється за допомогою вузла комутації. Результати вимірювань представлені у таблиці 2.1. На основі отриманих значень побудовані вольт-амперні характеристики (ВАХ) для СД різного кольору світіння (таблиця 2.1, рис. 2.3). Для підтвердження результатів було проведено порівняння експериментальних і довідникових даних для світлодіодів різного кольору світіння. Експериментальні і довідникові результати мають задовільну відповідність. Відхилення від середнього значення до 10% пов'язане із похибкою вимірювальних пристроїв.

Слід відмітити, що яскраві СД не є джерелами холодного світла, - вони нагріваються під час роботи. Ефективність тепловідведення дуже важлива для СД. Ще одна відмінність світлодіоду від ламп розжарювання - виражена нелінійність вольт - амперної характеристики (див., наприклад, рис.2.3). Невеликі зміни напруги живлення призводять до значних коливань струму.



Рис. 2.1 Зовнішній вигляд лабораторного станду

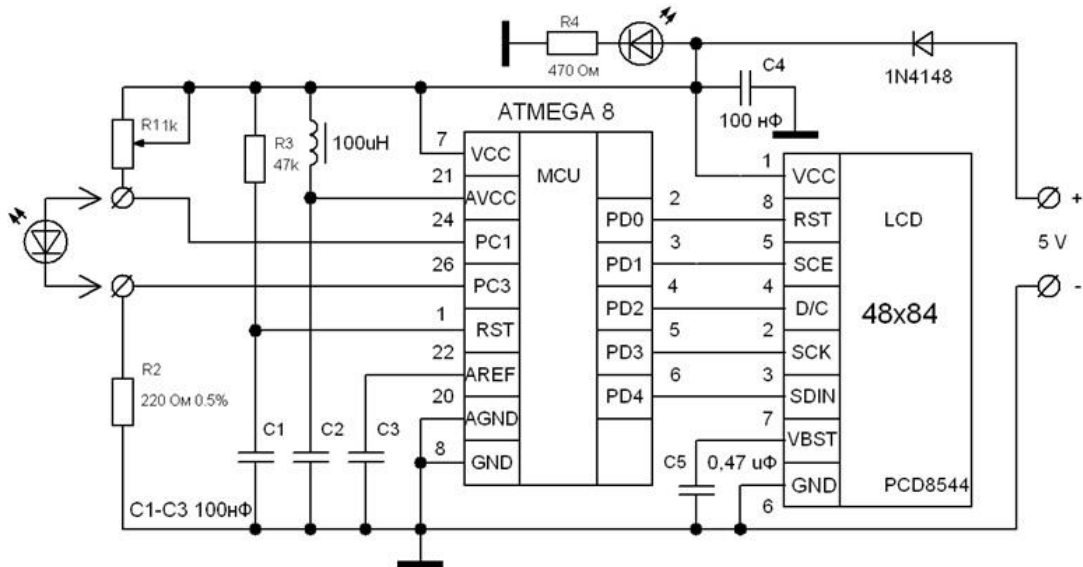


Рис. 2.2 Принципова схема лабораторного станду

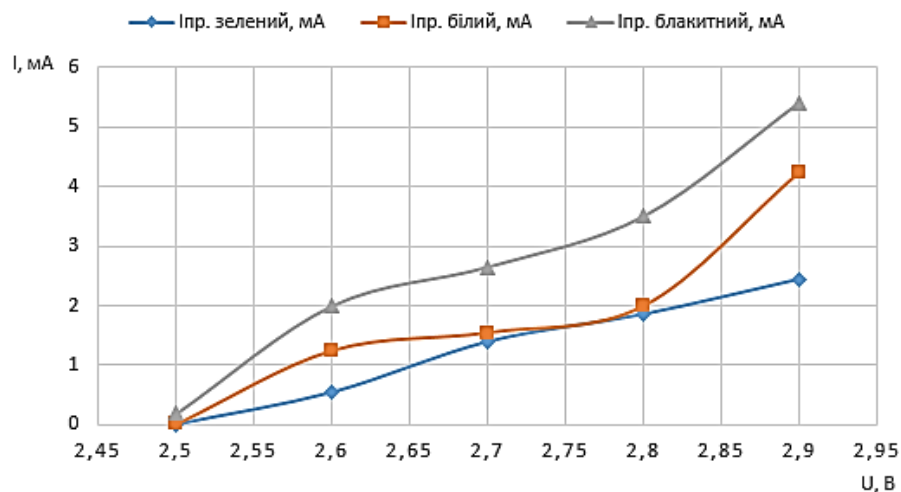


Рис. 2.3. Вольт-амперні характеристики світлодіодів: 1 – АЛ102В (зелений колір світіння); 2 – АЛ307ЕИ (білий колір світіння); 3 – АЛ307КМ (блакитний колір світіння)

2.2 Розрахунок параметрів світлодіодів

Результати вимірювання вольт-амперних характеристик СД різних типів типоніменалів наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Результати експериментальних вимірювань та розрахунок параметрів СД

U , В	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
<i>Світлодіод АЛ102В зеленого кольору світіння</i>					
I_{np} , мА	0,01	0,55	1,40	1,86	2,45
P , мВт	0,025	1,40	3,75	5,21	7,10
<i>Світлодіод АЛ307ЕИ білого кольору світіння</i>					
I_{np} , мА	0,02	1,25	1,55	2,00	4,24
P , мВт	0,05	3,20	4,25	5,60	12,30
<i>Світлодіод АЛ307КМ блакитного кольору світіння</i>					
I_{np} , мА	0,20	2,00	2,65	3,50	5,40
P , мВт	0,50	5,20	7,15	9,75	15,65

По мірі зростання щільності струму через СД більше число електронів і дірок інжектується в заборонену зону, виникають вторинні ефекти, збільшуючи число дірок і електронів, які можуть випромінювально рекомбінувати. У результаті світлова ефективність СД збільшується.

