

work began with a steady state model to provide an acceptable initial level as a condition for further modeling. These results can then be introduced into the transient state model.

During the simulation, the characteristic of torque change on the turbine wheel in the flow range was evaluated, streamlines and velocity vectors in the computational domain were obtained. The results of this model may be useful for future design of gas turbine meters.

Key words: turbine flow meter; CFD; calibration curve; ANSYS CFX; flow sensor.

Надійшла до редакції
26 жовтня 2020 року

Рецензовано
06 листопада 2020 року

УДК 621.382.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОНІВ У НІТРИДАХ ІНДІЮ І ГАЛІЮ

Саурова Т. А., Семеновська О. В., Ємельянов М. Г.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: saurowa-ee@lil.kpi.ua; helenseem-ee@lil.kpi.ua; memelianov-ee23@lil.kpi.ua

Нові можливості при створенні напівпровідникових приладів відкривають трикомпонентні напівпровідники. Одним з перспективних трикомпонентних напівпровідників є нітрид індію-галію $In_xGa_{1-x}N$, який розглядають як твердий сплав бінарних сполук – нітриду індію InN і нітриду галію GaN . Прогнозування перспектив створення приладів на основі $In_xGa_{1-x}N$ можливо при ґрунтовному дослідженні електричних властивостей складових його бінарних нітридів; нітриду індію і нітриду галію. У науковій літературі для вказаних нітридів переважають дослідження холлівської рухливості, температурна залежність якої описана у вузькому діапазоні значень концентрації домішки, та відповідність результатів моделювання експериментальним отримують введенням коригувальних коефіцієнтів.

Метою даної роботи є розрахунок для InN і GaN температурної залежності дрейфової рухливості електронів у широкому діапазоні ступеня легування напівпровідників і вибір вихідних параметрів матеріалів, що дозволяють отримати найкращу відповідність експериментальним результатам.

Для досліджених нітридів проведено чисельне моделювання процесів розсіювання для типових видів домішкового (на нейтральних атомах та іонах домішки) і фононного (акустичне, полярне оптичне, міждолинне) механізмів; розраховані та проаналізовані значення швидкостей розсіювання імпульсу. Вперше для нітридів індію та галію розрахована температурна залежність дрейфової рухливості електронів у широкому діапазоні значень концентрації легуючої домішки. Проведена верифікація результатів моделювання. Розраховані пошвидкісні характеристики методом релаксаційних рівнянь та зіставлені з результатами, отриманими методом Монте-Карло. Для досліджуваних нітридів запропоновані вихідні параметри, що забезпечують узгодження з експериментальними даними при моделюванні транспортних властивостей електронів у режимі слабкого електричного поля.

Результати чисельного моделювання вказують на перспективність створення на основі InN і GaN висококоєфективних, швидкодіючих, потужних приладів різного призначення.

Ключові слова: нітрид індію; нітрид галію; розсіювання; дрейфова рухливість електронів; метод релаксаційних рівнянь.

Вступ

З кінця ХХ століття інтерес технологів, дослідників і розробників напівпровідникових приладів звернений до нітриду індію і галію, званими тринітридами. Експериментальні та теоретичні напрацювання вказують на їх перспективність при створенні електронних і оптоелектронних приладів з унікальними характеристиками [1].

Слід підкреслити, що нові можливості при створенні напівпровідникових приладів відкривають трикомпонентні напівпровідники. Одним з перспективних трикомпонентних напівпровідників є $In_xGa_{1-x}N$, який розглядають як твердий сплав бінарних сполук – нітриду індію InN і нітриду галію GaN .

Технологічний успіх у вирощуванні високоякісних плівок нітриду індію з гексагональною структурою привів до корегування значення ширини забороненої зони напівпровідника з 1,9 еВ до рівня 0,7 еВ. Проведена нова хвиля теоретичних досліджень InN, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ і експериментальних розробок на їх основі розширює перспективи створення оптоелектронних приладів у більш широкому спектральному діапазоні від ближнього інфрачервоного до ультрафіолетового [2, 3], високоефективних джерел світла [4], потужних електронних приладів різного призначення, високоефективних транзисторів [5, 6], лазерів [7] і відкриття можливостей для нових додатків.

