УДК 621.382.3:535.2

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВМІСТУ ІНДІЮ ТА ШИРИНИ КВАНТОВОЇ ЯМИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ InGaN/GaN СВІТЛОДІОДІВ

Ю. М. Ільчук[1], В. В. Іванова[1]

[1] Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

Анотація

У роботі виконано чисельне моделювання електричних та оптичних характеристик світлодіодної структури InGaN/GaN з однією квантовою ямою з використанням програмного пакету `ddcc_1d`. Досліджено вплив вмісту індію (12–23%) та ширини квантової ями (1.7–2.7 нм) на вольт-амперні характеристики, внутрішню квантову ефективність і спектри випромінювання. Показано, що зі збільшенням вмісту індію максимум внутрішньої квантової ефективності зміщується в область меншої щільності струму, при цьому спостерігається зростання напруги ввімкнення світлодіода та зміщення спектра випромінювання в довгохвильову область. Зменшення ширини квантової ями призводить до зміщення максимуму внутрішньої квантової ефективності в область більшої щільності струму, зниження напруги ввімкнення світлодіода та зміщення спектра випромінювання в короткохвильову область. Для ширини ями в 1.7-2 нм спостерігається більш раннє зростання внутрішньої квантової ефективності в області малих струмів порівняно зі структурами з ямою шириною 2.6 нм. На збільшення ширини квантової ями встановлено обмеження, пов'язане зі збіжністю розрахунків використовуваного пакету для даної структури.

Ключові слова: InGaN/GaN, світлодіоди, квантова яма, вміст індію, внутрішня квантова ефективність (internal quantum efficiency — IQE)

Вступ

Світлодіоди на основі гетероструктур InGaN/GaN широко застосовуються в сучасній оптоелектроніці завдяки можливості отримання випромінювання в широкому спектральному діапазоні — від ближнього ультрафіолетового до майже всієї видимої області. Така варіативність досягається за рахунок зміни вмісту індію в шарі InGaN, що дозволяє керувати шириною забороненої зони та, відповідно, довжиною хвилі випромінювання.[1]

Активна область таких світлодіодів зазвичай реалізується у вигляді квантових ям InGaN, вбудованих між бар'єрними шарами GaN. Електричні та оптичні характеристики цих структур визначаються як складом матеріалу, так і геометричними параметрами квантових ям, зокрема їхньою шириною.

Однією з визначальних особливостей гетероструктур на основі нітридів групи III є наявність значних внутрішніх поляризаційних полів, що виникають у кристалах модифікації вюрциту GaN, InGaN та AlGaN. Для таких матеріалів характерна відсутність центра симетрії кристалічної ґратки (рис. 1), внаслідок чого навіть за відсутності зовнішнього механічного впливу виникає спонтанна поляризація. Додатково у напружених гетероструктурах з'являється п'єзоелектрична поляризація, зумовлена деформацією через невідповідність параметрів ґраток сусідніх шарів.[2, 3]

Найбільш виражено ці ефекти проявляються у структурах, вирощених на полярній *c*-площині (0001), тобто вздовж кристалографічного напрямку [0001], що є стандартним для більшості промислових світлодіодних структур на основі GaN. Саме для *c*-полярних гетероструктур вектор поляризації має проєкцію вздовж напрямку росту, тому на межах розділу шарів InGaN/GaN виникають значні зв'язані поверхневі заряди. Їх густина визначається стрибком нормальної складової повної поляризації на межі гетеропереходу:

$$\sigma_{\text{pol}} = \left(\mathbf{P}_{\text{tot}}^{(2)} - \mathbf{P}_{\text{tot}}^{(1)}\right) \cdot \hat{\mathbf{n}}, \tag{1}$$

де $\mathbf{P}_{\text{tot}} = \mathbf{P}_{sp} + \mathbf{P}_{pz}$ — сумарна поляризація, що включає спонтанну та п'єзоелектричну складові, а $\hat{\mathbf{n}}$ — одиничний вектор нормалі до межі розділу шарів. У випадку одновимірної моделі вздовж напрямку росту цей вираз часто записують через різницю компонент у сусідніх шарах.

