

*Хитоніна Тетяна,
студентка IV курсу, спеціальність «Фізика та математика».
Науковий керівник – Зіновчук А. В.,
кандидат фізико-математичних наук, доцент*

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ РЕКОМБІНАЦІЇ В НІТРИДАХ ГАЛІЮ ІЗ АНАЛІЗУ ВНУТРІШНЬОГО КВАНТОВОГО ВИХОДУ ЕЛЕКТРОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ

Внутрішнім квантовим виходом світлодіодів називають відношення числа генерованих світлових фотонів за 1с до числа інжекттованих в активну область світлодіода електронів за 1 сек. Це відношення характеризує здатність перетворювати електричну енергію в світлову. В свою чергу внутрішній квантовий вихід визначається домінуючими механізмами рекомбінації в матеріалі активної області світлодіода. Тому, визначення коефіцієнтів рекомбінації в напівпровідниках матеріалах є досить важливою задачею в практичному плані.

На відміну від інших структур, для світлодіодів на основі нітридів, що випромінюють в короткохвильовій частині видимого спектру, характерним є явище нетермічного падіння ефективності із зростанням сили струму. Таке падіння є головною проблемою на шляху широкомасштабного впровадження світлодіодів в загальне освітлення. Експерименти показали, що нетермічне падіння ефективності може бути напряду пов'язане з внутрішнім квантовим виходом, а отже і від коефіцієнтів рекомбінації. Тому, метою проведених в даній роботі досліджень було визначення коефіцієнтів рекомбінації із аналізу внутрішнього квантового виходу електролюмінесценції в світлодіодах на основі нітридів галію. Нами було проведено аналітичне дослідження рівняння рекомбінаційних коефіцієнтів з точки зору знаходження максимальної квантового виходу та встановлено залежність максимального внутрішнього квантового виходу від рекомбінаційних коефіцієнтів. В рамках розробленої моделі ми визначили числові значення рекомбінаційних коефіцієнтів в нітридах галію.

Приймаючи до уваги три відомі на даний час механізми рекомбінації, густину струму, що проходить через світлодіод, потужність випромінювання і внутрішній квантовий вихід електролюмінесценції можна представити в наступному вигляді.

$$J = e \cdot d \cdot (An + Bn^2 + Cn^3)$$
$$P = h\nu \cdot Bn^2$$
$$\eta = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3},$$

де n – концентрація електронів; A – коефіцієнт домішкової рекомбінації (рекомбінація Шоклі-Ріда) (10^6 - 10^8 с⁻¹); B – коефіцієнт випромінювальної

рекомбінації ($\sim 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$); C – коефіцієнт Оже-рекомбінації ($10^{-34} - 10^{-28} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$). (10)

У дужках приведені відомі із літературних даних значення коефіцієнтів рекомбінації AB і C для нітриду галію. Як видно, лише коефіцієнт випромінювальної рекомбінації B можна вважати більш менш визначеним, тоді як коефіцієнти A і C можуть змінюватися в досить широких межах. Пряме експериментальне вимірювання всіх трьох рекомбінаційних коефіцієнтів є непростою задачею, яка на даний час ще не вирішена. Однак в цій роботі нам вдалося знайти спосіб який дозволяє визначити всі коефіцієнти, якщо точно відомий хоча б один з них. Провівши дослідження на максимум залежності квантового виходу від густини струму можна показати, що густина струму при якій досягається максимум квантового виходу (J_{max}) і саме максимальне значення квантового виходу (η_{max}) можуть бути подані наступними формулами.

$$J_{max} = \frac{e \cdot d \cdot A}{C} (B + 2\sqrt{A \cdot C})$$

$$\eta_{max} = \frac{B}{(B + 2\sqrt{A \cdot C})}$$

Використовуючи ці дві рівності, можна однозначно виразити коефіцієнти A і C через коефіцієнт випромінювальної рекомбінації B (який можна вважати більш менш відомим) і два параметри J_{max} та η_{max} , які досить легко і точно визначаються із простого експериментального вимірювання залежності відносної (тобто вимірної у відносних одиницях) ефективності електролюмінесценції світлодіода від густини струму.

$$A = \sqrt{\frac{J_{max}(1 - \eta_{max})^2}{4 \cdot \eta_{max} \cdot e \cdot d}} \cdot B$$

$$C = \frac{4 \cdot (e \cdot d)^2}{J_{max}^2 (1 - \eta_{max})^2} \cdot A^3$$

Крім того, можна записати залежність внутрішнього квантового виходу від густини струму без явного використання жодного із рекомбінаційних коефіцієнтів.

$$\eta = 1 - \frac{(1 - \eta_{max})}{2J} \left(1 + \frac{\eta J}{\eta_{max} J_{max}} \right) \sqrt{\frac{\eta J_{max}}{\eta_{max}}}$$

На рис. 1 показані розраховані по розробленій моделі залежності внутрішнього квантового виходу світлодіодів від густини струму. На рис. 1а параметром кривих є максимальна ефективність η_{max} , на рис. 1б густина струму, при якій досягається максимум ефективності J_{max} .