Зрозуміло, що більш точне прогнозування перспектив створення приладів на основі трикомпонентного нітриду $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ можливо при ґрунтовному дослідженні електричних властивостей складових його бінарних нітридів; нітриду індію і нітриду галію. Однією з найважливіших характеристик електричних властивостей матеріалу є поле-швидкісна, нахил якої в слабкому полі дозволяє визначити рухливість, що необхідно для прогнозування граничних можливостей матеріалу по потужності і частоті.

У науковій літературі для нітриду індію і галію проведені теоретичні та експериментальні дослідження енергетичної зонної структури, оптичних, теплових, механічних властивостей. Менш вивченими є електричні властивості, причому переважають теоретичні та експериментальні дослідження холлівської рухливості, температурна залежність якої описана в вузькому діапазоні значень концентрації домішки [8]. Слід зазначити також, що часто кількісна відповідність між експериментальними даними та результатами моделювання холлівської рухливості отримують введенням коригувальних коефіцієнтів. Однією з можливих причин цього є вибір вихідних параметрів моделювання. У літературних джерелах для деяких параметрів пропонуються значення, що істотно розрізняються [9, 10].

Метою даної роботи є розрахунок для InN і GaN температурної залежності дрейфової рухливості електронів у широкому діапазоні ступеня легування напівпровідників та вибір вихідних параметрів матеріалів, що дозволяють отримати найкращу відповідність експериментальним результатам.

Дані чисельного експерименту дозволяють розрахувати уточнені поле-швидкісні характеристики, для яких експериментальні дані в літературних джерелах ще не представлені [8]. У свою чергу, знання уточнених результатів моделювання транспортних властивостей електронів в бінарних нітридах (індію та галію) дозволять описати процес переносу носіїв заряду в трикомпонентному напівпровіднику $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$.

Моделювання процесів розсіювання носіїв заряду

Рухливість носіїв заряду визначається особливостями механізмів розсіювання. Типовими механізмами зіткнень носіїв у напівпровідниках є домішкові і фононні види розсіювання. Аналітична модель, що описує швидкості зазначених механізмів розсіювання була запропонована в [11, 12]. У даній роботі на основі цієї моделі проведено теоретичне дослідження механізмів розсіювання в InN і GaN для режиму слабого електричного поля. Отримані результати чисельного моделювання температурної залежності зворотних значень часів релаксації для різних механізмів розсіювання представлені на рис. 1.

Для досліджуваних нітридів у результатах моделювання механізмів розсіювання спостерігаються характерні тенденції:

- при найнижчих температурах – до 120 К для InN, до 80 К для GaN – переважає розсіювання на іонізованих атомах домішки $1/\tau_p^{\text{ion}}$, але при температурах до 30 К присутнє на 3-4 порядки більше слабке розсіювання на нейтральних атомах домішки $1/\tau_p^{\text{Nd}}$;
- з подальшим зростанням температур спостерігається спад домішкових видів розсіювання ($1/\tau_p^{\text{Nd}}, 1/\tau_p^{\text{ion}}$) і різке зростання вкладу полярного оптичного розсіювання $1/\tau_p^{\text{po}}$;
- акустичний вид розсіювання $1/\tau_p^{\text{a}}$ вище в нітриді галію, однак, як і для нітриду індію, вносить непомітний внесок у величину сумарної швидкості розсіювання $1/\tau_p^{\text{Nd}}$;
- міждолинне розсіювання $1/\tau_p^{\text{ij}}$ в розглянутому діапазоні температур практично не виявляється.

Моделювання температурних залежностей дрейфової рухливості електронів та їх верифікація

На основі результатів моделювання часів релаксації імпульсу для типових механізмів розсіювання носіїв заряду розрахована температурна залежність дрейфової рухливості електронів у режимі слабого електричного поля [11, 12]

$$\mu(T) = \frac{e\tau_p(T)}{m_c^*},$$

де e – заряд електрона, m_c^* – омічна ефективна маса, τ_p – результуючий час релаксації імпульсу, який знаходиться за правилом

$$1/\tau_p(T) = \sum_i 1/\tau_{pi}(T),$$

де $1/\tau_{pi}$ – зворотній час релаксації імпульсу певного механізму розсіювання.

