

РОЗДІЛ 10. КОРПУСИ ДЛЯ СВІТЛОДІОДІВ МАЛОЇ ТА ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

До складу корпусів світлодіодів обов'язково входять два електричних виводи та оптично прозоре вікно для виводу випромінювання. Корпуси для потужних світлодіодів, як правило, також мають тепловідвід для розсіювання залишків тепла. Матеріали для вікон корпусу повинні мати наступні властивості: оптичну прозорість, високий показник заломлення, хімічну інертність, стабільність при високій температурі та герметичність. Монтаж кристала у корпус з вікном, показник заломлення якого знаходиться між повітрям та напівпровідником, збільшує ефективність виводу випромінювання. Більшість корпусів світлодіодів виготовляється з полімерів з показниками заломлення у діапазоні від 1.5 до 1.8. Зменшення різниці показників заломлення на поверхні напівпровідника збільшує кут повного внутрішнього відбиття, що розширює конус виводу випромінювання та збільшує ефективність виводу випромінювання.

На рис. 10.1 а показано варіант корпусу малопотужного світлодіода. Кристал світлодіода закріплюється виводами вверх, приклеюється або припаюється на дні чашкоподібного поглиблення (чашки відбивача), що з'єднаний з одним з електричних контактів (зазвичай з катодом). Провід до верхнього контакту світлодіода з'єднується з другим виводом (анодом). Такий корпус часто називають корпусом T1-3/4 або 5 мм-корпусом.

У малопотужних світлодіодах корпуси, як правило, мають форму півсфер, як показано на рис. 10.1, а; тому проміні виходячого світла завжди попадають на межу розділу корпус-повітря під прямими кутами. Таким чином, на цій межі розділу не виникає повне внутрішнє відбиття. Існують і несферичні типи корпусів, наприклад прямокутні й циліндричні з плоскими верхніми поверхнями (рис. 10.1 б).

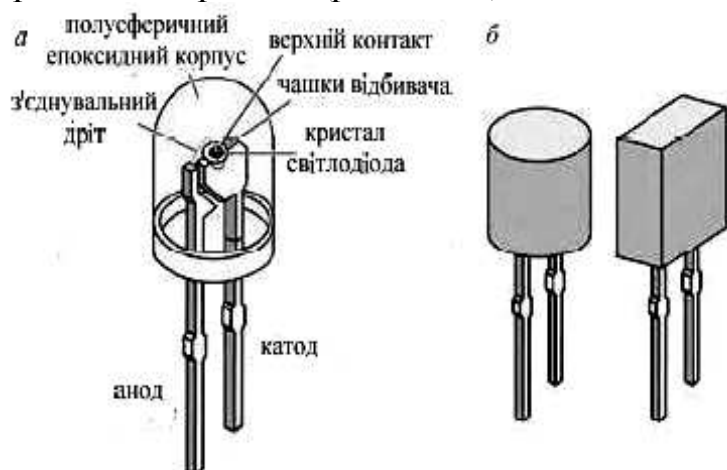


Рис. 10.1 - Типові корпуси світлодіодів: а - світлодіод у напівсферичному корпусі, б - світлодіоди у циліндричному та прямокутному корпусах

Плоскі поверхні застосовують, якщо світлодіоди повинні бути врівень з поверхнею пристрою, в які вони вбудовуються, або якщо на них будуть дивитись тільки під кутами, що близькі до прямих. Корпуси повинні захищати світлодіоди від небажаних механічних дій, вологості та хімічних реагентів. Корпуси скріплюють конструкцію, що складається з анодних та катодних виводів, кристала світлодіода та з'єднувальних дротів. На рис. 10.2 наведена

фотографія групи світлодіодів на *монтажній рамці з виводами*. Індивідуальні рамки монтуються на тимчасовому кріпленні, що видаляється після завершення монтажу світлодіода (кріплення кристала, приєднання проводів). Епоксидний корпус забезпечує механічний зв'язок між анодним та катодним виводами. Кристал світлодіода кріпиться до плоскої поверхні дна *чашки відбивача*, який має високу відбивальну здатність, за допомогою провідної епоксидної смоли, що вміщує срібло. Відмітимо, що у випадку потужних світлодіодів для кріплення кристалів з відбивачем віддають перевагу використанню металовміщуючих спаїв, оскільки їх тепловий опір набагато нижче, ніж у провідних епоксидних смол.

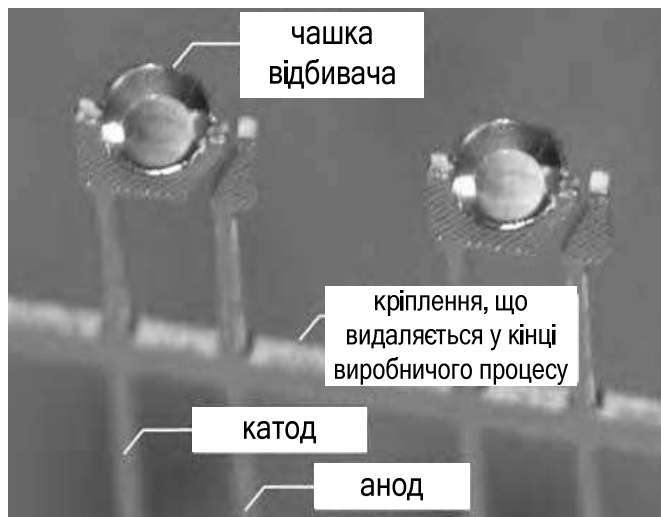


Рис. 10.2 - Монтажна рамка, що використовується для серійного виготовлення світлодіодів у 5 мм-корпусах, по закінченні монтажу світлодіодів та формуванню корпусів кріплення, які забезпечують механічну жорсткість конструкції у процесі виготовлення, видаляється

На рис. 10.3 показано *корпус потужного світлодіода*. Корпуси для потужних СД, як правило, відводять тепло від кристала світлодіода до радіатора. Такий шлях може забезпечувати спеціально виготовлена печатна плата. Корпус, що показаний на рис. 10.3, має три характерні особливості. По-перше, в його склад входить алюмінієвий або мідний радіатор, що має низький тепловий опір, до якого за допомогою припою, що вміщує метал, закріплюється кристал світлодіода. По-друге, кристал світлодіода герметизується силіконом, що забезпечує відсутність механічних напружень під час експлуатації. На силікон наноситься пластикове покриття, що відіграє роль лінзи. По-третє, кремнієва підкладка, на яку закріплюється світлодіод, забезпечує конструкції захист від електростатичних розрядів.

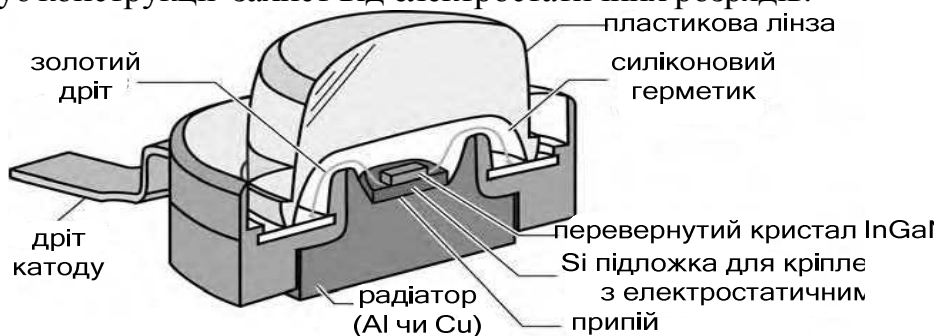


Рис. 10.3 - Поперечний переріз корпусу потужного світлодіода. Для ефективного тепловідводу радіатор може припаюватись до спеціальної печатної плати. Такий корпус, що запропонований компанією Lumileds Corp., називається корпусом Баракуда (Krames et al., 2003)

На рис. 10.4 наведені фотографії корпусів потужних світлодіодів. Можна бачити гребінчасті контакти світлодіодів на основі нітриду галію (рис. 10.4 б). На рис. 10.4, в показано кріплення корпусу світлодіода до печатної плати, яка має високу теплопровідність та забезпечує ефективне охолодження всієї структури (LED Museum, 2003). Декілька чипів, що розташовані на одній підкладці, можуть бути з'єднані послідовно, що дозволяє збільшити робочу напругу при одночасному зниженні робочих струмів (Krames et al., 2002, 2003).

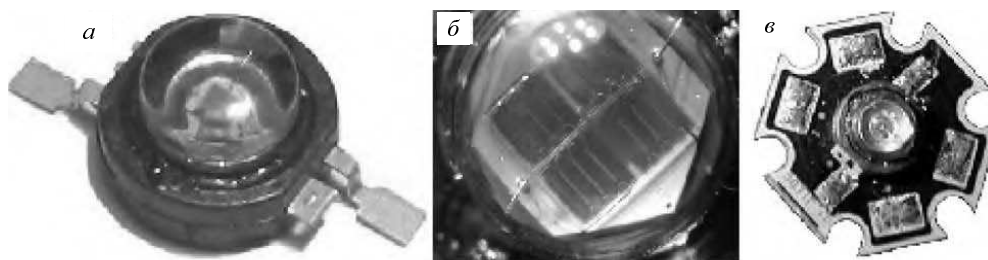


Рис. 10.4 - Корпус потужного світлодіода (а); кристал світлодіода у корпусі (б); корпус на печатній платі, що має високу теплопровідність (в): а —Krames et al., 2003, б та в- LED Museum, 200311.4.

10.1. Захист від електростатичних розрядів

Однією з основних причин виходу з ладу електронних и оптоелектронних компонентів є електростатичні розряди (Voldman, 2004). Розглянемо ситуацію, коли на один з електродів діода попав заряд $+Q$. Припустимо, що через час Δt цей заряд щезне. Це означає, що через діод протікав струм, який дорівнював $I = +Q/\Delta t$ (вважається, що заряд зменшується рівномірно).

Спочатку розглянемо випадок попадання заряду на катод світлодіода, анод якого заземлено. Очевидно, що при цьому шлях розрядного струму проходить крізь зворотно зміщений діод. Представимо еквівалентну схему, що відповідає даному випадку, у вигляді конденсатора C та паралельного резистора R_p . Тоді у сталому стані при протіканні крізь діод розрядного струму напруга на діоді буде рівною $I \cdot R_p$. Це означає, що за час Δt на світлодіоді розсіюється енергія $I^2 \cdot R_p \cdot \Delta t$.

Далі розглянемо випадок, коли заряд попадає на анод світлодіода, катод якого заземлено. Струм тепер буде йти крізь прямо зміщений діод, еквівалентну схему якого можна подати у вигляді джерела напруги з вихідною напругою V_{th} та послідовного резистора R_s . У сталому режимі напруга на р-п-переході буде $V_{th} + I \cdot R_s$. При більших струмах вона визначається в основному другим додатком, тобто на прямо зміщеному діоді за час Δt величина розсіюваної енергії складе $I^2 \cdot R_s \cdot \Delta t$.

Оскільки $I^2 \cdot R_p \cdot \Delta t$, при протіканні розрядного струму крізь зворотно зміщений діод розсіюється значно більше енергії, ніж при його протіканні крізь прямо зміщений світлодіод. Звідси витікає, що *зворотні* розрядні струми набагато небезпечніші *прямим* струмів. Цей висновок було підтверджено експериментально (Wen et al., 2004).

Світлодіоди з більшою шириною забороненої зони, наприклад діоди GaN, особливо сильно страдають від електростатичних розрядів. Це пояснюється більшою величиною їх опору R_p (малими зворотними струмами насичення та високими напругами пробую).

Тому для світлодіодів на основі нітридів III групи були розроблені схеми захисту від електростатичних розрядів (Steigerwald et al., 2002; Sheu, 2003).

На рис. 10.5 показані три варіанти схем захисту від електростатичних розрядів: у вигляді послідовності кремнієвих діодів, з одним стабілітроном та з двома стабілітронами (Steigerwald et al., 2002; Lumileds, 2004). Струм, що викликаний електростатичною напругою, обминаючи світлодіод, проходить через паралельний захисний контур. Такі схеми особливо гарно працюють з розрядами зворотної полярності. Контури захисту від електростатичних розрядів, як правило, поєднуються з кремнієвою підкладкою (Steigerwald et al., 2002; Lumileds, 2004). Використання одного або двох стабілітронів або застосування контурів з послідовно включеними кремнієвими діодами приводить до збільшення порогової напруги захисного контуру до значень, що перевищують напругу включення світлодіода. Тому в режимі нормальної роботи крізь схему захисту протікає незначний струм.

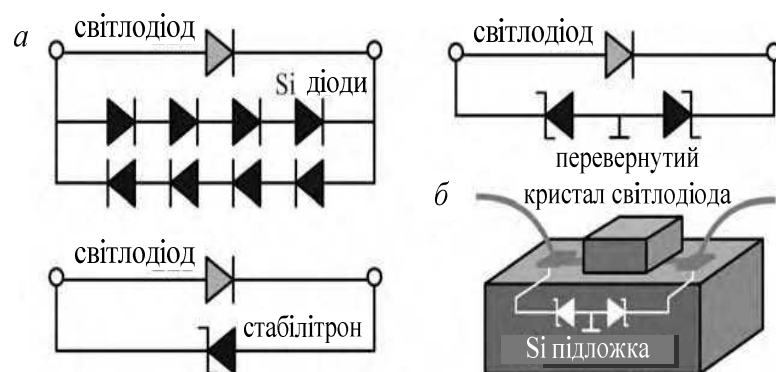


Рис. 10.5 - Схеми захисту від електростатичних розрядів: у вигляді послідовності Si-діодів, з одним або двома стабілітронами (а); схема захисту від електростатичних розрядів, що інтегрована у Si-підложку (б) (Steigerwald et al., 2002; Lumileds, 2004)

Було запропоновано (Sheu, 2003) розміщувати в одному кристалі світлодіод і діод Шотки. Структура, яка показана на рис. 10.6, а, складається з діода з великою площею p - n -переходу, що відокремлений глибокою борозенкою від діода Шотки малої площі.