Наявність поляризаційного заряду на гетерограницях призводить до формування сильного внутрішнього електричного поля в активній області світлодіода. У квантових ямах InGaN/GaN величина такого поля може досягати сотень кВ/см або навіть порядку МВ/см залежно від складу, товщини шарів та ступеня релаксації напружень. Це поле викликає

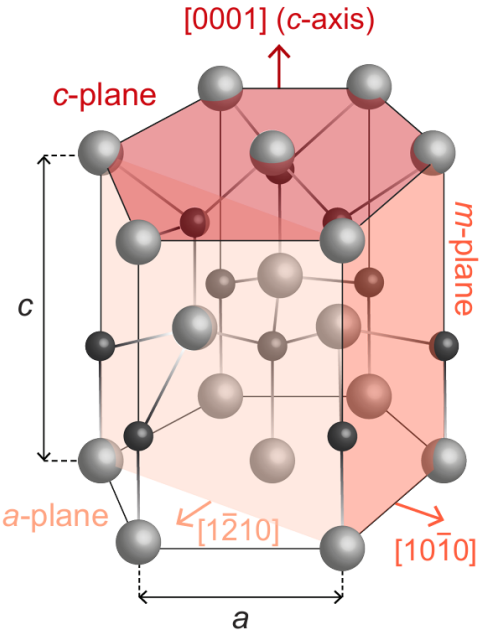

Рис. 1. Схема елементарної комірки вюрциту InGaN/GaN з виділеними основними кристалографічними площинами та напрямками, а також параметрами ґратки c та a. Атоми металів (In, Ga) зображено світло-сірим кольором, а атоми азоту — чорним.[4]

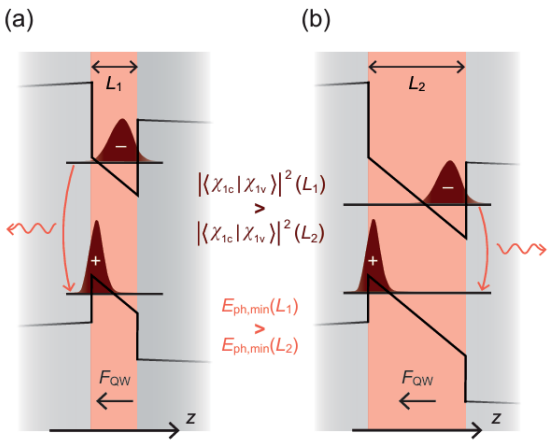

Рис. 2. Типові зонні діаграми квантової ями InGaN/GaN для випадків (а) вужчої та (б) ширшої квантової ями під впливом квантово-обмеженого ефекту Штарка (QCSE) за матеріалами [6]

нахил зон провідності та валентної зони, змінюючи потенціальний профіль квантової ями.[5]

Унаслідок нахилу зон електронна та діркова хвильові функції зміщуються до протилежних країв квантової ями. Просторове перекриття носіїв зменшується, що безпосередньо знижує ймовірність випромінювальної рекомбінації. Дане явище відоме як квантово-обмежений ефект Штарка (quantum-confined Stark effect, QCSE). Його основними наслідками є:

- зменшення енергії міжзонного переходу та червоне зміщення спектра випромінювання;
- зниження ймовірності оптичного переходу;
- збільшення часу життя носіїв у квантовій ямі;
- зменшення внутрішньої квантової ефективності.

Ступінь прояву QCSE істотно залежить від геометричних та матеріальних параметрів активної області. Зі збільшенням ширини квантової ями зростає відстань між локалізованими електронами та дірками, тому ефект просторового розділення посилюється. Схематично вплив ширини квантової ями на нахил зон, положення хвильових функцій та енергію рекомбінації показано на рис. 2. Водночас збільшення вмісту індію в шарі InGaN призводить до двох важливих наслідків: зменшення ширини забороненої зони та зростання невідповідності параметрів ґратки між InGaN і GaN. За умови псевдоморфного або частково напруженого росту це підсилює деформацію шару та збільшує п'єзоелектричну складову поляризації, а отже і внутрішнє електричне поле.[1]