Результати чисельного моделювання температурної залежності дрейфової швидкості елект-

ронів для нітридів індію та галію представлені на рис. 2.

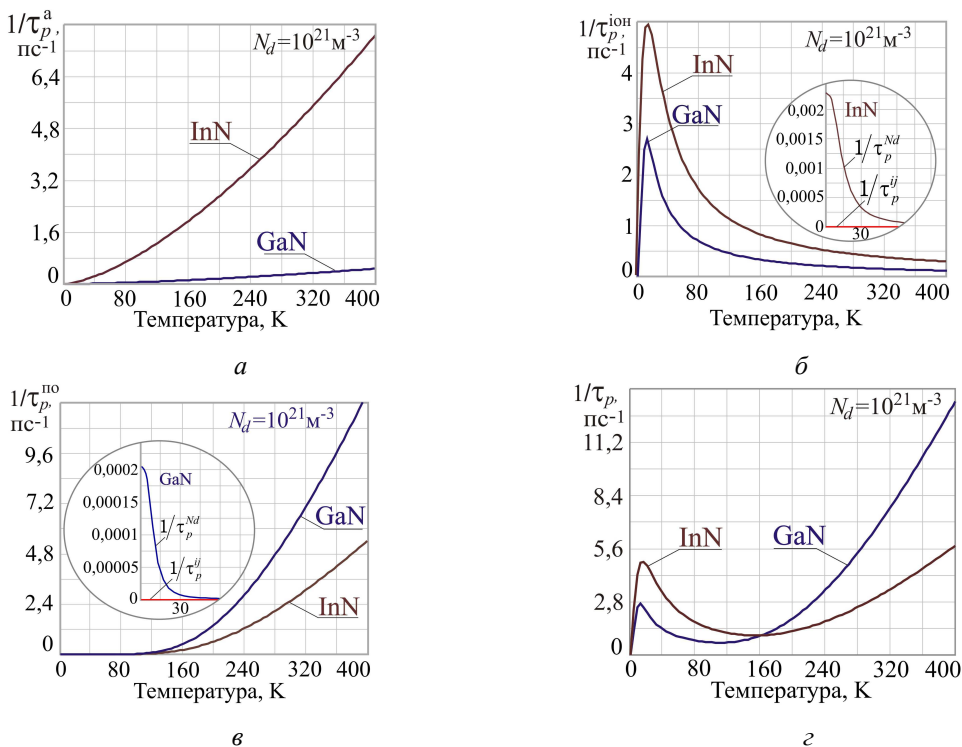


Рис. 1. Температурні залежності зворотних часів релаксації імпульсу для типових видів розсіювання в нітриді індію і нітриді галію: (а) – акустичне $1/\tau_p^a$; (б) – на іонізованих атомах домішки $1/\tau_p^{ion}$; для InN – на нейтральних атомах домішки $1/\tau_p^{Nd}$, міждолинне $1/\tau_p^{ij}$; (в) – полярне оптичне $1/\tau_p^{po}$; для GaN – на нейтральних атомах домішки $1/\tau_p^{Nd}$, міждолинне $1/\tau_p^{ij}$; (г) – результуючий зворотний час релаксації імпульсу $1/\tau_p$.