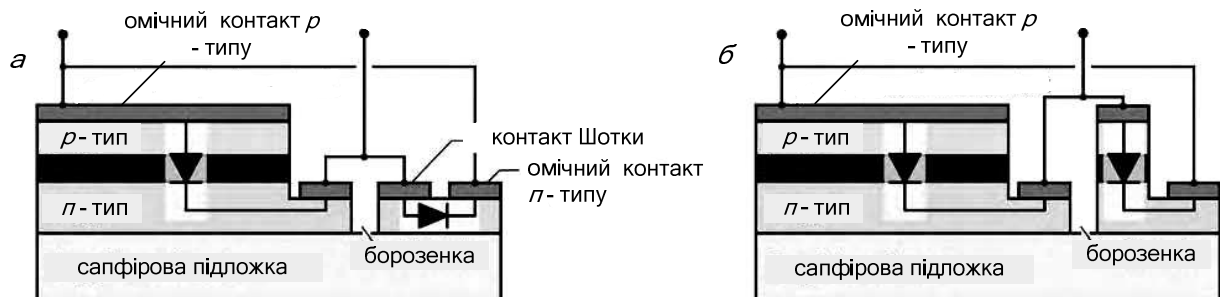


Рис. 10.6 - Схеми захисту від електростатичних розрядів, що розміщені на єдиному зі світлодіодом кристалі: а - діод Шотки, який сформований на буферному шарі n-типу світлодіода InGaN; (б) - діод Шотки замінено на p-n-перехід малої площі (Cheu, 2003)

Діод Шотки, який сформовано на буферному шарі n-типу світлодіода InGaN, виявляється зміщеним у прямому спрямуванні, коли на світлодіод подається напруга зворотної полярності. Розрядний струм зворотної

полярності тече в основному крізь діод Шотки, минаючи р-n-перехід, що запобігає його пробою. При розрядних струмах прямої полярності струм тече крізь р-n-перехід. На рис. 10.6, б показана альтернативна схема, в якій діод Шотки замінено на р-n-перехід (Cho, 2005).

10.2. Тепловий опір корпусів світлодіодів

Тепловий опір корпуса світлодіода й максимальна робоча температура визначають максимальну теплову потужність, розсіювану в ньому. Максимальна робоча температура, як правило, визначається міркуваннями надійності, деградації пластика корпуса та величини квантового виходу випромінювання світлодіода. На рис. 11.7 показані варіанти світлодіодних корпусів, а також наведені значення їх теплових опорів (Arik et al., 2002). Тепловий опір перших корпусів світлодіодів, що з'явилися у кінці 60-х років та до сих пір використовуються для малопотужних діодів, складає 250 К/Вт. Корпуси з алюмінієвими або мідними радіаторами, що передають тепло від кристала безпосередньо до печатної плати, з якої й відбувається розсіювання тепла, мають тепловий опір у діапазоні від 6-12 К/Вт. Припускається, що тепловий опір сучасних корпусів потужних світлодіодів з пасивним охолодженням буде менше 5 К/Вт.

Зазначимо, що у корпусах, що зображені на рис. 10.7, немає активного охолодження, тобто вентиляторів. Радіатори з охолоджуючими ребрами та вентиляторами зазвичай використовують для охолодження електронних мікрочипів, включаючи кремнієві мікропроцесори КМОП. Їх тепловий опір менше 5 К/Вт. Використання активного охолодження знижує ефективність використання електроенергії систем освітлення на основі СД.

10.3. Хімічний склад матеріалів для корпусів світлодіодів

До корпусів світлодіодів ставлять декілька вимог: вони повинні бути про-зорими, хімічно стабільними, герметичними, мати високі показники заломлення та витримувати великі температури. Всі корпуси світлодіодів виготовляються з полімерів; структурні формули деяких із них наведені на рис. 10.8. Молекула самого простого полімеру складається з ланцюга вуглеводнів (рис. 10.8, а). Розгалуження та перехресні зв'язки всередині молекул полімерів приводять до створення матеріалів типу гуми (рис. 10.8,б). Такі матеріали мають низьку прозорість та не можуть застосовуватись для виготовлення корпусів світлодіодів. Але добре відомо, що оксиди часто бувають прозорими, тому в хімічному складі матеріалів для корпусів світлодіодів завжди присутній кисень.

Частіше всього корпуси світлодіодів виготовляють з *епоксидної смоли* (часто називаємої епоксидкою). Такі корпуси прозорі й не деградують при використанні їх у світлодіодах довгохвильової частини видимої та інфрачервоної областей спектру. Але відмічено (Barton et al., 1998), що епоксидні смоли втрачають свою прозорість при використанні у короткохвильових СД, які випромінюють у голубій, фіолетовій або УФ - області спектру. Епоксидні смоли хімічно стабільні до температур ~ 120 °С.

Довготривала дія більш високих температур призводить до їх пожовтіння, тобто до втрати прозорості.

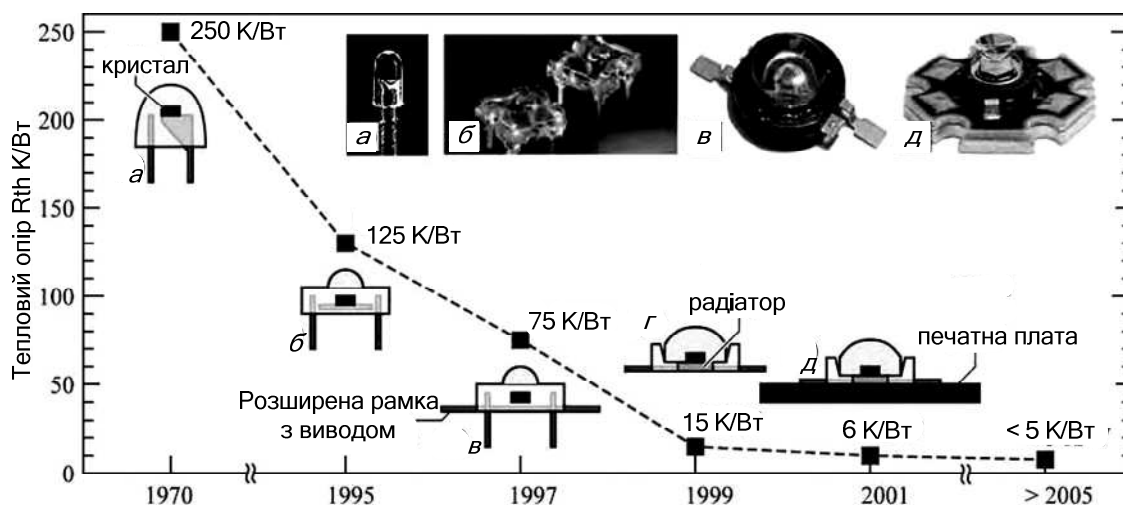


Рис. 10.7 - Тепловий опір корпусів світлодіодів: а - "5 мм", б- з низьким профілем, в - з низьким профілем та розширювальною рамкою, г — з радіатором, д - з радіатором, який змонтовано на печатній платі. Торгові марки даних корпусів: б и в - «Piranha» (Hewlett Packard Corp.); г та д — «Barracuda» (Lumileds Corp.) або «Dragon» (Osram Opto Semiconductors Corp.) (Arik et al., 2002)

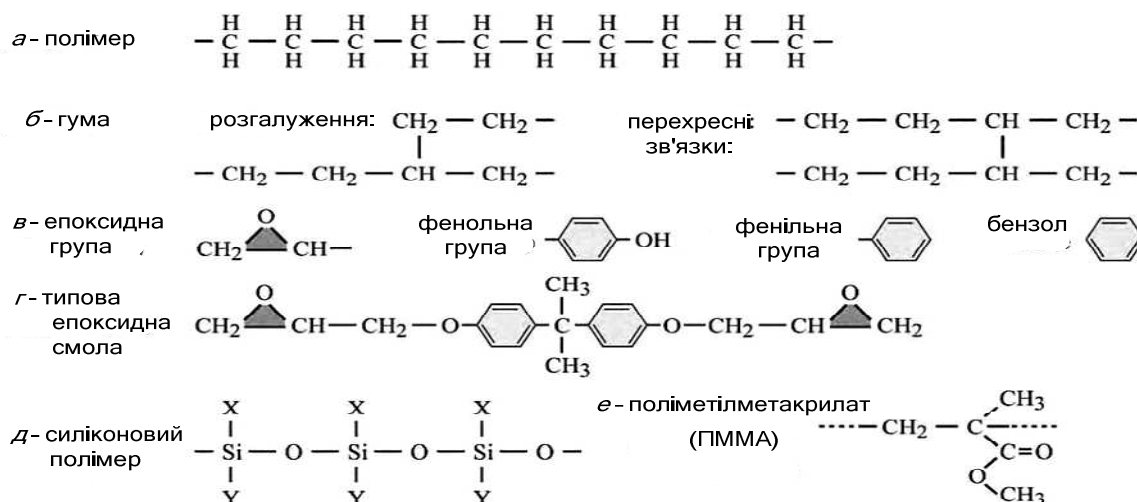


Рис. 10.8 - Хімічні структури полімерів. В якості матеріалів для корпусів світлодіодів застосовують епоксидні смоли, силіконові полімери й поліметилметакрилати (ПММА).

У структурі силіконових полімерів Х та Y представляють атоми або молекули: Н, СН₃ (метил) або С₆Н₅ (феніл)

На рис. 10.8 в показана *епоксидна група*, до складу якої входить кисень, який зв'язаний з двома спареними атомами вуглецю. Такі кільцеві епоксидні групи є складними частинами структури епоксидної смоли, яка представлена на рис. 10.8 г. Тверді епоксидні смоли - стехіометричні суміші двох рідких компонентів - середовища з епоксидними групами та смоли, що вміщує дві гідроксильні групи. Смоли –це маслоподібні середовища, до складу яких часто входять фенольні групи. Фенольну групу С₆Н₄—ОН отримують з фенільної – С₆Н₅ вилученням одного атому водню та його заміною на гідроксильну групу –ОН. Фенільну групу отримують з бензолу - добре відомого шестиатомного вуглецевого кільця С₆Н₆ вилученням одного атому водню. У процесі реакції

полімеризації при підвищеній температурі епоксидні групи об'єднуються з гідроксильними групами смоли.

Типові епоксидні смоли, що застосовують для виготовлення корпусів світлодіодів, є термічно оброблювані двоскладні рідинні системи, які складаються з середовищ на основі біс-фенолу-А або циклічної аліфатичної епоксидної смоли та ангідриду (Kumar et al., 2001). Епоксидна смола при формуванні піддається короточасній високотемпературній обробці (при 120°C). Двоскладні системи повинні бути стехіометричними сумішами. Композиції з великим вмістом смоли мають більш низькі температури полімеризації, а підвищення вмісту затверджувача у суміші може привести до зміни кольору корпусів світлодіодів. Показник заломлення епоксидних смол близький до 1,6. До достоїнств епоксидних смол, крім прозорості, можна віднести їх гідні механічні властивості та високу температурну стабільність. Але тривала теплова обробка епоксидних смол при температурах вище 120 °C призводить до їх знебарвлення та втрати прозорості. У роботах Кумара та ін. (Kumar et al., 2001), Горчика (Gorczyk, 2001) та Фліка (Flick, 1993) описані епоксидні смоли, які отримані не тільки методом термообробки, але й обробкою НВЧ та УФ.

З початку 2000 рр. для покращення термостабільності корпусів світлодіодів замість епоксидних смол стали застосовувати *кремнійорганічні сполучення (силікони)*, які зберігають свої характеристики до температур ~ 190 °C, що значно перевищує робочий температурний діапазон смол (Crivello, 2004). Крім того, силікон - пружний матеріал (він зберігає цю властивість протягом декількох десятиріч), що дозволяє знижувати механічне навантаження на напівпровідниковий кристал. *Силікон* є полімером, основна структура якого показана на рис. 10.8 д. Як видно, до складу силікону входять атоми кремнію та кисню, тому він за своїми властивостями набагато ближче до SiO₂, ніж епоксидні смоли. Це означає, що силіконові корпуси світлодіодів мають кращу хімічну й температурну стабільність, ніж корпуси з епоксидних смол, та багато рідше втрачають свою прозорість. Можливо, було б непогано виготовляти корпуси світлодіодів із матеріалів типу SiO₂, що мають такі ж високі прозорість та стабільність (хімічну та температурну) (Crivello, 2004). Але треба пам'ятати, що SiO₂ не має тієї пружності, яку може запропонувати силікон.

Поліметілметакрилат (ПММА) поки ще досить рідко використовується для виготовлення корпусів світлодіодів. На рис. 11.8, е показана хімічна структура елементарної чарунки метілметакрилата. Поліметілметакрилат ПММА також відомий під назвами акрилове скло або плексиглас. Він має порівняно низький показник заломлення (1,49 у діапазоні довжин хвиль 500-650 нм). Тому при використанні ПММА-корпусів для світлодіодів, що виконані на основі напівпровідникових матеріалів з високими показниками заломлення, отримані структури мають обмеження за величиною оптичного виводу.