Таким чином, для c-полярних структур, вирощених на площині (0001) уздовж напрямку [0001], зі зростанням концентрації індію QCSE, як правило, посилюється. Це є одним із важливих чинників довгохвильового зміщення спектра випромінювання, зниження перекриття хвильових функцій та погіршення ефективності випромінювання у зеленому та жовтому спектральних діапазонах. Водночас слід зазначити, що зниження ефективності в цих діапазонах зумовлене не лише QCSE, а й погіршенням якості матеріалу, локальними флуктуаціями складу InGaN та іншими механізмами безвипромінювальної рекомбінації.[1]

Для зменшення впливу поляризаційних полів застосовують кілька підходів: зменшення товщини квантових ям, оптимізацію вмісту індію, використання бар'єрних шарів зі зміненим складом, а також вирощування структур на напівполярних або неполярних площинах, де проєкція поляризаційного вектора на напрямок росту є значно меншою.[7, 8]

У зв'язку з цим доцільним є окреме дослідження впливу вмісту індію та ширини квантової ями на електричні та оптичні характеристики світлодіодів InGaN/GaN.

Метою даної роботи є чисельне моделювання світлодіодної структури з однією квантовою ямою (single quantum well, SQW) та аналіз впливу вмісту індію і ширини квантової ями на її електричні та оптичні характеристики при їх незалежному варіюванні.

1. Методика моделювання

Моделювання електричних та оптичних характеристик світлодіодних структур InGaN/GaN виконувалося за допомогою одновимірного програмного пакета `ddcc_1d`.[9] Розрахунки базувалися на розв'язанні рівняння Пуассона та рівнянь неперервності для електронів і дірок у межах дрейф-дифузійного наближення. Рівняння Шредінгера для квантових станів в активній області розв'язувалося після встановлення стаціонарного розподілу електростатичного потенціалу в режимі *Solve Schrödinger once after Poisson-drift-*

diffusion. Таким чином, квантові рівні та хвильові функції використовувалися для аналізу оптичних переходів у вже збіжному потенціальному профілі.

Розрахунки проводилися при температурі $T = 300$ K у діапазоні прикладених напруг 2–4 В. Для контактів використовувалися граничні умови типу Шотткі; висота контактного бар'єра визначалася відповідно до рівня легування поблизу контактних областей.

У роботі розглянуто гетероструктуру InGaN/GaN з однією квантовою ямою (Табл.1). Активна область сформована шаром $In_xGa_{1-x}N$ із підвищеним вмістом індію, розташованим між бар'єрними шарами $In_yGa_{1-y}N$ або GaN з меншим вмістом індію ($y < x$; для GaN $y = 0$). У базовому варіанті товщина квантової ями становила 2.6 нм, що забезпечує квантове обмеження носіїв у напрямку росту структури. Для зменшення витоку електронів у p-область у структурі передбачено шар блокування електронів AlGaN.

Легування структури є неоднорідним: p-область характеризується концентраціями акцепторних домішок (Mg) від 5.6×10^{18} до 1.0×10^{20} см$^{-3}$, тоді як n-область містить донорні домішки (Si) з концентраціями від 3.5×10^{18} до 1.0×10^{19} см$^{-3}$. Бар'єрні шари поблизу квантової ями та сама активна область є слабколегованими, з концентраціями домішок порядку 1.0×10^{15} см$^{-3}$.

У моделюванні враховано випромінювальну і безвипромінювальну рекомбінацію за механізмом Шоклі–Ріда–Холла (SRH), а також Оже-рекомбінацію. Поляризаційні ефекти враховувалися через спонтанну та п'єзоелектричну складові поляризації, що дозволяє описати внутрішні електричні поля та поляризаційні заряди на гетерограницях InGaN/GaN.

Оптичні спектри розраховувалися на основі енергій квантових станів та перекриття електронних і діркових хвильових функцій у квантовій ямі. Для спектрів, отриманих при прикладеній напрузі та електричній інжекції носіїв, надалі використовується термін електролюмінесценція (EL) або спектр випромінювання.