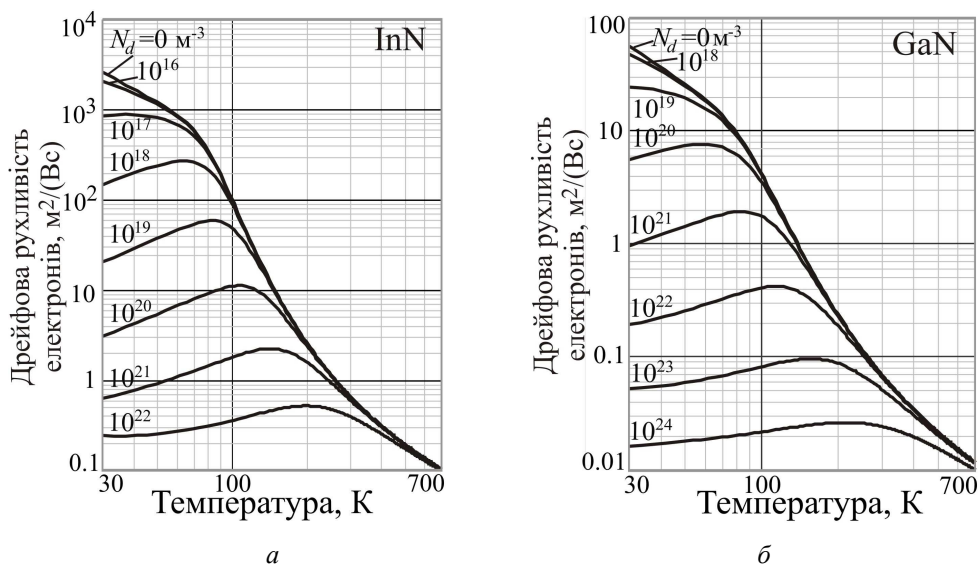


Рис. 2. Температурна залежність дрейфової рухливості електронів при різних значеннях ступеня легування напівпровідника (N_d, m^{-3}): нітрид індію (а); нітрид галію (б)

Для верифікації результатів моделювання розраховано температурні залежності холлівської

рухливості електронів і зіставлені з експериментальними даними [13]. Розрахунок холлівської рух-

ливості виконано з урахуванням коефіцієнтів перерахунку для механізмів домішкового (дорівнює 1,93) і фононного (дорівнює 1,18) розсіювання [14]. Результати чисельного моделювання температурної залежності холлівської рухливості та ре-

конструйовані з [13] експериментальні дані представлені на рис. 3.

У таблиці 1 наведено вихідні параметри моделювання. Критерієм вибору параметрів матеріалів були, перш за все, їх експериментально знайдені значення (з урахуванням їх апроксимації).

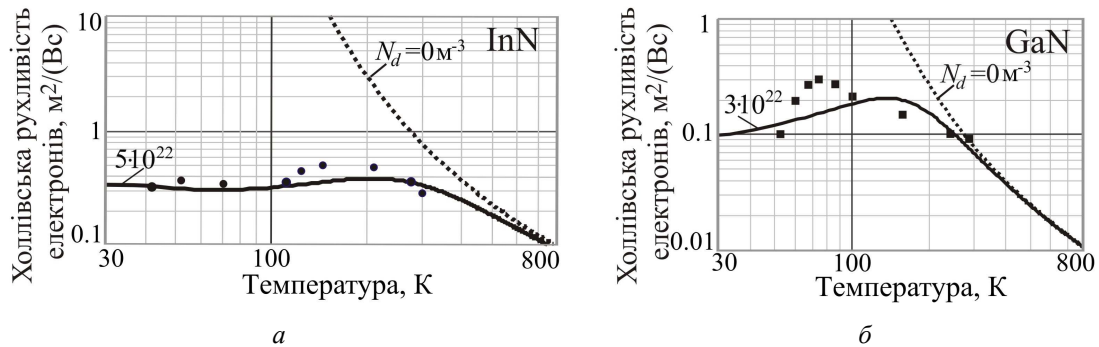


Рис. 3. Температурні залежності холлівської рухливості електронів: розраховані і експериментальні [13] результати для нітриду індію (а) і нітриду галію (б).

Так, наприклад, значення міждолинної відстані взяті з [15], акустичних деформаційних потенціалів – з [9]. Реконструйовані з [15] експериментальні результати представлені на рис. 4.