10.4. Покращені структури корпусів світлодіодів

У роботі Лі та ін. (Lee et al., 2004) описані *корпуси світлодіодів з градієнтною зміною показника заломлення*, що складаються з декількох шарів матеріалів з різними показниками заломлення. Шари з найбільшим

показником знаходяться у безпосередньому контакті з напівпровідниковим кристалом. Зовнішні шари корпусу мають менші показники. Корпуси з градієнтними змінами показника заломлення забезпечують більш високі коефіцієнти оптичного виводу випромінювання, ніж корпуси з постійним показником заломлення.

Іноді до складу матеріалів для виготовлення корпусів світлодіодів вводять спеціальні *мінеральні добавки*, що примушують світло відбиватись, заломлюватись та розсіюватись, що робить діаграму спрямованості випромінювання круговою та ізотропною. У багатокольорових світловипромінюючих пристроях (наприклад у багатокристальних світлодіодах білого світіння) такі добавки дозволяють отримувати рівномірний розподіл кольору. В якості мінеральних додатків, як правило, застосовуються оптично прозорі речовини - TiO_2 , CaF_2 , SiO_2 , CaCO_3 и BaSO_4 , показники заломлення яких відрізняються від показника матеріалу корпусу (Reeh et al., 2003).

У роботі (Lester et al., 1998) запропоновано вводити до матеріалу для корпусів світлодіодів *наночастинки*, що мають високий показник заломлення, наприклад оксидів магнію, титана, ітрію, цирконію, алюмінію, GaN , AlN , ZnO , ZnSe . Наночастинки, які вбудовані у первісний матеріал (як правило, полімер), не викликають розсіювання світла, якщо вони розподілені рівномірно та їх розмір набагато менше довжини хвилі випромінювання. Показник заломлення матеріалу з введеними наночастинками визначається наступним виразом:

$$\bar{n} = \frac{\bar{n}_{host} \cdot V_{host} + \bar{n}_{nano} \cdot V_{nano}}{V_{host} + V_{nano}}, \quad (10.1)$$

де V_{host} та V_{nano} — об'єми первісного матеріалу й наночастинок. При великій концентрації наночастинок показник заломлення матеріалу з вбудованими наночастинками може набагато перевищувати показник первісного матеріалу, що збільшує вихідний конус випромінювання світлодіода й підвищує його коефіцієнт оптичного виводу.

РОЗДІЛ 11. СВІТЛОДІОДИ ВИДИМОГО СПЕКТРУ

Спочатку світлодіоди застосовували там, де не вимагалось високої яскравості світіння, наприклад в якості індикаторних ламп. Їх використовували якщо ефективність та загальна оптична потужність не були параметрами першочергової важливості. Для інших застосувань, наприклад у світлофорах, де випромінювання світлодіода повинно бути видно з великої відстані навіть в яскравий сонячний день. В таких випадках потрібні світлодіоди, що мають високу ефективність та яскравість.

В цьому розділі будуть розглянуті світлодіоди як з низькою, так і з високою яскравістю. Там, де не потрібні висока яскравість, можуть використовуватись світлодіоди на основі GaAsP та GaAsP:N, що леговані азотом. Світлодіоди на основі AlGaAs застосовують у тих випадках, коли необхідна як низька, так і висока яскравість. У пристроях підвищеної яскравості використовуються світлодіоди на основі AlInGaP та InGaN.

11.1. Світлодіоди на основі твердих розчинів GaAsP, GaP, GaAsP:N і GaP:N

Тверді розчини $\text{GaAs}_{1-x}\text{Px}$, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P:N}$ застосовують у пристроях, що випромінюють у червоній, оранжевій, жовтій та зеленій областях видимого спектру. Оскільки шари GaAsP й підкладки з GaAs мають різні параметри кристалічних решіток, світлодіоди на їх основі мають порівняно низький внутрішній квантовий вихід випромінювання. Вони застосовуються тільки там, де не потрібна висока яскравість світіння.

Одні з перших світлодіодів видимого спектру були створені на основі твердого розчину $\text{GaAs}_{1-x}\text{Px}$ (Holonyak, Bevacqua, 1962; Holonyak et al., 1963, 1966; Pilkuhn, Rupprecht, 1965; Nuese et al., 1966; Wolfe et al., 1965). На початку 1960 рр. підкладки з GaAs вже випускалися серійно. Технологія об'ємного вирощування підкладок з GaAs з'явилася у 1950 рр., а у 1960 рр. були розроблені методи епітаксialного вирощування шарів з газової та рідинної фази. При введенні фосфору до GaAs отримано трійний твердий розчин $\text{GaAs}_{1-x}\text{Px}$, або коротко GaAsP. GaAs випромінює в інфрачервоній області на довжині хвилі 870 нм; додавання фосфору збільшує ширину забороненої зони та зсуває спектр випромінювання у видиму область, яка починається приблизно з 750 нм. Тому для випромінювання світлодіодів видимого спектру достатньо невеликої кількості фосфору. Але слід відзначити, що на краю видимої частини спектру людське око має досить низьку чутливість.

Великою проблемою світлодіодів на основі GaAsP є неузгодження параметрів решіток підкладок GaAs та епітаксialних шарів GaAsP. Вони різняться майже на 3,6%, тому при товщині шару GaAsP на підкладці GaAs більше деякої критичної виникають дислокації невідповідності. При збільшенні концентрації фосфору у твердому розчині GaAsP ефективність люмінесценції значно знижується. Тому світлодіоди GaAsP мають невисоку яскравість світіння.

При вивченні твердих розчинів GaAsP виявлено, що неузгодженість решіток підкладок GaAs і епітаксціальних шарів GaAsP знижує ефективність випромінювання. Також було виявлено, що ефективність випромінювання активного шару сильно залежить від умов вирощування та особливо від товщини буферного шару GaAsP (Nuese et al., 1969). Товстий буферний шар знижує густину дислокацій за рахунок усунення дислокацій невідповідності. Але й при цьому густина дислокацій залишається вище, ніж у підкладках GaAs, і тому залишається вельми суттєвою навіть у структурах з товстими буферними шарами GaAsP.

На рис. 11.1 показані зонні діаграми GaAs, GaAsP і GaP. Видно, що GaAsP при низькій молярній частці фосфору є прямозонним напівпровідником. Коли частка фосфору перевищує 45-50%, напівпровідник стає непрямоzonним, що приводить до різкого падіння зовнішнього квантового виходу (Holonyak et al., 1963, 1966). Непрямоzonний напівпровідник GaP мало придатний для використання в якості ефективного матеріалу для світлодіодів.

Світлодіоди з GaAsP та GaP часто легують ізоелектронними домішками, наприклад азотом (Gimmeiss, Scholz, 1964; Logan et al., 1967a, 1967b, 1971; Craford et al., 1972; Groves, Epstein, 1977; Groves et al., 1978a, 1978b)). Такі домішки формують всередині забороненої зони напівпровідника оптично активні рівні, і рекомбінація носіїв через ці рівні відбувається з випромінюванням фотона, тобто стає випромінювальною, що показано на рис. 11.1.

Світлодіоди, леговані ізоелектронними домішками, становлять цікавість і з фундаментальної точки зору. Вони є одним з важливих практичних застосувань принципу невизначеності Гейзенберга. Хвильові функції електронів на ізоелектронних домішках сильно локалізовані у просторі, тобто мають малу невизначеність координати Δx . Отже, ці хвильові функції делокалізовані у просторі квазіімпульсів (велика невизначеність Δp). Оскільки енергетичні рівні домішок мають невизначеність, існує велика ймовірність того, що один з двох вертикальних переходів через домішковий центр є випромінювальним. З фізичної точки зору це означає, що при непрямому міжзонному переході електрона з X-долини зони провідності у центральну Γ -долину валентної зони відбувається зміна квазіімпульсу, яка передається атому ізоелектронного домішку.

На рис. 11.2 показана залежність максимуму енергії випромінювання від хімічного складу нелегованого $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, легованого азотом (Craford et al., 1972). Видно, що енергія випромінювання легованого й нелегованого GaAsP завжди нижче значень ширини забороненої зони напівпровідника (приблизно на 50-150 меВ). У результаті цього у структурах, що леговані азотом, перепоглинання випромінювання забезпечить вельми меншу роль, ніж у світлодіодах, в яких діє міжзонна випромінювальна рекомбінація. У цьому й полягає основна перевага світлодіодів, що леговані ізоелектронними домішками.

У роботах (Groves et al., 1978a, 1978b) було показано, що ця перевага світлодіодів стає явною, якщо азотом легується тільки активна область. У цьому випадку легується сам р-n-перехід та області, що до нього примикають

на відстані дифузійних довжин носіїв. Інші області - бар'єрні шари та шари розтікання струму азотом не легуються. Тому перепоглинання світла ізоелектронними домішками обмежено вузькою зоною активного шару. Для світлодіодів на основі GaP:N, в яких азотом легована тільки активна область, зовнішній квантовий вихід випромінювання може досягати декількох відсотків.

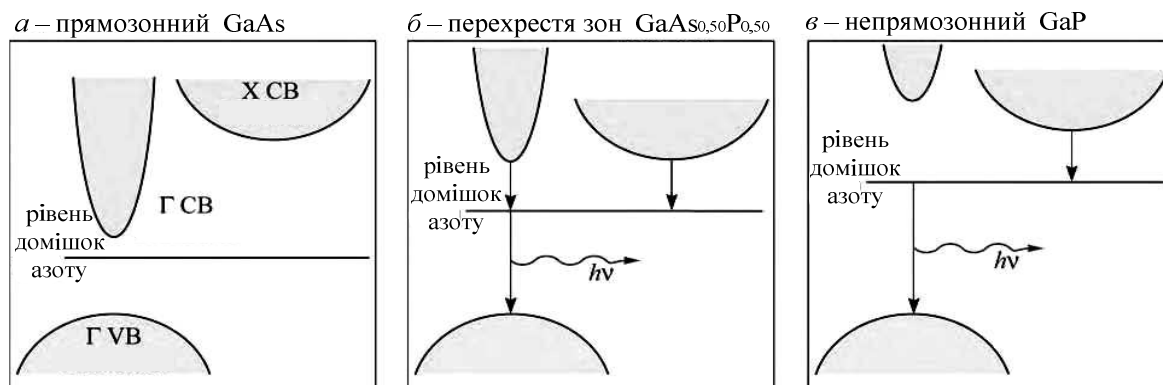


Рис. 11.1 - Схематичне зображення зонних структур GaAs, GaAsP та GaP. На схемі також показано рівень ізоелектронного домішку азоту. При молярній частці фосфору $x \approx 0,45-0,50$ відбувається перетворення зонної структури GaAsP: він стає непрямозонним напівпровідником. ГСВ - мінімум зони провідності у точці Г зони Брилюена, ХСВ - мінімум зони провідності у точці Х зони Брилюена, ГVB - максимум валентної зони у точці Г зони Брилюена

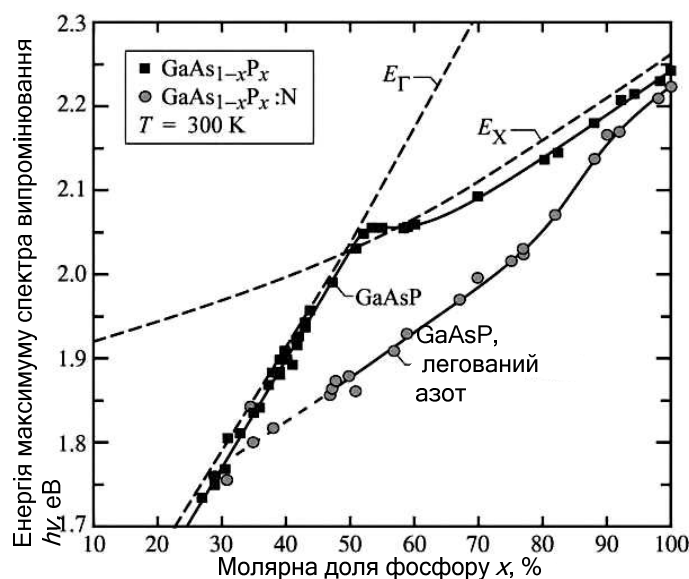


Рис. 11.2 - Залежність максимуму енергії випромінювання від хімічного складу нелегованого $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}$, легованого азотом, при густині струму інжекції 5 A/cm^2 та кімнатній температурі. Показані також значення ширини забороненої зони для прямих та непрямих міжзонних переходів. При $x \approx 50\%$ напівпровідник з прямозонного перетворюється на непрямозонний (Craford et al., 1972)

На рис. 11.3 показані залежності зовнішнього квантового виходу випромінювання нелегованих світлодіодів на основі GaAsP та СД з активною областю, що легована азотом, від молярної частки фосфору у трикомпонентному твердому розчині (Campbell, 1974). Видно, що ефективність легованих світлодіодів набагато вища, ніж нелегованих, в усьому діапазоні зміни хімічного складу.

Також відзначимо, що при зміні молярної частки фосфору x у діапазоні 40-60% ефективність світлодіодів на основі GaAsP знижується більше ніж на два порядки. Це пояснюється зміною типу міжзонних переходів у

напівпровіднику (з прямих на непрямі) та тим, що при високому вмісті фосфору збільшується густина дислокацій. При $x \approx 0,75$ зовнішній квантовий вихід випромінювання світлодіодів на основі GaAsP складає лише 0,002 %.

