

ОСОБЛИВОСТІ КВАНТОВОГО ВИХОДУ СВІТЛОДІОДІВ InGaN

Р.М. Вернидуб¹, О.І. Кириленко¹, Н.Ю. Павлова¹, Т.І. Мосюк¹,
Д.П. Стратілат², В.П. Тартачник²

¹ Український державний університет імені Михайла Драгоманова, Київ, Україна

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Світлодіоди (СД) на основі сполук групи III–V, зокрема InGaN, широко застосовуються в сучасній оптоелектроніці завдяки високій ефективності випромінювання, широкому спектральному діапазону та значному ресурсу використання. Особливу увагу в дослідженнях приділяють квантовому виходу, оскільки саме цей параметр характеризує ефективність перетворення електричної енергії у світлове випромінювання.

Квантовий вихід СД Q визначається як відношення кількості випромінених фотонів до кількості інжектованих носіїв заряду. Фактично він показує, яка частина електронів і дірок бере участь у випромінювальній рекомбінації.

Для СД на основі InGaN характерні високі значення зовнішнього квантового виходу, особливо в синій та зеленій ділянках спектра. Із літературних джерел відомо, що для синіх діодів на основі InGaN максимальні значення можуть сягати 25 – 40%, однак зі зростанням струму часто спостерігається явище «efficiency droop» – спаду ефективності при великих струмах [1].

Мета роботи – дослідити залежність квантового виходу СД на основі InGaN від струму та напруги для зразків з довжинами хвиль 370, 470, 505 та 525 нм, а також проаналізувати вплив проникного опромінення.

У роботі визначено залежності $Q = f(U)$ та $Q = f(I)$ для вихідних зразків СД.

Залежність квантового виходу від напруги $Q(U)$ показує, як змінюється ефективність джерела при збільшенні прикладеної напруги. Вона дозволяє визначити порогову область вмикання СД, оцінити напругу, при якій досягається максимальний квантовий вихід, а також проаналізувати електричні втрати та зміни якості p–n-переходу. Для СД з $\lambda = 470$ нм встановлено, що $Q(U)_{\max} = 27\%$.

Аналіз графічної залежності $Q(U)$ для СД InGaN з довжиною хвилі 470 нм показав існування чітко вираженої порогової області в межах напруг 2,4 – 2,5 В, після якої квантовий вихід різко зростає. Максимальне значення $Q(U)$ спостерігається при 2,6 – 2,7 В і становить 27%. Подальше збільшення напруги супроводжується поступовим зниженням квантового виходу, що може бути пов'язано зі зростанням безвипромінювальних втрат та локальним нагріванням активної області.

Графік залежності квантового виходу від струму $Q(I)$ – фізично інформативніший, бо показує, як змінюється ефективність випромінювання при зростанні рівня інжекції носіїв. На початковій ділянці квантовий вихід збільшується внаслідок переважання інтенсивності випромінювальної рекомбінації.

Для залежності $Q(I)$ максимум квантового виходу досягається при струмі порядку $(3 - 5) \cdot 10^{-3}$ А, після чого спостерігається монотонне падіння ефективності. Після досягнення максимуму спостерігається спад $Q(I)_{\max} = 26\%$, для $\lambda = 470$ нм. Такий характер $Q(I)$ – типовий для СД на основі InGaN і свідчить про посилення процесів безвипромінювальної рекомбінації при великих рівнях інжекції носіїв.

Основними причинами «efficiency droop», характерними для InGaN – СД можуть бути [1]: ожерекомбінація; витік електронів з активної області; безвипромінювальна рекомбінація; локальне перегрівання.

Аналогічні залежності $Q(U)$ та $Q(I)$ отримані для СД InGaN з довжинами хвиль 370, 505 та 525 нм. Для всіх досліджених зразків спостерігається подібний характер кривих: наявність порогової області, зростання квантового виходу до максимального значення та подальший його спад зі збільшенням струму.

Водночас величина та положення максимуму залежать від довжини хвилі випромінювання, що пов'язано з особливостями матеріалу активної області, шириною забороненої зони та ефективністю рекомбінаційних процесів.

Порівняльний аналіз показує, що СД різних спектральних діапазонів відрізняються значеннями максимального квантового виходу та положеннями максимуму $Q(U)$ і $Q(I)$. Останнє свідчить про вплив на довжину хвилі складу напівпровідникової структури InGaN і на ефективність випромінювальної рекомбінації.

Визначення квантового виходу дозволяє оцінити ефективність СД, порівнювати зразки з різними довжинами хвиль випромінювання, досліджувати вплив опромінення швидкими частинками, виявляти деградаційні процеси та прогнозувати робочий ресурс приладів.

Перспективи проведених досліджень полягають у можливості в майбутньому визначити величину радіаційної стійкості СД InGaN; встановити роль дози опромінення в рекомбінаційних процесах та її вплив на стабільність характеристик СД.

Висновки:

У результаті проведених вимірювань встановлено особливості залежності квантового виходу СД на основі InGaN від напруги та струму для зразків із довжинами хвиль 370, 470, 505 та 525 нм. Для всіх досліджених СД виявлено наявність порогової області, максимуму квантового виходу та його подальшого зменшення зі зростанням струму, яке відповідає явищу «efficiency droop», характерному для InGaN – структур. Для СД з довжиною хвилі 470 нм максимальні значення становлять 27% для залежності $Q(U)$ та 26% для залежності $Q(I)$. Отримані результати мають важливе значення для оцінювання ефективності роботи СД різних спектральних діапазонів, аналізу деградаційних процесів та подальшого дослідження впливу проникного випромінювання на опто-електронні характеристики.

1. A Review on Experimental Measurements for Understanding Efficiency Droop in InGaN-Based Light-Emitting Diodes. <https://doi.org/10.3390/ma10111233>