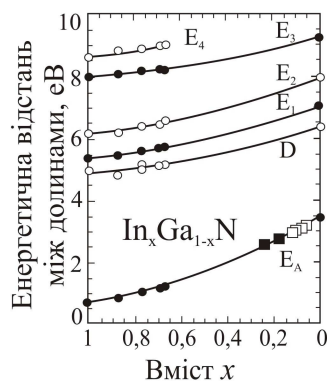


Рис. 4. Енергетична відстань між долинами; реконструйовано з [15]

При відсутності вимірних значень параметрів моделювання вибиралися рекомендовані в [10, 16] значення величин, які запропоновані з урахуванням досліджень багатьох авторів. Слід додати, що найкраще узгодження розрахованих та експериментальних результатів, що представлені на рис. 3, отримано з використанням відомих моделей, що описують розсіювання на іонізованих атомах домішки: для нітриду індію – моделі Брукса-Херінга, для нітриду галію – моделі Конуелл-Вайскопфа.

На основі представлених (табл. 1) параметрів розраховані поле-швидкісні характеристики нітридів індію і галію (рис. 5).

Моделювання виконано в межах дволинної моделі з використанням методики, в основу якої покладено релаксаційні рівняння збереження імпульсу, енергії та концентрації [17].

Табл.1 Вихідні параметри моделювання

	InN (вюрцит)	GaN (вюрцит)
Діелектрична проникність:	статична	10,5
	високочастотна	6,7
Густина, 10^3 кг/м ³	6,81	6,15
Швидкість звуку (поздовжня), 10^3 м/с	6,24	6,56
Акустичний деформаційний потенціал, еВ	4,1	7,4
Константа міждолинного зв'язку, 10^{10} еВ/м	10	10
Енергія оптичних фононів, еВ	0,073	0,073
Енергія міждолинних фононів, еВ	0,0584	0,05
Міждолинна відстань, еВ	4,11	2,6
Ефективна маса електронів нижньої долини	m_i^*	$0,065m_0$
	m_l^*	$0,068m_0$
Ефективна маса електронів верхньої долини	m_t^*	$0,17m_0$
	m_j^*	$1,56m_0$