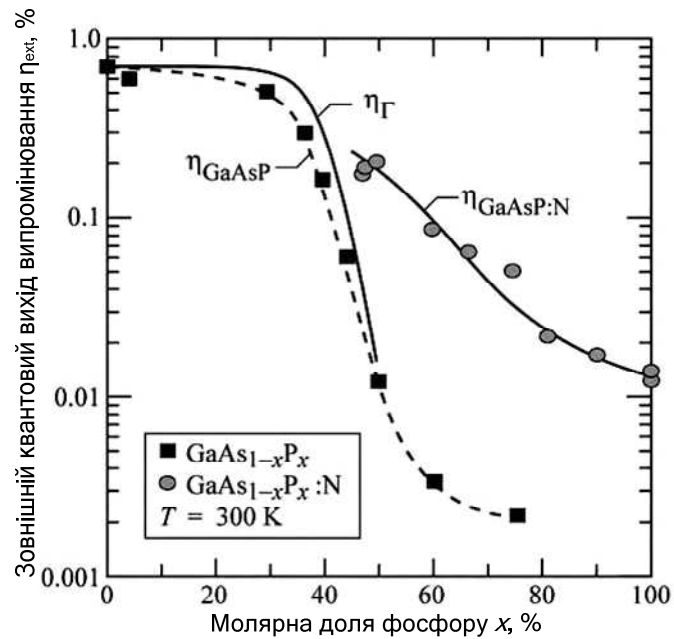


Рис. 11.3 - Експериментальні залежності зовнішнього квантового виходу випромінювання світлодіодів на основі GaAsP, що нелеговані та леговані азотом в активній області, від молярної частки фосфору. Тут також показані розрахункові дані по ефективності прямих міжзонних переходів (Γ) та переходів через рівні азоту (N) (суцільні лінії). Відмітимо, що у всьому діапазоні $x > 50$ ефективність переходів через оптично активні домішкові рівні вище, ніж у міжзонних переходів (Campbell et al., 1974)

На рис. 11.4 наведені залежності зовнішнього квантового виходу випромінювання світлодіодів на основі GaAsP, що нелеговані та леговані азотом в активній області, від довжини хвилі випромінювання. Видно, що ефективність легованих світлодіодів вище ефективності нелегованих особливо у діапазоні довжин хвиль, що відповідає оранжевій, жовтій та зеленій областям спектру (у цих діапазонах спостерігається підвищення ефективності у 2-5 разів). У червоній області ефективності обох типів світлодіодів практично співпадають.

На рис. 11.5 порівнюються зовнішні квантові виходи випромінювання світлодіодів GaAsP, що нелеговані й леговані азотом. Порівняння підтверджує, що ефективність легованих світлодіодів вища, ніж нелегованих, в усьому діапазоні зміни молярної частки фосфору.

Величина яскравості світлодіодів, що леговані ізоелектронними домішками типу азоту, обмежена *скінченою розчинністю* цих домішок. Наприклад, азот розчинимо у GaP до концентрацій порядку 10^{20} см^{-3} . Оскільки оптичні переходи через домішкові рівні протікають за коротке, але все ж скінчений час, граничний рівень концентрації азоту визначає величину максимального робочого струму, вище якої ефективність світлодіодів падає.

Промислово виготовлені світлодіоди зеленого світіння створюють на основі GaP, що легований азотом. Світлодіоди на основі GaP:N застосовують, в основному, як індикаторні лампи; їх неможливо вбудовувати у системи з високими вимогами до яскравості світіння та застосовувати їх для роботи в умовах яскравого зовнішнього освітлення, наприклад при яскравому сонячному світлі. Для таких застосувань потрібні світлодіоди зеленого світіння з InGaP, які мають високу яскравість.

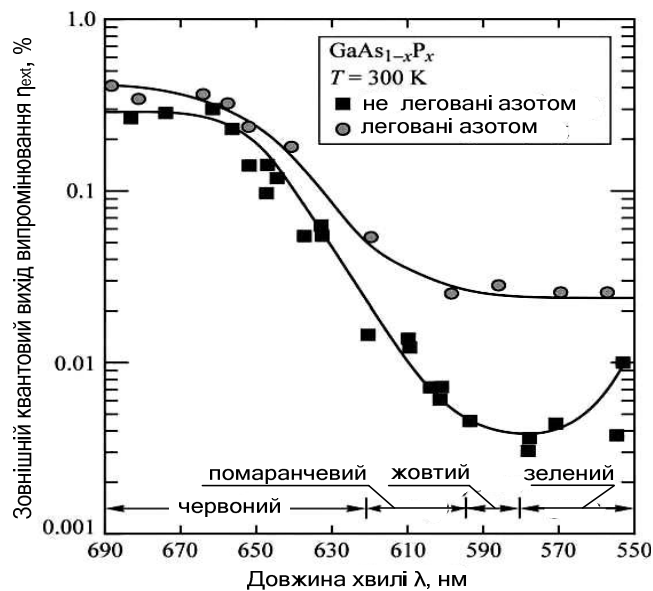


Рис. 11.4 - Залежності зовнішнього квантового виходу випромінювання світлодіодів на основі GaAsP, що нелеговані та леговані азотом, від довжини хвилі випромінювання (Groves et al., 1978a, 1978b)

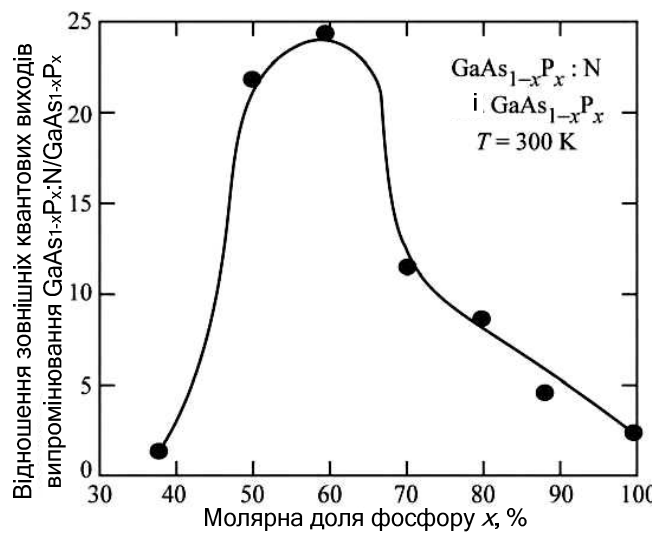


Рис. 11.5 - Відношення зовнішніх квантових виходів випромінювання світлодіодів з GaAsP, що нелеговані та леговані азотом, у всьому діапазоні зміни молярної частки фосфору при 300 К (Groves et al., 1978a, 1978b)

11.2. Світлодіоди на основі AlGaAs/GaAs

Гетероструктури $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ були розроблені у 70-тих роках, а на початку 80-х років на їх основі були реалізовані перші світлодіоди, з високою яскравістю світіння (Steranka, 1997). Оскільки алюміній та галій мають вельми близькі атомні радіуси ($1,82\text{\AA}$ і $1,81\text{\AA}$), система $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (або просто AlGaAs) залишається узгодженою за параметрами решітки з підкладкою GaAs в усьому діапазоні зміни молярної частки алюмінію у трикомпонентному складі. На рис. 11.6 показані значення ширини забороненої зони та сталих решіток деяких напівпровідників типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ та їх три- та чотирикомпонентних твердих розчинів. Видно відсутність залежності між сталою решітки та молярною часткою алюмінію (Tien, 1988).

На рис. 11.7 подана залежність ширини забороненої зони $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ від x – молярної частки алюмінію (Casey, Panish, 1978). Видно, що GaAs та $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ з молярною часткою $x < 45\%$ є *прямозонними* напівпровідниками, Г-долина зони провідності визначає її *самий нижній* енергетичний рівень. При $x > 45\%$ напівпровідник стає *непрямозонним*, та *мінімум* зони провідності визначає Х-долина.

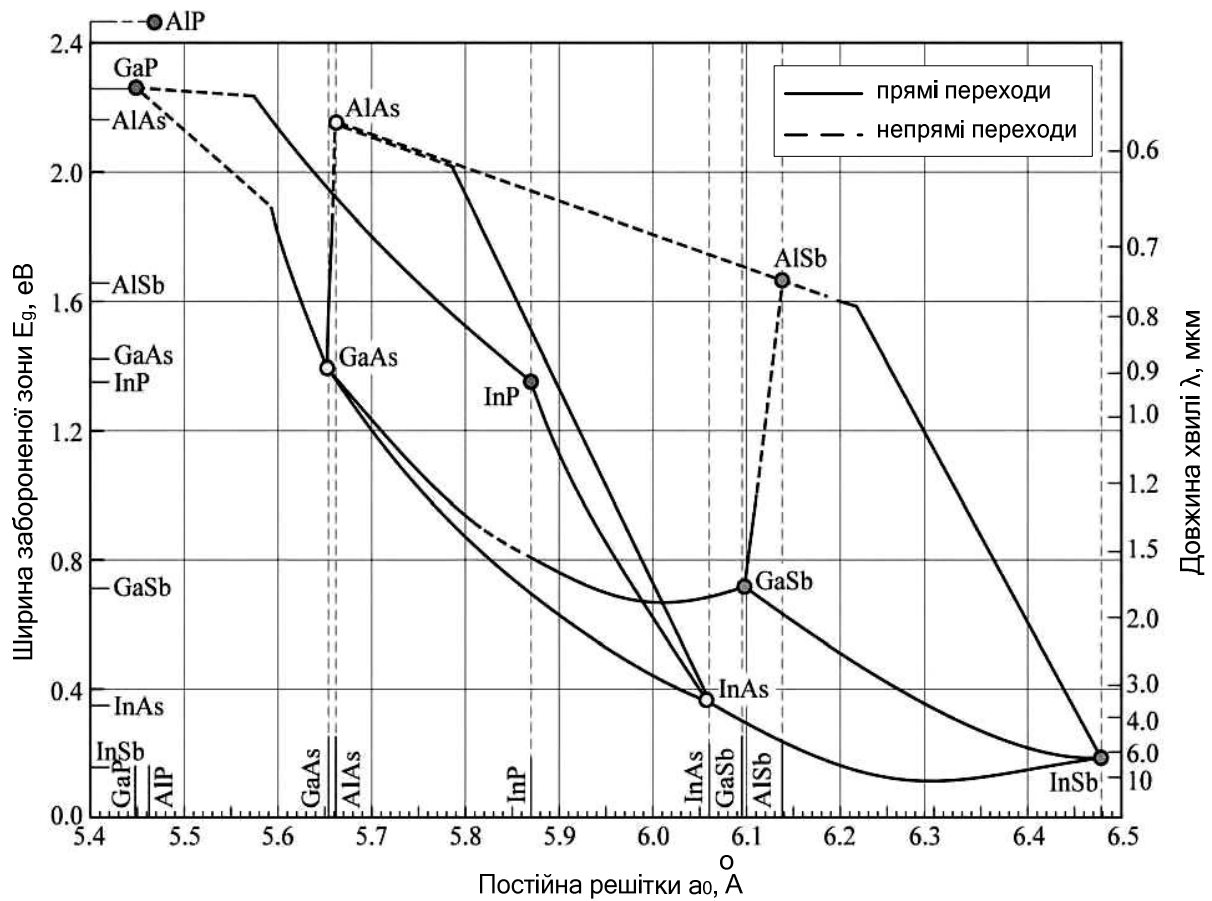


Рис. 11.6 - Заборонені зони й значення сталих решіток деяких напівпровідників типу $A^{III}B^V$ при кімнатній температурі (Тієн, 1988)

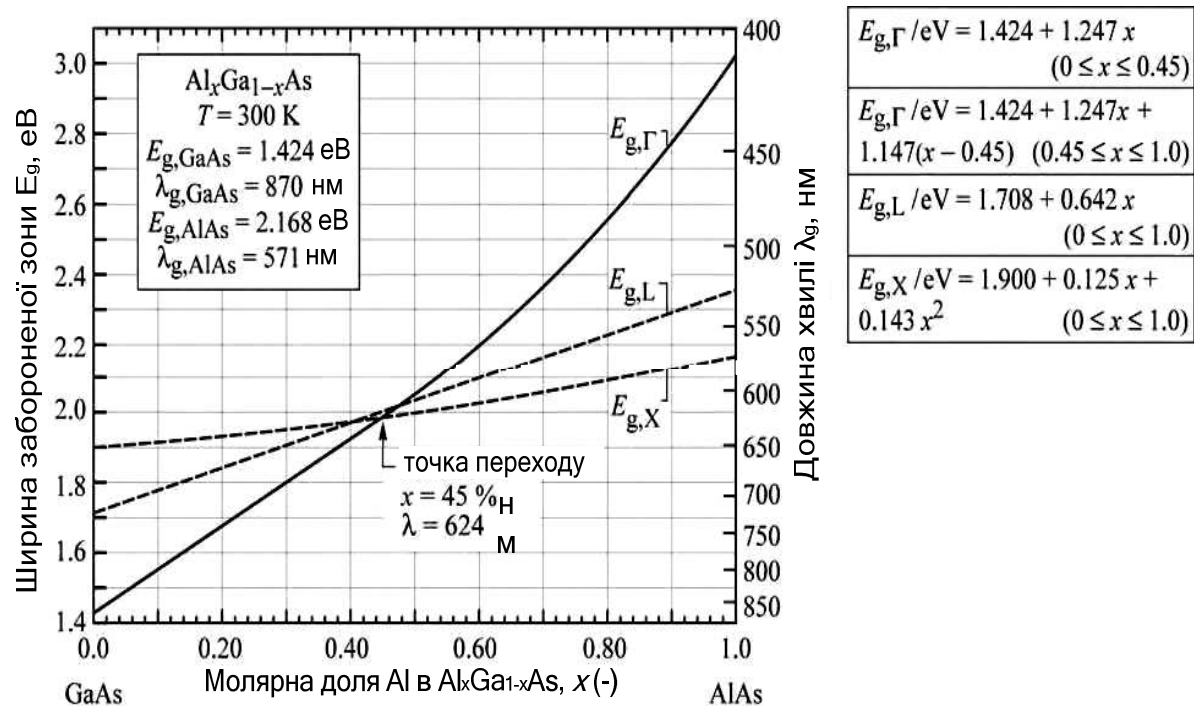


Рис. 11.7 - Залежність ширини забороненої зони та довжини хвилі випромінювання $Al_xGa_{1-x}As$ від молярної частки Al при кімнатній температурі. $E_{g\Gamma}$ відповідає прямому переходу, E_{gL} та E_{gX} - непрямым переходам у Γ , L та X точках зони Брилюєна (Casey, Panish, 1978)

Систему AlGaAs можна використовувати для виготовлення надяскравих світлодіодів червоного світіння. AlGaAs стає непрямозонним на довжинах хвиль $\lambda < 621$ нм. Із-за цього у точці перетину зон квантовий вихід випромінювання помітно знижується. Для підтримання високої ефективності світлодіодів енергія випромінювання у цій точці, повинна бути на декілька $k_B T$ менше ширини забороненої зони.