У межах роботи виконано дві серії розрахунків. У першій серії при фіксованій товщині квантової ями $L_{QW} = 2.6$ нм змінювався вміст індію x у шарі $In_xGa_{1-x}N$. У другій серії при фіксованому складі квантової ями $x = 0.176$ змінювалася її товщина. Усі інші параметри структури залишалися незмінними, що дозволило окремо проаналізувати вплив складу та геометрії активної області на характеристики світлодіода.

2. Результати та обговорення

2.1. Вплив вмісту індію в квантовій ямі

У першій серії моделювання розрахунки проведено для п'яти значень складу: 12%, 15%, 17.6% (базовий варіант), 20% та 23% при сталій товщині квантової ями $L_{QW} = 2.6$ нм.

На рис. 3 наведено залежності внутрішньої квантової ефективності (IQE) від щільності струму. У межах розрахованої серії зі збільшенням вмісту індію максимум IQE зміщується в область меншої щільності струму. Така поведінка свідчить про зміну умов інжекції та накопичення носіїв у квантовій ямі при зміні складу активної області. Одночасно спостерігається незначне зменшення максимального значення IQE, що може бути пов'язано з посиленням внутрішнього поляризаційного поля та зменшенням перекриття електронних і діркових хвильових функцій.

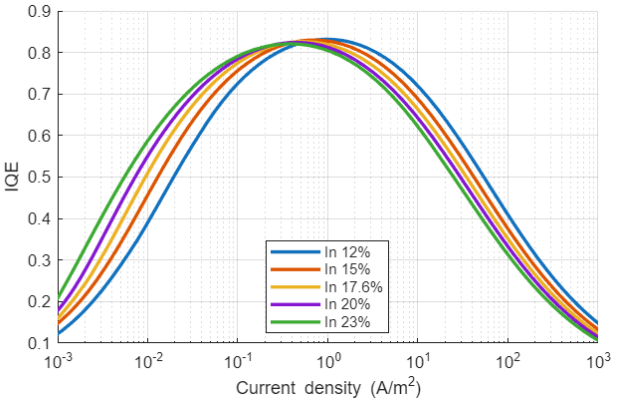

Рис. 3. Залежність внутрішньої квантової ефективності IQE від щільності струму для різного вмісту індію в квантовій ямі.

Зменшення вмісту індію приводить до зміщення кривих IQE у бік менших напруг. При цьому різниця між 12% та 15% є менш вираженою, ніж між 15% та 17.6%. Це може свідчити про те, що при малих значеннях x зменшення глибини квантової ями починає обмежувати ефективну локалізацію носіїв. Отже, вплив вмісту індію не є однозначним: збільшення x поглиблює квантову яму та може підсилювати локалізацію носіїв, але водночас збільшує невідповідність параметрів ґратки, п'єзоелектричну поляризацію та прояв квантово-обмеженого ефекту Штарка (QCSE).[11, 12]

Вольт-амперні характеристики, представлені на рис. 4, демонструють подібну тенденцію: зі збільшенням вмісту індію початок інтенсивного зростання струму зміщується в область вищих напруг. У даній моделі це можна пов'язати зі зміною зонного профілю активної області, глибини квантової ями та поляризаційних зарядів на гетерограницях. Для пояснення цього ефекту доцільно додатково проаналізувати зонні діаграми, розподіли електронів і дірок та профілі електричного поля для кожного значення x.

Спектри випромінювання, розраховані при напругах, що відповідають максимуму IQE, наведені на рис. 5. Із зростанням вмісту індію спостерігається зміщення максимуму випромінювання в довгохвильову область. Такий червоний зсув є очікуваним, оскільки збільшення частки In у шарі $In_xGa_{1-x}N$ зменшує ширину забороненої зони матеріалу. Крім того, при більшому x може посилюватися QCSE, що додатково знижує енергію оптичного переходу.[11, 13]

Таблиця 1. Параметри модельованої структури на основі [10]