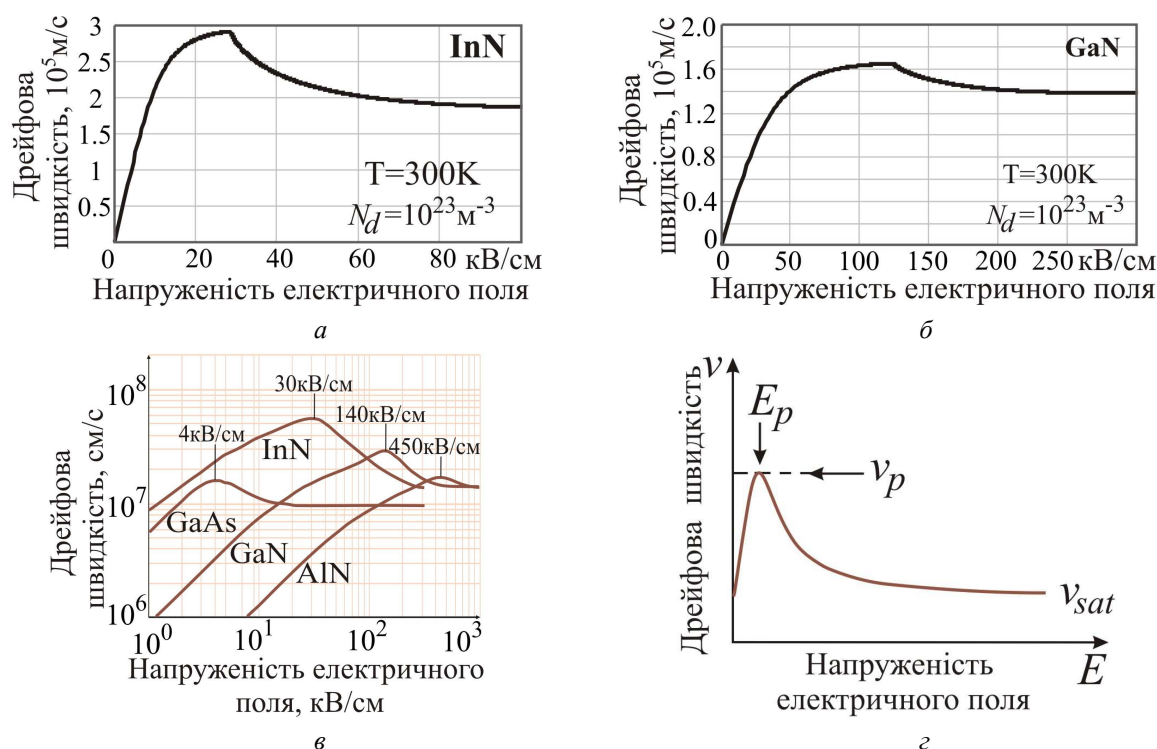


Рис. 5. Поле-швидкісні характеристики: розраховані методом релаксаційних рівнянь для нітриду індію (а) і нітриду галію (б); характерні параметри поле-швидкісних залежностей, розрахованих методом Монте-Карло в [1] (в) і [9] (д)

У низці робіт, включаючи [12, 18], показано, що результати розрахунків, виконаних за вказаною методикою, добре співвідносяться з отриманими методом Монте-Карло. Моделювання поле-швидкісних характеристик методом релаксаційних рівнянь проведено при тій температурі та концентрації домішки, що і методом Монте-Карло [1].

Характерні параметри поле-швидкісної характеристики в [9] описані величинами критичного поля E_p , піковим v_p і сталим v_{sat} значеннями дрейфової швидкості. Для нітриду індію вказані величини:

$$E_p = 30 \text{ кВ/см}, \quad v_p = 2,9 \cdot 10^5 \text{ м/с}, \\ v_{sat} = 1,32 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Для нітриду галію:

$$E_p = 180 \text{ кВ/см}, \quad v_p = 1,85 \cdot 10^5 \text{ м/с}, \\ v_{sat} = 1,41 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

З представлених даних видно, що результати моделювання поле-швидкісних характеристик електронів, які отримані методом релаксаційних рівнянь, знаходяться в задовільній відповідності до результатів, отриманих методом Монте-Карло. Відзначимо, що за величиною пікового та сталого значення швидкості дрейфу для досліджуваних нітридів спостерігається краща відповідність з результатами моделювання, представленими в [9]. За значенням критичного поля розраховані поле-

швидкісні характеристики краще узгоджуються з результатами моделювання, які отримані в [1].

Для оцінки перспективності створення високоефективних приладів на основі нітриду індію і нітриду галію порівняємо їх транспортні властивості носіїв заряду. Відзначимо, що InN і GaN відносяться до з'єднань групи $A^{III}B^V$. Температурна залежність дрейфової рухливості електронів і поле-швидкісна характеристика напівпровідників даної групи – арсеніду галію та фосфіду індію представлені (рис. 6).

Порівняння слабополевої дрейфової рухливості в досліджених нітридах з арсенідом галію показує:

- Для власних напівпровідників при низьких температурах (до 30 К) дрейфова рухливість носіїв в InN в декілька разів вище, ніж в GaAs. При збільшенні температури до 100 К відмінність збільшується;

$$\mu^{\text{InN}}(100 \text{ К}) = 100 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}),$$

$$\mu^{\text{GaAs}}(100 \text{ К}) = 10,5 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}).$$

При наближенні температури до кімнатної рухливість електронів у матеріалах вирівнюється та складає $\mu^{\text{InN}}(300 \text{ К}) = 0,7 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu^{\text{GaAs}}(300 \text{ К}) = 0,7 \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$;

- Інша картина спостерігається при легуванні напівпровідників. При низьких температурах

(30 K) дрейфова рухливість носіїв заряду в GaAs на порядок вище, ніж в InN;

$$\mu_{N_d}^{\text{GaAs}}(30\text{K}) = 7\text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}),$$

$\mu_{N_d}^{\text{InN}}(30\text{K}) = 0,7\text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. Вказане співвідношення характеристик зі збільшенням тем-

ператури поступово зменшується:

$$\mu_{N_d}^{\text{GaAs}}(100\text{K}) = 7,5\text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}),$$

$\mu_{N_d}^{\text{InN}}(100\text{K}) = 1,8\text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. При $T=300\text{ K}$ рухливості стають близькими та співпадають зі значеннями у власних напівпровідниках.