Розробляються ефективні світлодіоди червоного світіння на основі AlGaAs наступних типів:

- з об'ємними активними шарами,
- з активними областями у вигляді квантових ям $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$,
- з активними областями у вигляді подвійних гетероструктур:



Об'ємні активні шари позбавлені достоїнств гетероструктур та не застосовуються для виготовлення над'яскравих світлодіодів. На рис. 12.8 схематично показані зонні діаграми активних областей світлодіодів червоного світіння на основі AlGaAs: з квантовою ямою $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, що використовуються для збільшення енергії випромінювання (а) та з подвійною гетероструктурою $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{x-y}$ (б), де AlGaAs використовується для побудови і бар'єрних шарів, і квантової ями. Недоліком активних областей першого типу є мала товщина шарів GaAs, що обмежені бар'єрами $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

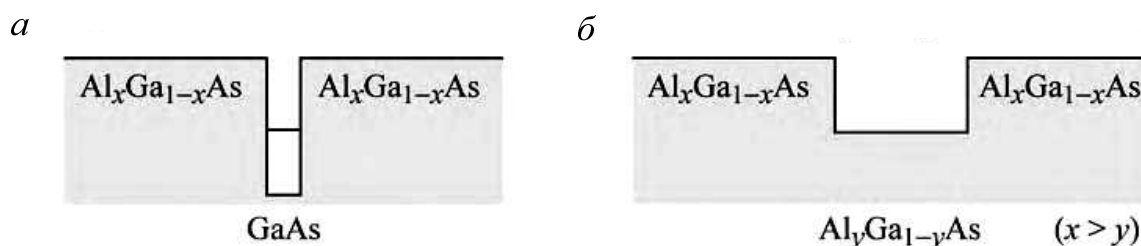


Рис. 11.8 - Зонні діаграми структур AlGaAs/GaAs, що випромінюють світло у червоній спектральній області:

а — структура AlGaAs/GaAs на основі квантової ями, яка створена у вигляді тонкого шару GaAs; б - подвійна гетероструктура AlGaAs/AlGaAs з активним шаром AlGaAs

Вертикальний перенос у структурах з багатьма квантовими ямами (БКЯ) може приводити до нерівномірного розподілу носіїв у активній області з БКЯ, якщо тільки бар'єри не занадто тонкі. Тому для створення яскравих світлодіодів віддається перевага активним областям з подвійними гетероструктурами $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{x-y}$.

Світлодіоди на основі AlGaAs/GaAs виготовляють у вигляді гомогенних структур, одиночних та подвійних гетероструктур (Nishizawa et al., 1983). Самі ефективні світлодіоди червоного світіння на основі AlGaAs вирощують на прозорих підкладках, вони мають подвійну гетероструктуру (Ishiguro et al., 1983; Steranka et al., 1988; Ishimatsu, Okuno, 1989). Такі світлодіоди вирощуються на тимчасових підкладках GaAs і складаються із товстого (~ 125 мкм) нижнього бар'єрного шару $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ з молярною часткою $x_{\text{Al}} > 60\%$, активного шару $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ з $x_{\text{Al}} = 35\%$ (для діодів червоного світіння) та верхнього бар'єрного шару, який аналогічний нижньому. Для світлодіодів

інфрачервоного діапазону молярна частка алюмінію в усіх шарах буде нижче. По закінченні епітаксiального вирощування потрібної структури поглинаюча підкладка GaAs вилучається методами шліфовки та селективного рідинного травлення. Яскравість світлодіодів AlGaAs з подвійними гетероструктурами, що вирощені на прозорих підкладках, більше ніж у два рази вища, ніж у аналогічних світлодіодів на поглинаючих підкладках (Steranka et al., 1988).

У 80-тих роках світлодіоди на основі AlGaAs на прозорих підкладках вирощували методом епітаксії з рідинної фази. Це дозволяє з високою швидкістю вирощувати товсті шари AlGaAs високої якості з великим вмістом алюмінію, тому метод придатний для серійного виробництва (Ishiguro et al., 1983; Steranka et al., 1988; Ishimatsu, Okuno, 1989). Світлодіоди на основі AlGaAs/GaAs на поглинаючих підкладках можуть бути також вирощені методом епітаксії з газової фази металоорганічних сполучень (Bradley et al., 1986). Але швидкість вирощування кристалів цим методом значно нижча, ніж методом рідинної епітаксії, тому що за його допомогою важко отримувати товсті шари, які необхідні для створення світлодіодів. Перші надяскраві світлодіоди, що застосовувались в індикаторних лампах світлофорів та сигнальних лампах гальмування автомобілів, які повинні бути чітко розрізняваними в умовах яскравого зовнішнього освітлення, були вирощені на прозорих підкладках та вміщували подвійні гетероструктури AlGaAs.

Надійність світлодіодів на основі AlGaAs завжди нижча, ніж на основі AlInGaP без шарів AlGaAs. Високий вміст алюмінію у шарах AlGaAs є причиною їх окислення та корозії, що значно знижує строк служби пристроїв, в яких вони застосовуються. Відмічалось (Dallesasse et al., 1990), що гетероструктури AlGaAs/GaAs руйнуються через процеси гідролізу. Тріщини, розколи та пори були виявлені у товстих ($> 0,1$ мкм) шарах AlGaAs з високим вмістом алюмінію ($\sim 85\%$) після тривалого перебування у нормальних умовах. Також відмічено цікавий факт: дуже тонкі шари AlGaAs (~ 20 нм) більш стійкі, ніж товсті шари, навіть якщо вміщують до 100% Al. Для запобігання процесів окислення та гідролізу шарів AlGaAs необхідно використовувати герметичні корпуси. У роботі (Steranka et al., 1988) стверджується, що після випробувань у досить сурових умовах прискореного старіння (світлодіоди протягом 1000 г працювали при температурі 55°C та струмі інжекції 30 мА) частина світлодіодів на основі AlGaAs промислового виготовлення вийшла з ладу. Але у другій частини світлодіодів не було виявлено ніяких слідів руйнування. Такі результати говорять про необхідність строгого контролю процесів виготовлення та монтажу світлодіодних пристроїв.

11.3. Світлодіоди на основі AlInGaP/GaAs

Тверді розчини AlInGaP були розроблені в кінці 80-тих та – початку 90-тих років; в наш час вони є основою для виготовлення над'яскравих світлодіодів, випромінюють у довгохвильовій частині видимого спектру, тобто, у червоному, оранжевому та жовтому діапазонах. Твердий розчин AlInGaP та світлодіоди на його основі описані у роботах (Stringfellow, Craford,

1997; Chen et al., 1997; Kish, Fletcher, 1997, а більш пізні огляди та останні розробки наведені у роботах (Mueller, 1999, 2000; Krames et al., 2002).

На рис. 11.9 показана залежність ширини забороненої зони та відповідних довжин хвиль від значень сталих решіток AlInGaP (Chen et al., 1997). AlInGaP може бути узгоджений за параметрами решітки з GaAs. Замінивши атоми As у решітці GaAs на *менші* атоми P, а частину атомів Ga - на *більші* атоми In, отримаємо твердий розчин InGaP (частковий випадок $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{P}$), узгоджений за параметрами решітки з GaAs. Оскільки радіуси атомів Al та Ga приблизно рівні, твердий розчин $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ також буде узгоджений з GaAs

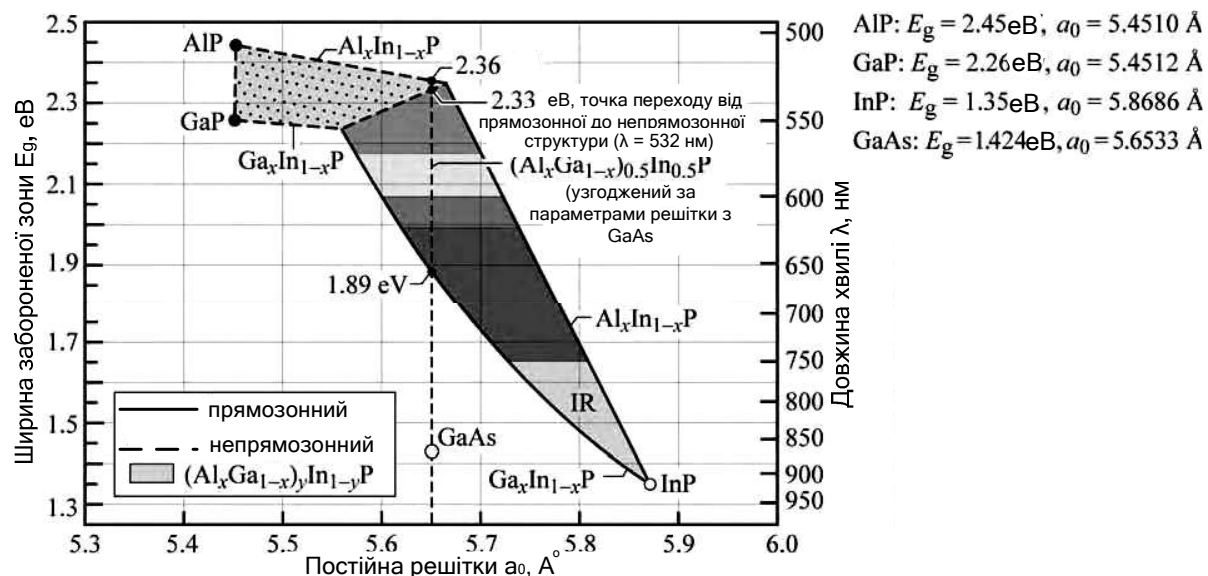


Рис. 11.9 - Залежність ширини забороненої зони та відповідних їй довжин хвиль від значень сталих решіток $(\text{AlGa}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ при 300 К. Штрихова вертикальна лінія відповідає $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ узгодженому за параметрами решіток з GaAs (Chen et al., 1997)

У роботі (Chen et al., 1997) відмічалось, що при $x < 0.5$ $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ є прямозонним напівпровідником, а при $x > 0.5$ - непрямозонним. У точці перетину $x=0.5$, ширина забороненої зони дорівнює 2,33 еВ, що відповідає довжині хвилі 532 нм. Киш і Флетчер (Kish, Fletcher, 1997) на основі даних Принса та ін. (Prins et al., 1995) були зроблені висновки, що $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ прямозонний напів-провідник при $x_{\text{Al}} < 0.53$. На рис. 11.10 наведена залежність ширини забороненої зони від молярної частки алюмінію у складі $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ (Prins et al., 1995; Kish, Fletcher, 1997).

При $x < 0.53$ мінімум ширини забороненої зони знаходиться у Г-точці зони провідності, тому напівпровідник прямозонний; при $x > 0.53$ мінімум ширини забороненої зони знаходиться у Х-мінімумі зони провідності, і напівпровідник стає непрямозонним. У точці перетину $x=0.53$ довжина хвилі випромінювання приблизно дорівнює 555 нм. Реальна довжина хвилі у точці перетину може бути дещо іншою у силу зміни степені упорядкованості атомів, які входять до складу конкретного матеріалу (Kish, Fletcher, 1997).

На рис. 11.11 показана діаграма, що складається з ліній, які відповідають значенням сталих решіток та довжинам хвиль випромінювання (а, значить, і

ширинам забороненої зони) для твердих розчинів AlInGaP (Chen et al., 1997). Представлені на діаграмі значення ширини забороненої зони та положення точки перетину Г-Х, небагато відрізняються від представлених на рис. 11.10, що може бути викликано різною ступеню упорядкованості атомів у решітках AlInGaP. Упорядкування кристалічних решіток приводить до зменшення ширини забороненої зони на величину до 190 меВ (Kish, Fletcher, 1997).