Матеріал	Склад	d, нм	Тип	N_A/N_d, см$^{-3}$	Шар
InGaN	$x_{\mathrm{In}} = 0.146$	5.0	p$^+$	1.0×10^{20}	контактний p-шар
InGaN	$x_{\mathrm{In}} = 0.026$	40.0	p	3.6×10^{19}	p-область
GaN	–	200.0	p	5.6×10^{18}	p-GaN
AlGaN	$x_{\mathrm{Al}} = 0.13$	20.0	p	1.7×10^{19}	EBL
InGaN	$x_{\mathrm{In}} = 0.026$	30.0	слабке p	1.0×10^{15}	бар'єр біля QW
InGaN	$x_{\mathrm{In}} = 0.176$	2.6	слабке n	1.0×10^{15}	QW
InGaN	$x_{\mathrm{In}} = 0.026$	30.0	слабке n	1.0×10^{15}	бар'єр біля QW
InGaN	$x_{\mathrm{In}} = 0.016$	400.0	n	3.5×10^{18}	n-область
GaN	–	1000.0	n$^+$	1.0×10^{19}	контактний n-шар

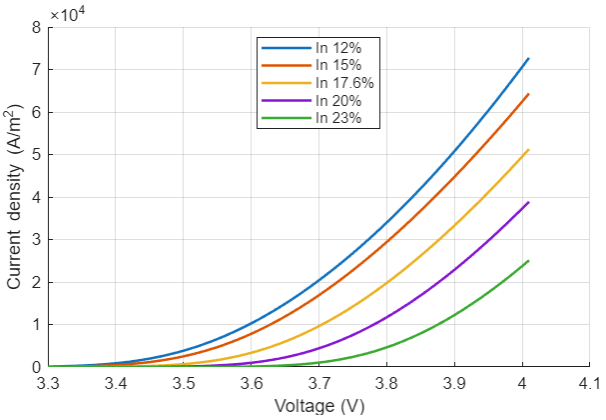

Рис. 4. Вольт-амперні характеристики світлодіодної структури при різному вмісті індію в квантовій ямі.

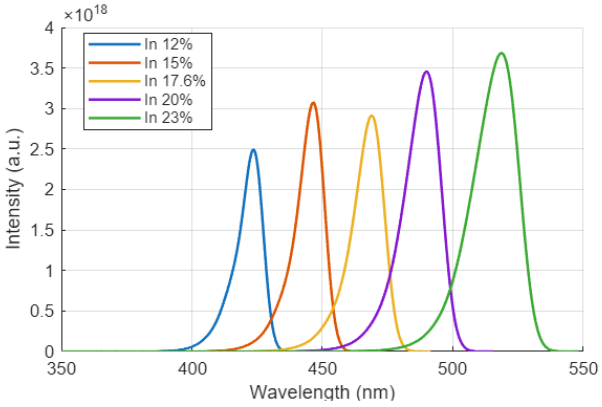

Рис. 5. Спектри випромінювання світлодіодної структури для різного вмісту індію в квантовій ямі.

Порівняння інтенсивностей спектрів показує, що зі збільшенням вмісту індію загальна інтенсивність випромінювання в розрахунку загалом зростає, за винятком базового варіанта 17.6%, для якого інтенсивність нижча, ніж для 15%. Оскільки спектри порівнюються при різних напругах, що відповідають максимумам IQE, їхня амплітуда відображає не лише швидкість випромінювальної рекомбінації, а й різну концентрацію інжектованих носіїв у вибраних робочих точках. Тому отриману немонотонність варто інтерпретувати як результат конкуренції між локалізацією, витоком носіїв та нерадіаційними каналами рекомбінації.[11, 14]

Отримані результати вказують на складний характер впливу вмісту індію в квантовій ямі. Збільшення x зменшує ширину забороненої зони InGaN та зміщує спектр випромінювання у довгохвильову область. Також більший вміст індію підсилює деформацію шару, п'єзоелектричну поляризацію та внутрішнє електричне поле, що може зменшувати перекриття хвильових функцій електронів і дірок. Спільний вплив цих факторів визначає зміну IQE, ВАХ та інтенсивності випромінювання.