Таким чином, узагальнення результатів вимірювань вольт-амперних характеристик світловипромінюючих діодів показує, що, незалежно від довжини хвилі випромінювання (зелений, помаранчевий, червоний, жовтий кольори світіння) при зростанні напруги від 1,5 до 3,5 В величина прямого струму зростає від 20 мкА до 20 мА; характеристики нелінійні, а провідність СД зростає, починаючи з деякого порогового значення напруги, на основі якого можна досить точно встановити матеріал напівпровідника.

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра були вивчені і проаналізовані літературні джерела стосовно питань про роботу та характеристики світловипромінюючих діодів.

2. Показано, що світловипромінювальний діод – це напівпровідниковий прилад, призначений для генерації світлового випромінювання при пропусканні крізь його перехід струму. По мірі зростання щільності струму через р-п-перехід більше число електронів і дірок інжектується в заборонену зону, виникають вторинні ефекти, збільшуючи число дірок і електронів, які можуть випромінювально рекомбінувати. У результаті світлова ефективність СД збільшується.

3. Узагальнення результатів вимірювань вольт-амперних характеристик світловипромінюючих діодів показує, що при зростанні напруги від 1,5 до 3,5 В величина прямого струму зростає від 20 мкА до 20 мА. Невідповідність розрахункових результатів і довідникових даних ($\pm 10\%$) пов'язана із похибкою вимірювальних приладів.

4. Отримано, що світло діоди зеленого, блакитного та білого кольору світіння мають лінійну область в діапазоні струмів від 0 до 0,5 мА при напрузі від 0 до 1,4 В. Робоча ділянка характеристики знаходиться в діапазоні від 0,5 до 3,2 мА при напрузі на переході 1,4 до 2,0 В. Область насичення відповідає діапазону струму від 3,2 до 4,9 мА при величині напруги на переході від 2,0 до 3,0 В.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Тарновський М.Г. Оптоелектронна схемотехніка. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2008. – 189 с.
2. Технологія одержання та фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми)/ І.Ю. Проценко, Л.В.Однодворець. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 231с.
3. Находкін М.Г., Сизов Ф.Ф. Елементи функціональної електроніки. – Київ: УкрІНТЕІ, 2002. – 323 с.
4. Прищепя М.М., Погребняк В.П. Мікроелектроніка. Частина І. Елементи електроніки. – Київ: Вища школа, 2004. – 431 с.
5. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка.- Т.1. Елементна база електронних пристроїв. – Київ: Обереги, 2000. - 300 с.
6. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
7. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.
8. Панфілов І.П., Савицька М.П., Флейта Ю.В. Компонентна база радіоелектронної апаратури: навч. посібник. – Одеса: ОНАЗ, 2014. – 188 с.
9. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. посіб. / за ред. Ю.Л.Мазора, Є.А.Мачуського. – Київ: Вища школа, 1999. – 838 с.
10. Омельчук В.В., Гладич І.К. Електроніка та мікросхемотехніка: Навч. посібник. – Житомир: ЖРІВЕ, 2004. – 356 с.
11. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконо-оптична система передачі. Навчальний посібник – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 225 с.
12. Кожем'яко В. П. Сучасні методи та засоби відображення інформації. Частина І. Дискретні системи відображення інформації / Кожем'яко В. П, Васюра А. С, Дорощенко Г. Д. – Вінниця : ВДТУ, 2015. – 106 с.
13. Рідкокристалічна електроніка : монографія / за ред. проф. З. Готри. – Львів: Апріорі, 2010. – 532 с.

14. Kathleen M. Vaeth. OLED-Display Technology // Information Display, №6. – 2003, P. 12 – 17.
15. Khan M., Shah S. Data and information visualization methods and interactive mechanisms: a survey // Inter. J. Comp. Appl. – V.34(1). – 2011. – P. 1–14.
16. Панфілов І.П., Савицька М.П., Флейта Ю.В. Компонентна база радіоелектронної апаратури: навч. посібник. – Одеса: ОНАЗ, 2014. – 188 с.
17. Однорець Л.В. Основи оптоелектроніки: конспект лекцій. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 44 с.
18. Методика вимірювання робочих характеристик світловипромінюючих діодів / Лободюк О.С., Пушкар С.О., Скубак Р.М. // Матеріали і програма Міжнародної науково-технічної конференції студентів та молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка. ФЕЕ-2020». – Суми: СумДУ, 2020. – 91 с.