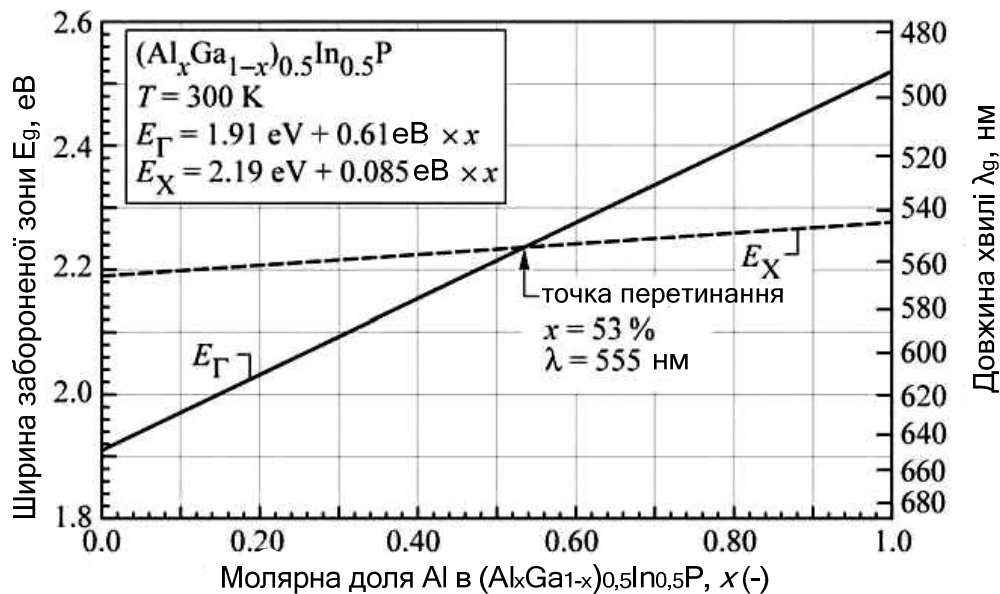


Рис. 11.10 - Залежність ширини забороненої зони та довжини хвиль випромінювання від молярної частки Al у складі AlInGaP з неупорядкованими атомами; склад узгоджено за параметром решітки з GaAs. При кімнатній температурі E_{Γ} відповідає прямим міжзонним переходам, а E_X - непрямым переходам у Г та Х точках зони Брилюєна (Prins et al., 1995; Kish, Fletcher, 1997)

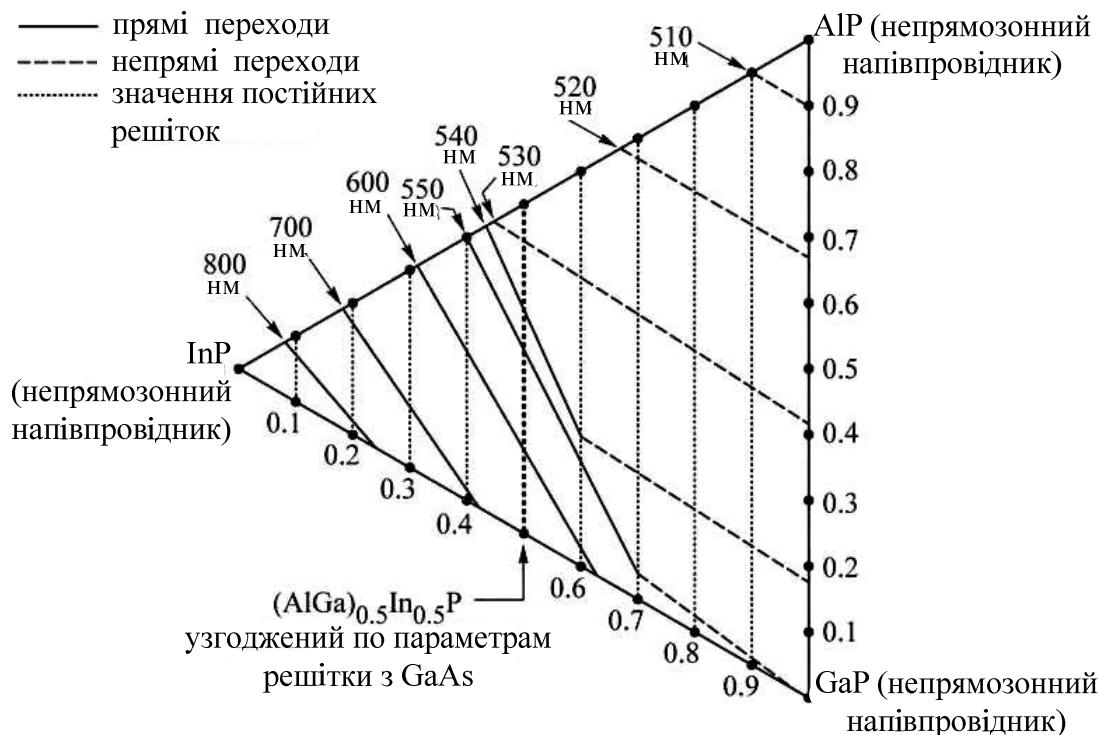


Рис. 11.11 - Діаграма значень сталих решіток (вертикальні лінії) та довжин хвиль випромінювання для системи матеріалів AlInGaP (Chen et al., 1997)

Твердий розчин AlInGaP підходить для створення над'яскравих світлодіодів, що випромінюють у червоному, оранжевому та жовтому діапазонах видимого спектру. При зміні складу у точці перетину екстремумів Г-Х, властивості AlInGaP змінюються, він стає непрямозонним напівпровідником, ефективність його випромінювання помітно знижується. Для високої ефективності світлодіодів поблизу точки перетину енергія випромінювання повинна бути менше ширини забороненої зони на декілька $k_B T$.

11.4. Світлодіоди на основі InGaN

Твердий розчин InGaN з'явився на початку 90-х років, а у другій половині 90-х років на його основі уже були створені промислові світлодіоди, що випромінюють у синьому та зеленому діапазонах спектру. Зараз світлодіоди на основі InGaN - основні над'яскраві світлодіоди синього та зеленого світіння. У ряді робіт (Nakamura, Fasol, 1997; Strite, Morkoc, 1992) описані тверді розчини InGaN та надано огляд властивостей світлодіодів на їх основі.

Саме вражає у цих матеріалах - висока ефективність випромінювальної рекомбінації незважаючи на високу концентрацію проникаючих дислокацій в епітаксialьних плівках InGaN/GaN , які виникають із-за невідповідності решіток цих шарів та підкладок із сапфіру або SiC . Типові значення густини проникаючих дислокацій лежать у діапазоні 10^7 - 10^9 см^{-2} .

У твердих розчинах на основі арсенідів та фосфідів III групи подібні концентрації дислокацій невідповідності катастрофічно вплинули б на ефективність випромінювальної рекомбінації. Відсутність таких серйозних наслідків у InGaN до кінця не в'яснено і сьогодні. Припускається, що воно обумовлено малою дифузійною довжиною дірок та низькою електричною активністю дислокацій.

Друге припущення: через флуктуації індію у InGaN носії локалізуються у потенціальних ямах, що заважає їм досягати дислокацій. Очевидно, що велика частина актів випромінювальної рекомбінації обумовлена носіями, що локалізовані у потенціальних ямах. Хоча фізичні механізми, що пояснюють високу випромінювальну ефективність систем на основі InGaN , до кінця ще не вивчені, ясно, що вплив дислокацій невідповідності на оптичні властивості цих систем не такий великий, як у системах на основі арсенідів та фосфідів III групи.

На рис. 11.12 показана залежність ширини забороненої зони та відповідних довжин хвиль від значень сталих решіток, графіки побудовані для сімейства матеріалів на основі нітридів III групи. Видно, що теоретично InGaN підходить для створення світлодіодів, які працюють у всіх діапазонах довжин хвиль видимого спектру. Але виявилось, що виростити високоякісні шари InGaN з високим вмістом індію дуже важко. Одна з причин цього полягає у випаровуванні індію з вирощеної поверхні. Тому тепер тверді розчини InGaN застосовують тільки для виготовлення світлодіодів ультрафіолетового, голубого та зеленого світіння і дуже рідко для більш довгих хвиль.

До 2002 р. вважалось, що ширина забороненої зони InN дорівнює 1,9 еВ. Але було показано (Wu et al., 2002a, 2002b), що ширина забороненої зони InN

за даними люмінесценції нижче цього значення, вона лежить в інтервалі 0,7-0,8 еВ. Дослідження люмінесценції також показали, що для забороненої зони InN при підвищенні температури характерний незвичний зсув у короткохвильову область.

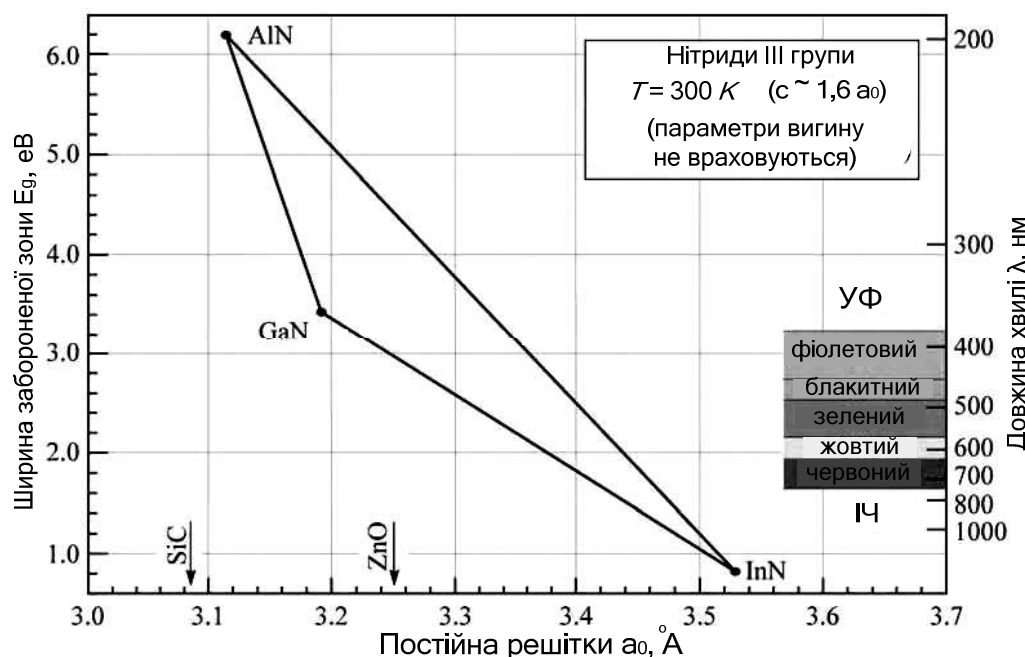


Рис. 11.12 - Залежність ширини забороненої зони та відповідних довжин хвиль від сталого решітки для нітридів III групи при 300 К

11.5. Основні характеристики над'яскравих світлодіодів

Темпи підвищення світлової віддачі світлодіодів видимого спектра вражають. Їх можна порівняти з темпами розробки кремнієвих інтегральних схем, швидкість покращення характеристик яких підкоряється "закону Мура", згідно до якого продуктивність цих мікросхем подвоюється приблизно кожні 18 міс.

На рис. 11.13 показані етапи збільшення світлової віддачі світлодіодів видимого спектру (Craford, 1997, 1999). Можна бачити скромні початкові темпи розвитку технології виготовлення світлодіодів видимого спектру в 60-х роках. Якщо з 1960 р. по 2000 р. покращення світлової віддачі йшло поступово, то після 2000 р. воно подвоювалось кожні чотири роки. На рис. 12.13 наведені наступні типи світлодіодів.

- Світлодіоди на основі GaAsP, що вирощені на підкладках GaAs. Оскільки параметри решіток GaAsP та GaAs не узгоджені, в епітаксціальних шарах GaAsP виникає багато дислокацій невідповідності. Тому для світлодіодів цього типу характерні низькі значення світлової віддачі (~0,1 лм/Вт). Завдяки простоті епітаксціального вирощування та низькій вартості виготовлення світлодіоди червоного світіння на основі GaAsP випускаються до сих пір.
- Світлодіоди на основі GaP, що леговані домішками, які відіграють роль центрів випромінювальної рекомбінації. GaP без домішок є непрямозонним напівпровідником з низькою світловіддачею. Але при його легуванні ізоелектронними домішками типу азоту або при одночасному легуванні

цинком та киснем у забороненій зоні формуються домішкові центри, через які здійснюються акти випромінювальної рекомбінації. Такі світлодіоди випромінюють світло у зеленому та червоному діапазонах видимого спектру.

- Світлодіоди на основі гетероструктур GaAsP/GaAs, що леговані азотом, випромінюють у червоному діапазоні спектра. Ці світлодіоди мають низьку ефективність із-за великої кількості дислокацій невідповідності, що викликані невідповідністю параметрів решіток використовуваних матеріалів.
- Світлодіоди червоного світіння на основі гетероструктур AlGaAs/GaAs. До складу активних областей таких світлодіодів входять квантові ями GaAs.
- Світлодіоди червоного світіння з подвійними гетероструктурами на основі AlGaAs/AlGaAs. У цих світлодіодах застосовуються активні області AlGaAs та бар'єрні шари AlGaAs.
- Світлодіоди на основі гетероструктур AlInGaP/GaAs на поглинаючих підкладках GaAs.
- Світлодіоди на основі гетероструктур AlInGaP/GaP на прозорих підкладках GaP.
- Світлодіоди з кристалами у вигляді перевернутих зрізаних пірамід на основі AlInGaP/GaP зі світловою віддачею більше 100 лм/Вт (Krames et al., 1999).
- Світлодіоди на основі InGaN, що випромінюють у синьому та зеленому діапазонах спектра.