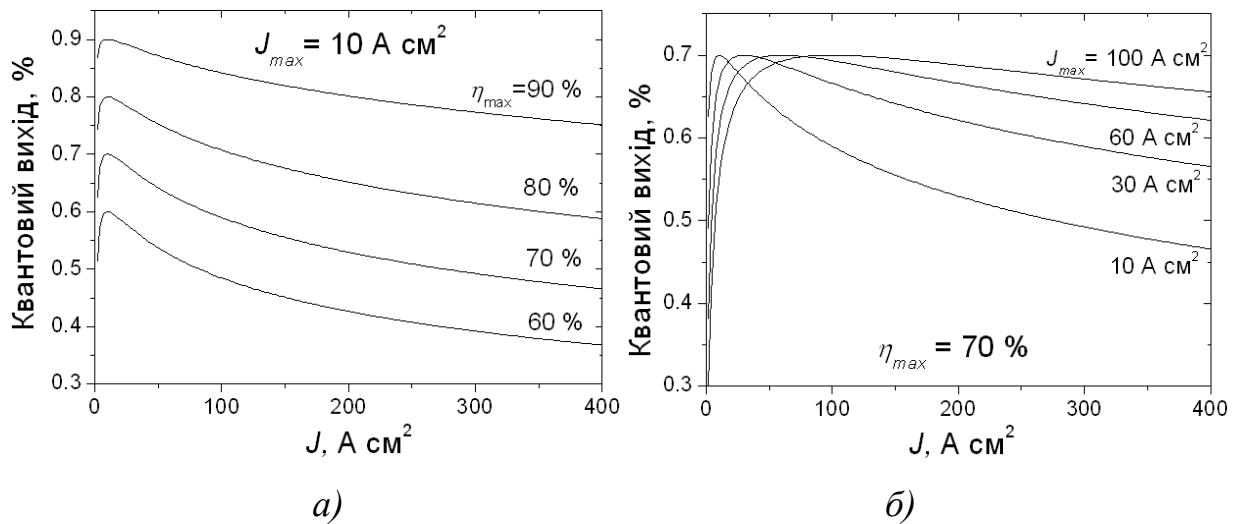


Рис. 1. Розраховані по розробленій моделі залежності внутрішньої ефективності світлодіодів від густини струму. На першому рисунку параметром кривих є максимальна ефективність η_{max} , на другому густина струму, при якій досягається максимум ефективності J_{max} .

Ці параметричні криві можуть бути використані для знаходження рекомбінаційних коефіцієнтів в нітридах із експериментальних вимірів квантової виходу світлодіодів. На рис. 2 точками зображена експериментальна залежність квантової виходу GaNсвітлодіода від густини струму у відносних одиницях. Суцільна крива – результат підгонки за розробленою моделлю. Параметрами цієї підгонки є 72 % для максимальної квантового виходу і 24 А/см² для густини струму, яка відповідає цьому максимуму. Використовуючи ці параметри, а також стандартне для нітридів значення коефіцієнту випромінювальної рекомбінації $B=10^{-10}$ см³·с⁻¹, отримуємо, що два інші коефіцієнти Оже-рекомбінації і рекомбінації Шоклі будуть рівні $C=9 \cdot 10^{-31}$ см⁶·с⁻¹ та $A=4 \cdot 10^8$ с⁻¹.

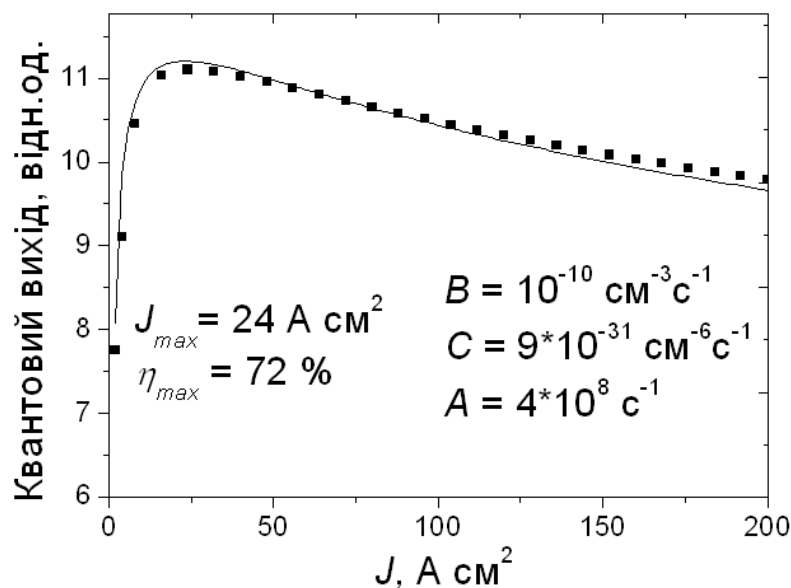


Рис. 2. Експериментальна залежність зовнішньої ефективності InGaN/GaN світлодіода (Lumileds Luxeon, $\lambda=460$ nm) від густини струму у відносних одиницях. Суцільна крива – результат підгонки за розробленою моделлю.

Таким чином, у роботі були отримані наступні результати. Проведено аналіз внутрішнього квантового виходу електролюмінесценції світлодіодів на основі моделі рекомбінаційних коефіцієнтів. Запропонований метод для визначення коефіцієнтів рекомбінації із експериментальних вимірів квантового виходу електролюмінесценції світлодіодів. Отримані чисельні значення коефіцієнтів рекомбінації, для нітриду галію знаходяться в задовільному погодженні із літературними даними.

Література

1. Gardner N F, Müller G O, Shen Y C, Chen G, Watanabe S, Götz W and Krames M R 2007 Appl. Phys. Lett. 91 243506
2. Cao X A, Yang Y and Guo H. 2008 J. Appl. Phys. 104 093108
3. Xie J, Ni X, Fan Q, Shimada R, Özgür Ü and Morkoç H 2008 Appl. Phys. Lett. 93 121107
4. Kim M H, Schubert M F, Dai Q, Kim J K, Schubert E F, Piprek J and Park Y 2007 Appl. Phys. Lett. 91 183507
5. Schubert E F 2006 Light-Emitting Diodes (2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press)