2.2. Вплив ширини квантової ями

У даній частині досліджено вплив ширини квантової ями на характеристики світлодіодної структури. Розрахунки проведено для значень товщини 1.7 нм, 2.0 нм, 2.3 нм, 2.6 нм (базовий варіант) та 2.7 нм при фіксованому вмісті індію $x = 0.176$. Для значень ширини 2.6 і 2.7 нм отримані залежності виявилися настільки близькими, що на частині графіків відповідні криві практично повністю накладаються одна на одну. Спроба збільшення товщини квантової ями до 2.8 нм у даній конфігурації призвела до втрати збіжності розрахунку, тому цей випадок не використовувався для кількісного аналізу. Це слід розглядати насамперед як чисельне обмеження поточних параметрів моделі, сітки та критеріїв збіжності, а не як доказ фізичної нестабільності структури.

На рис. 6 наведено залежності внутрішньої квантової ефективності (IQE) від щільності струму. Спостерігається, що зі зменшенням ширини квантової ями максимум IQE дещо зростає, а самі криві зміщуються в область більших струмів. Така поведінка узгоджується з очікуваним послабленням просторового розділення електронних і діркових хвильових функцій у вужчих квантових ямах.[7, 12]

Разом з тим, для найменших значень товщини, 2.0 нм та 1.7 нм, спостерігається більш раннє зроста-

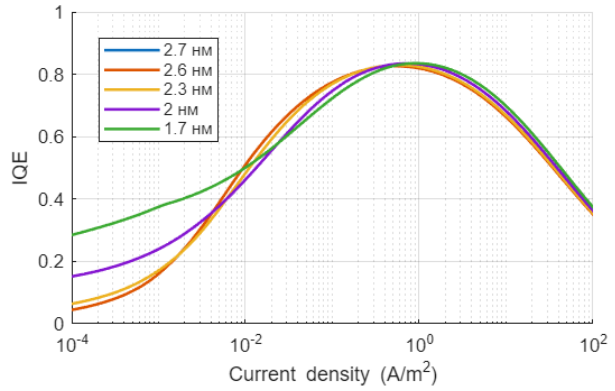

Рис. 6. Залежність внутрішньої квантової ефективності IQE від щільності струму для різної ширини квантової ями.

ння внутрішньої квантової ефективності в області малих струмів порівняно зі структурами з більшою шириною квантової ями. Після досягнення значень IQE близько 0.5 характер залежностей поступово наближається до випадку ширших ям: подальше зростання ефективності відбувається повільніше, і відповідні криві зближуються. Причини такої поведінки в межах даної роботи однозначно не встановлені; для їх з'ясування необхідні подальші дослідження.

Вольт-амперні характеристики, представлені на рис. 7, демонструють систематичне зміщення області інтенсивного зростання струму до менших напруг зі зменшенням ширини квантової ями. Це узгоджується з результатами для IQE та свідчить про зміну умов інжекції і рекомбінації носіїв в активній області.

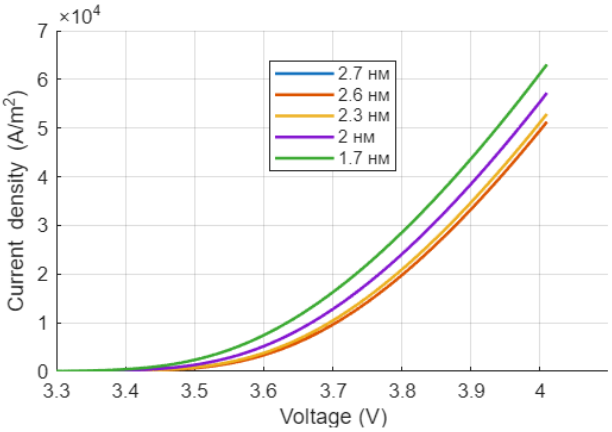

Рис. 7. Вольт-амперні характеристики світлодіодної структури при різній ширині квантової ями.