На рис. 11.13 також показана світлова віддача звичайних джерел світла: першої лампочки Едісона (1,4 лм/Вт) та ламп розжарювання з червоними та жовтими фільтрами. Видно, що сучасні світлодіоди значно перевершують лампи розжарювання з фільтрами.

На рис. 11.14 наведена залежність світловіддачі над'яскравих та деяких дешевих світлодіодів в залежності від довжини хвилі випромінювання (United Epitaxy Corp., 1999). Видно, що світлодіоди жовтого (590 нм, AlInGaP), оранжевого (605 нм, AlInGaP) та зеленого (525 нм, InGaN) світіння добре підходять для пристроїв з високою світловіддачею.

Той факт, що світлодіоди на основі AlInGaP темно-жовтого та оранжевого світіння мають високу світлову віддачу, частково пояснюється високою чутливістю людського ока у цьому діапазоні довжин хвиль. У зв'язку з тим, що максимальна чутливість ока відповідає довжині хвилі 555 нм, світлодіоди, які випромінюють зелене світло на цій хвилі, здаються яскравіше світлодіодів такої ж оптичної потужності, але працюючих у другому спектральному діапазоні.

Оскільки світлодіоди бурштинового світіння на основі AlInGaP мають високі значення світлової віддачі та недорогі у виробництві (за порівнянням зі світлодіодами зеленого світіння на основі InGaN), вони використовуються у пристроях, де потрібна висока яскравість та низька потужність споживання,

наприклад у системах освітлення дорожніх знаків. У 1980-х рр. пристрої освітлення знаків виготовляли на основі потужних ламп розжарювання, що живляться від електричного генератора, який отримував енергію від бензинового двигуна. Зараз такі пристрої на основі світлодіодів бурштинового світіння є енергозберігаючими, оскільки до них електроенергія поступає від акумуляторів, що заряджаються вдень сонячними батареями.

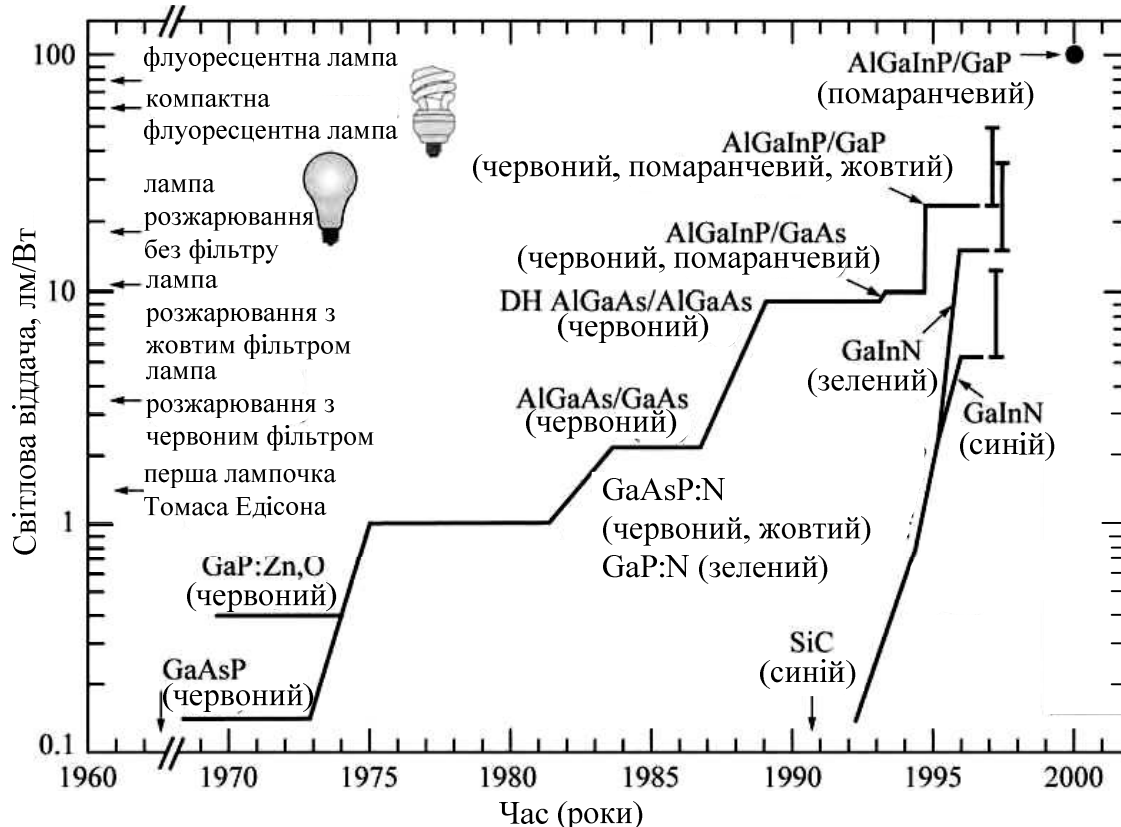


Рис. 11.13 - Зміна протягом часу світлової віддачі світлодіодів видимого спектру в порівнянні з іншими джерелами світла (Craford, 1997, 1999, 2000)

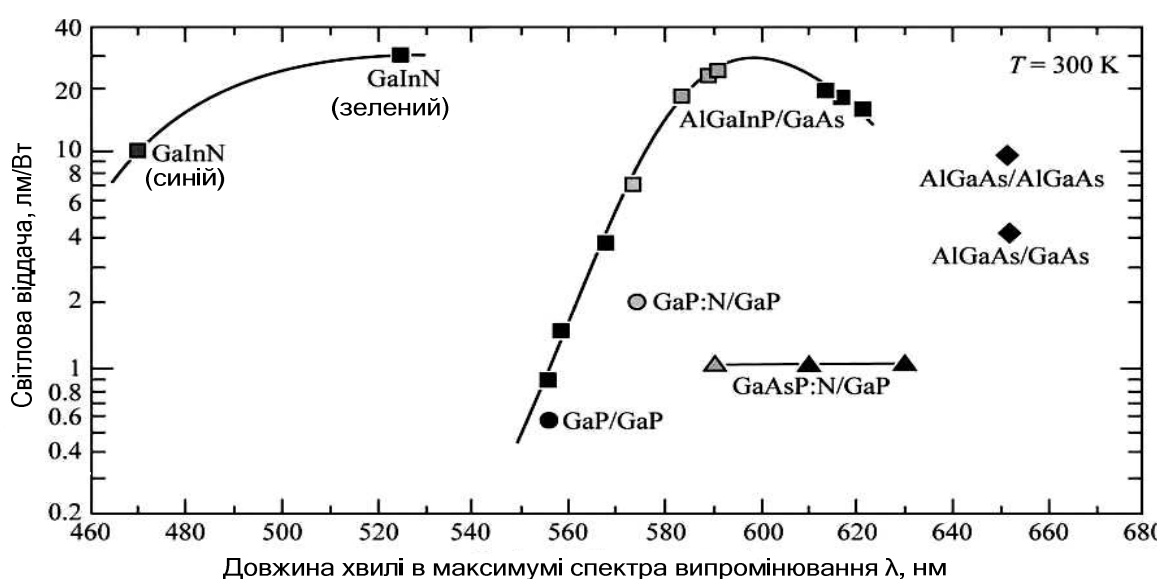


Рис. 11.14 - Світлова віддача світлодіодів видимого спектру випромінювання, що виготовлені з матеріалів на основі фосфідів, арсенідів і нітридів - сполучень типу $A^{III}B^V$ (United Epitaxy Corp., 1999, 2000)

На рис. 11.13 та рис. 11.14 також показані малопотужні та недорогі світлодіоди на основі GaAsP та GaP:N, які мають порівняно невисоку світлову віддачу. Через низький квантовий вихід випромінювання такі світлодіоди не підходять для систем, від яких вимагається висока яскравість світіння. Низький внутрішній квантовий вихід випромінювання світлодіодів GaAsP пояснюється невідповідністю параметрів решіток використовуваних матеріалів. Світлодіоди на основі GaP:N також характеризуються низькою ефективністю. Це пов'язано з природою випромінювальних переходів, які залежать від концентрації оптично активних домішок азоту.

Для багатьох практично важливих випадків, коли потрібен великий світловий потік, наприклад у пристроях освітлення дорожніх знаків, світлофорах та системах освітлення важливим параметром є не тільки *світлова віддача*, але й *повна потужність* випромінювання. Незважаючи на те, що високу світлову потужність легко забезпечити за допомогою ламп розжарювання, для цих цілей все частіше починають застосовувати пристрої на основі світлодіодів, які відрізняються низькою споживаною потужністю. На рис. 11.15 показана хронологія підвищення значень світлового потоку (у люменах), випромінюваного одним світлодіодом (Krames et al., 2000). Видно, що за 30 років ця характеристика збільшилась майже на чотири порядки.

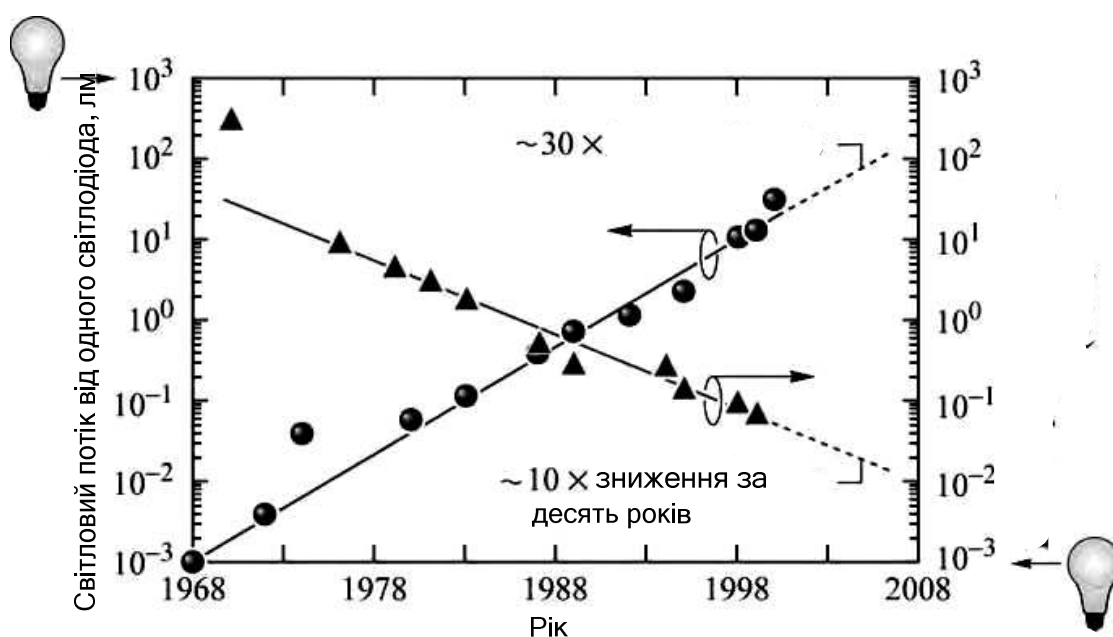


Рис. 11.15 - Хронологія підвищення значень світлового потоку від одного світлодіода та відповідного зниження вартості світлодіода в перерахунку на 1 лм. Для порівняння наведені значення для 60-ватних ламп розжарювання з вольфрамовою ниткою зі світловою віддачею 17 лм/Вт і світловим потоком 1000 лм приблизною вартістю 1,00 дол. США (Krames et al., 2000)

Для порівняння на рис. 11.15 наведені також дані про світловий потік та приблизна ціна для 60-ватної лампи розжарювання з вольфрамовою ниткою, що має світлову віддачу 17 лм/Вт та світловий потік 1000 лм. Порівняння показує, що якщо світлодіоди зможуть зайняти достойне місце на ринку освітлювальних пристроїв, буде постійно підвищуватись їх ефективність при

одночасному зниженні вартості. Відмітимо, що вартість, яка вказана на рис. 11.15, відповідає ціні лампи, в яку не входить вартість електрики, що споживається нею протягом строку служби. Якщо враховувати вартість споживаної електрики, яка для ламп розжарювання набагато вище ціни самої лампи, переваги світлодіодів стануть ще більш очевидними, незважаючи на їх високу початкову вартість.

11.6. Оптичні характеристики над'яскравих світлодіодів

На рис. 11.16 показані спектри випромінювання світлодіодів червоного світіння на основі AlInGaP , голубого та зеленого світіння на основі InGaN (Toyoda Gosey Corp., 2000). Видно, що спектр світлодіодів зеленого світіння значно ширший спектрів світлодіодів голубого та червоного світіння. Це може бути зв'язано з проблемами вирощування структур на основі InGaN з високим вмістом індію. Було виявлено, що у процесі вирощування шарів InGaN , особливо при високому вмісті індію, формуються нагромадження його атомів або створюються квантові точки.

Установлено, що утворення нагромаджень визначається умовами вирощування шарів).