Спектри випромінювання, наведені на рис. 8, демонструють зміщення максимуму у короткохвильову область при зменшенні ширини квантової ями. Такий синій зсув пояснюється збільшенням енергії квантово-обмежених станів у вужчих ямах, а також зменшенням впливу QCSE через менший просторове розділення електронів і дірок. Подібний вплив товщини квантової ями на енергію оптичних переходів та екранування вбудованого поля розглядався в роботах, присвячених InGaN/GaN світлодіодам з різною шириною квантових ям.[15, 16]

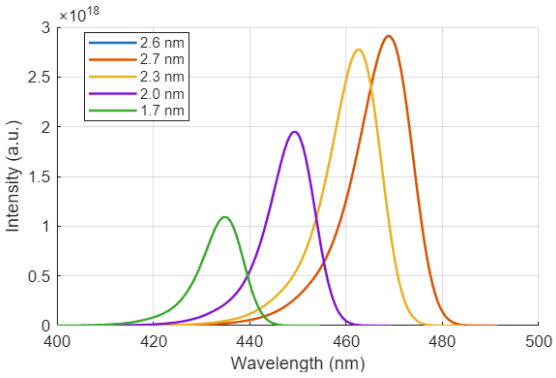

Рис. 8. Спектри випромінювання світлодіодної структури для різної ширини квантової ями.

Крім того, зі зменшенням ширини квантової ями спостерігається зменшення інтенсивності випромінювання. Це не суперечить зростанню максимуму IQE, оскільки інтенсивність спектра залежить не лише від імовірності випромінювальної рекомбінації, а й від ефективного об'єму активної області, концентрації носіїв у квантовій ямі та можливого витоку носіїв. У літературі також показано, що надмірне зменшення товщини квантової ями може мати обмеження, пов'язані з балансом між радіаційними і нерадіаційними процесами, а оптимальна товщина часто визначається сукупним впливом локалізації носіїв, перекриття хвильових функцій та ефективного об'єму рекомбінації.[8, 16]

Отримані результати свідчать, що при аналізі вузьких квантових ям необхідно враховувати послаблення QCSE, ефективну локалізацію носіїв, інтенсивність випромінювання та чисельну стабільність розрахунку. Тому оптимальна товщина квантової ями має визначатися не лише за максимумом IQE, а й з урахуванням спектральної інтенсивності, робочої напруги та стабільності розрахункової моделі.

Висновки

Проведене моделювання дозволило варіювати параметри квантової ями — вміст індію та її ширину — і аналізувати їх вплив на внутрішню квантову ефективність, вольт-амперні характеристики та спектр випромінювання.

Показано, що збільшення вмісту індію приводить до довгохвильового зсуву спектра, зміщення максимуму IQE в область менших щільностей струму та зміщення робочої області ВАХ у бік вищих напруг. Зменшення ширини квантової ями, навпаки, приводить до короткохвильового зсуву спектра, зміщення максимуму IQE в область більших щільностей струму та зниження робочої напруги.

Отримані результати показують, що характеристики InGaN/GaN світлодіода з однією квантовою ямою суттєво залежать як від вмісту індію, так і від ширини квантової ями. При цьому вибір параметрів

активної області має здійснюватися з урахуванням зміни спектрального положення максимуму випромінювання, рівня внутрішньої квантової ефективності, інтенсивності спектра та робочих електричних характеристик структури.

Такі результати загалом узгоджуються з відомими експериментальними та літературними даними щодо впливу складу InGaN і ширини квантової ями на спектральні характеристики та прояв QCSE. Водночас застосування програми має певні обмеження: для окремих наборів параметрів спостерігалася дуже мала відмінність між розрахованими залежностями, а в граничних режимах розрахунок не завжди досягав збіжності.

Таким чином, використаний підхід є придатним для якісного аналізу та параметричного дослідження InGaN/GaN світлодіодів, а також для попередньої оптимізації параметрів активної області.