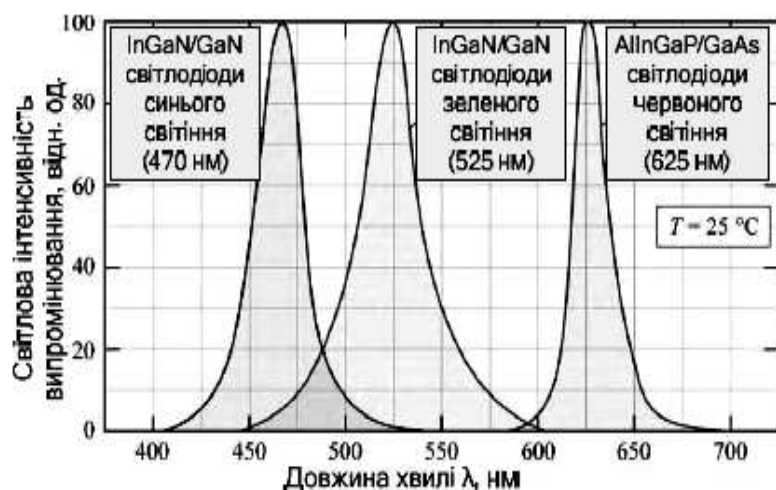


Рис. 11.16 - Спектри випромінювання світлодіодів червоного світіння на основі гетероструктур AlGaP/GaAs , синього та зеленого світіння на основі гетероструктур InGaN/GaN при кімнатній температурі (Toyoda Gosey Corp., 2000)

Активні області всіх світлодіодів, які представлені на рис. 11.16, складаються з *твердих розчинів напівпровідникових сполучень*. Збільшення ширини спектрів випромінювання відбувається за рахунок випадкових флуктуацій хімічного складу сполучень, що створюють активні області світлодіодів. Розширення спектральної лінії при цьому може перевищувати величину $1,8\text{кТ}$ - характерного теплового розширення спектрів.

На рис. 11.17 наведені потужності випромінювання світлодіодів різних типів у залежності від струму інжекції. Для ідеальних світлодіодів така залежність повинна бути лінійною з одиничним нахилом, тобто диференціальна квантова ефективність таких світлодіодів повинна бути рівною одиниці. Цій залежності відповідає штрихова лінія. Найбільш близькі до ідеальних світлодіоди на основі AlInGaP . Нахил залежності для світлодіодів зеленого світіння на основі InGaN далекі від одиниці, що пояснюється недосконалістю шарів InGaN , особливо при високих концентраціях індію.

На рис. 11.18 показані температурні залежності інтенсивності випромінювання світлодіодів різних типів. Видно, що інтенсивність випромінювання світлодіодів на основі нітридів III групи змінюються з температурою набагато слабше, ніж світлодіодів на основі AlInGaP. Це пояснюється наступним:

- *по-перше*, у широкозонних матеріалах на основі нітридів III групи потенціальний бар'єр між активним та бар'єрним шарами набагато вище, ніж в інших системах $A^{III}B^V$. Тому носіям важко подолати ці бар'єри, що значно знижує ймовірність витоку носіїв з активної області.
- *по-друге*, точка перетину зон (в якій напівпровідник перестає бути прямозонним та перетворюється у непрямозонний) для AlInGaP відповідає довжині хвилі 555 нм. При підвищенні температури зростає заселеність долин непрямих переходів, що призводить до зниження ефективності випромінювання.

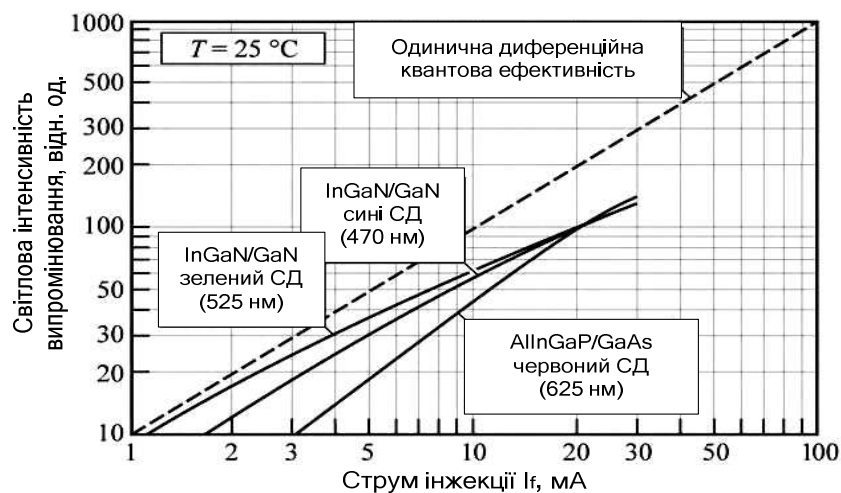


Рис. 11.17 - Залежність вихідної потужності випромінювання для світлодіодів червоного світіння на основі AlInGaP/GaAs та світлодіодів синього та зеленого світіння на основі InGaP/GaN від струму інжекції при кімнатній температурі (Toyoda Gosey Corp., 2000)

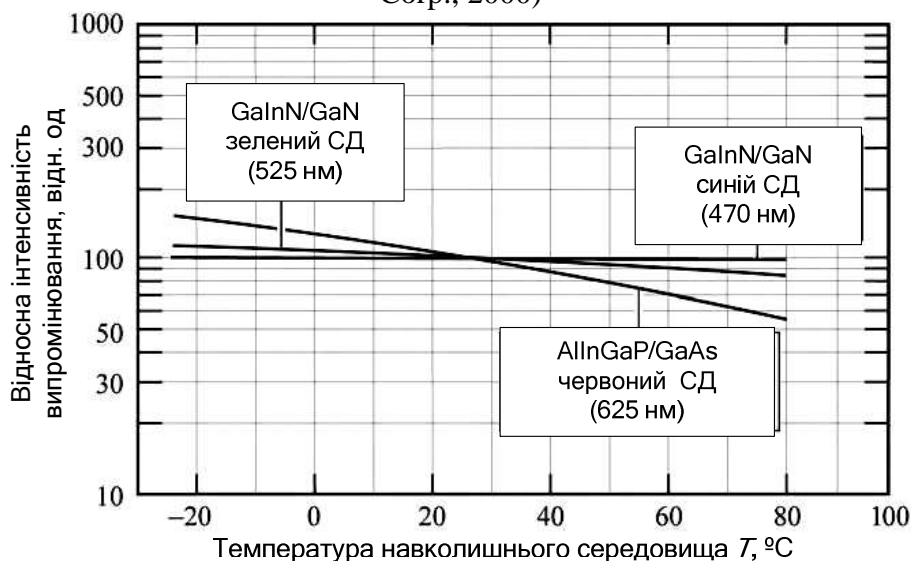


Рис. 11.18 - Залежність інтенсивності випромінювання від температури для світлодіодів червоного світіння на основі AlInGaP/GaAs, синього та зеленого світіння на основі InGaP/GaN (Toyoda Gosey Corp., 2000)

11.7. Електричні характеристики над'яскравих світлодіодів

На рис. 11.19 наведені вольтамперні характеристики світлодіодів червоного світіння на основі AlInGaP, а також світлодіодів голубого та зеленого світіння на основі InGaN у режимі прямого зміщення. Пряма залежність між пороговою напругою та інтенсивністю випромінювання свідчить про гарні робочі характеристики діодів. При струмі 1 мА напруга прямого зміщення світлодіодів зеленого та голубого світіння виявились близькими (2,65 В и 2,75 В), навіть незважаючи на помітну різницю в енергіях випромінювань (для світлодіодів голубого світіння $\lambda = 470$ нм, $h\nu = 2,64$ еВ, а для світлодіодів зеленого світіння $\lambda = 525$ нм, а $h\nu = 2,36$ еВ). Мала різниця напруг зміщення, можливо, указує на ймовірність того, що при інжекції носіїв в активну область InGaN через бар'єрний шар GaN частина з них втрачають енергію на випромінювання фонів. Втрати збільшуються при інжекції носіїв в активні шари InGaN з високою концентрацією індію для світлодіодів зеленого світіння. Енергія, яка витрачена на випромінювання фонів, поповнюється зовнішньою напругою, що подається на світлодіоди.

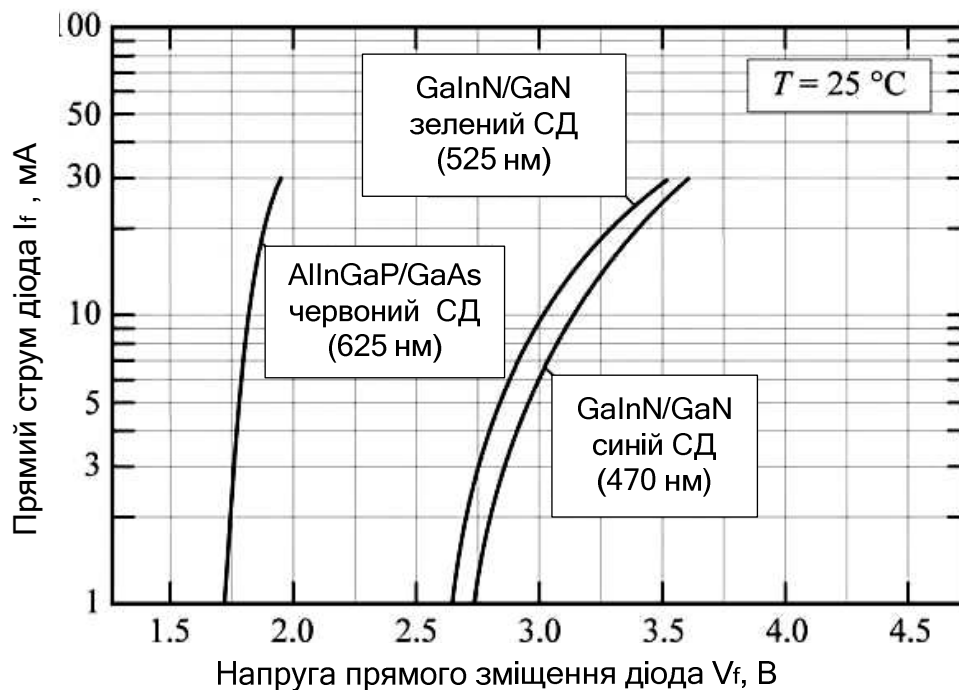


Рис. 11.19 - Вольтамперні характеристики світлодіодів AlInGaP/GaAs червоного світіння та світлодіодів InGaN/GaN синього й зеленого світіння у режимі прямого зміщення при кімнатній температурі (Toyoda Gosey Corp., 2000)

Послідовний опір діода визначається нахилом вольтамперної характеристики при великих струмах. Світлодіоди голубого та зеленого світіння мають більш високі значення послідовного опору, ніж світлодіоди червоного світіння.

Більший опір світлодіодів на основі InGaN пояснюється декількома причинами:

- «поперечним» опором буферних шарів n-типу, які вирощені на сапфірових підкладках;

- сильним ефектом поляризації, що характерний для сімейства матеріалів на основі нітридів;
- низькою провідністю р-типу в бар'єрних шарах;
- високим опором контактів р-типу.

Низька провідність р-типу виникає через високу енергію активації акцепторів (~ 200 меВ) у шарах GaN та InGaN, тому лише невелика частка акцепторів виявляється іонізованою та визначає концентрацію вільних дірок.

На рис. 11.20 показані температурні залежності напруги прямого зміщення діодів при струмі 30 мА. Для всіх діодів при підвищенні температури напруга прямого зміщення падає, що пов'язано зі зменшенням ширини забороненої зони. Зменшення послідовного опору світлодіодів зі зростанням температури є ще однією причиною зниження напруги зміщення у світлодіодах синього та зеленого світіння на основі InGaN. Це зменшення опору пояснюється підвищенням активності акцепторів при підвищенні температури, що збільшує провідність шарів GaN та InGaN р-типу.

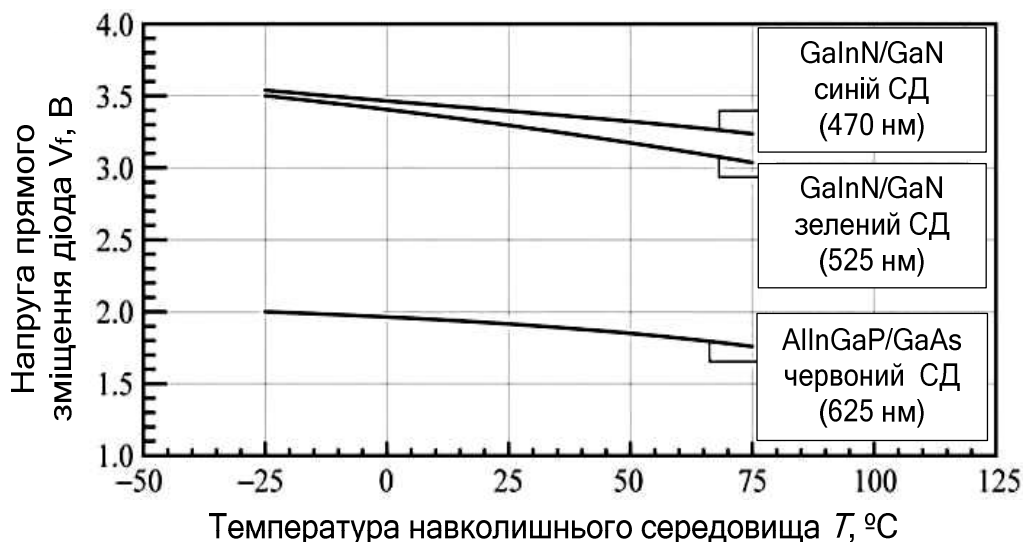


Рис. 11.20 - Температурні залежності напруги прямого зміщення світлодіодів червоного світіння на основі AlInGaP/GaAs, синього й зеленого світіння на основі InGaN/GaN при струмі 30 мА (Toyoda Gosey Corp., 2000)