Перелік використаних джерел

1. Electroluminescent properties of InGaN/GaN light-emitting diodes with different indium contents and well widths / C. Li, Z. Ji, J. Li, [et al.] // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7. — P. 15301. — DOI: 10.1038/s41598-017-15561-9.
2. *Kusdemir E.* Investigation of periodic Mg doping in (0001) (Ga,In)N/GaN superlattices grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy (PAMBE) for hole injection in light emitting diodes : PhD thesis / Kusdemir Erdi. — —, 02/2022.
3. *Schubert E. F.* LED Basics: Electrical Properties // Light-Emitting Diodes. — Cambridge University Press, 2006. — P. 59–85.
4. *Weatherley T. F. K.* The Nanoscale Impact of Individual Nonradiative Point Defects on InGaN/GaN Quantum Wells : Doctoral Thesis / Weatherley Thomas Fjord Kjærsgaard. — Lausanne, Switzerland : École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2023. — Programme doctoral en Photonique, Laboratoire en semiconducteurs avancés pour la photonique et l'électronique.
5. Quantum-Confined Stark Effect due to Piezoelectric Fields in GaInN Strained Quantum Wells / T. Takeuchi [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. — 2002. — Vol. 36, Part 2, No. 4A. — P. L382–L385.
6. *Haller C.* Elucidating the Role of the InGaN UL in the Efficiency of InGaN Based Light Emitting Diodes : PhD Thesis / Haller C. — Lausanne, Switzerland : École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2019.
7. *Li Y.-L.*, *Huang Y.-R.*, *Lai Y.-H.* Efficiency droop behaviors of InGaN/GaN multiple-quantum-well light-emitting diodes with varying quantum well thickness // Applied Physics Letters. — 2007. — Vol. 91. — P. 181113. — DOI: 10.1063/1.2805197.
8. Well Thickness Dependence of the Internal Quantum Efficiency and Carrier Concentration in GaN-Based Multiple Quantum Well Light-Emitting Diodes / K. Zhao, X. Yang, B. Xu, D. Li, C. Wang, L. Feng // Journal of Electronic Materials. — 2016. — Vol. 45. — P. 786–790. — DOI: 10.1007/s11664-015-4203-9.
9. *Wu Y.-R.* DDCC-1D: One Dimensional Drift-Diffusion Charge Control Solver. — accessed 2026. — Optoelectronic Device Simulation Laboratory, National Taiwan University. https://yrwu-wk.ee.ntu.edu.tw/index.php/ddcc-1d/.
10. Detailed study of HVPE-GaN doped with silicon / M. Amilusik [et al.] // Journal of Crystal Growth. — 2025. — Mar. — Vol. 653. — P. 128069. — DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2025.128069.
11. Electroluminescence properties of InGaN/GaN multiple quantum well-based LEDs with different indium contents and different well widths / C. Li, Z. Ji, J. Li, M. Xu, H. Xiao, X. Xu // Scientific Reports. — 2017. — Vol. 7. — P. 15301. — DOI: 10.1038/s41598-017-15561-9.
12. Approaches for high internal quantum efficiency green InGaN light-emitting diodes with large overlap quantum wells / H. Zhao, G. Liu, J. Zhang, J. D. Poplawsky, V. Dierolf, N. Tansu // Optics Express. — 2011. — Vol. 19, S4. — A991–A1007. — DOI: 10.1364/OE.19.00A991.
13. Realization of high-luminous-efficiency InGaN light-emitting diodes in the "green gap" range / Y. Jiang [et al.] // Scientific Reports. — 2015. — Vol. 5. — P. 10883. — DOI: 10.1038/srep10883.
14. InGaN quantum well with gradually varying indium content for high-efficiency GaN-based green light-emitting diodes / S. Zhou, Z. Wan, Y. Lei, B. Tang, G. Tao, P. Du, X. Zhao // Optics Letters. — 2022. — Vol. 47, no. 5. — P. 1291–1294. — DOI: 10.1364/OL.452477.
15. Dependence of InGaN Quantum Well Thickness on the Nature of Optical Transitions in LEDs / M. Hajdel, M. Chlipała, M. Siekacz, H. Turski, P. Wolny, K. Nowakowski-Szkudlarek, A. Feduniewicz-muda, C. Skierbiszewski, G. Muziol // Materials. — 2022. — Vol. 15, no. 1. — P. 237. — DOI: 10.3390/ma15010237.
16. Impact of quantum well thickness on efficiency loss in InGaN/GaN LEDs: Challenges for thin-well designs / X. Li, N. Pant, S. I. Rahman, R. Armitage, S. Rajan, E. Kioupakis, D. Feezell // Applied Physics Letters. — 2025. — Vol. 126, no. 13. — P. 132102. — DOI: 10.1063/5.0258108.