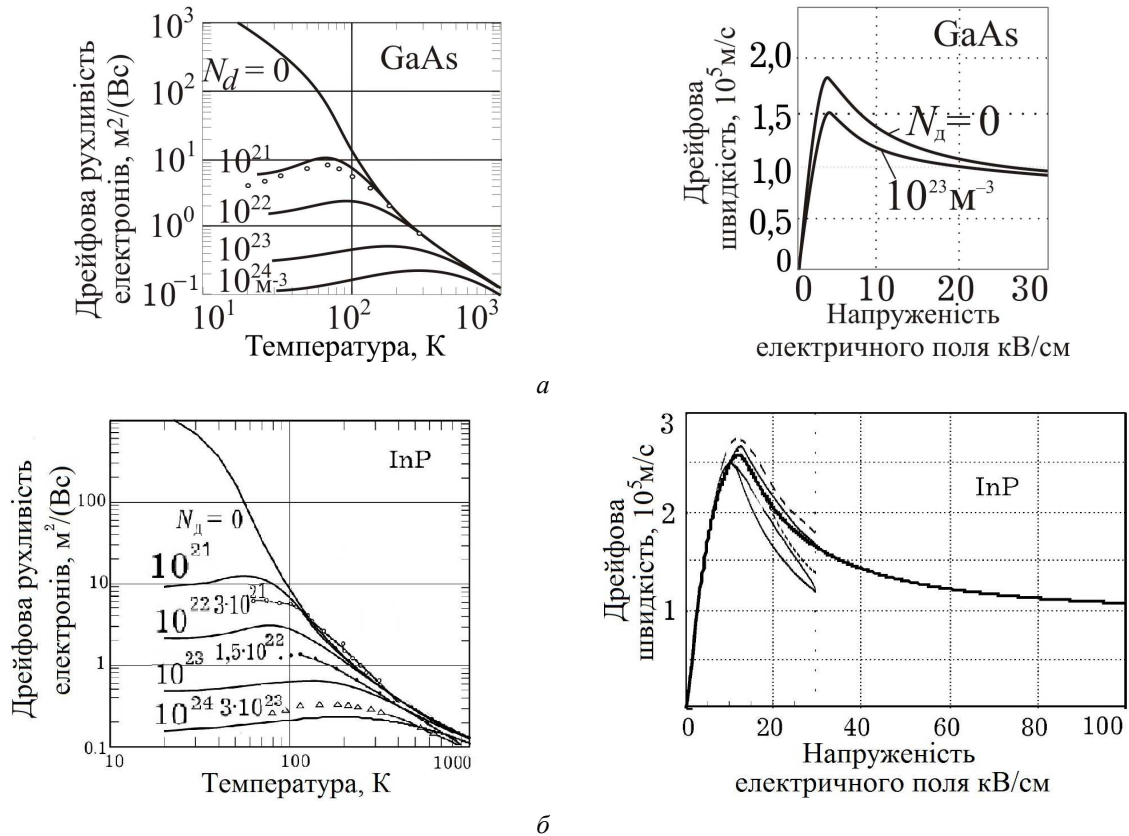


Рис. 6. Температурна залежність дрейфової рухливості електронів і поле-швидкісна характеристика [16]: арсенід галію (а), фосфід індію (б).

- Рухливість електронів в GaN нижче, ніж в GaAs у всьому діапазоні температур. Для власних напівпровідників вказана характеристика за низької температурі відрізняється в декілька разів; $\mu^{\text{GaAs}}(30\text{K}) = 400\text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu^{\text{GaN}}(30\text{K}) = 60\text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. Зі збільшенням температури відмінність значень рухливості поступово зменшується; $\mu^{\text{GaN}}(100\text{K}) = 4\text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. При наближенні до кімнатної температури співвідношення характеристик знов зростає; рухливість електронів в GaAs на порядок вище, ніж в GaN ($\mu^{\text{GaN}}(300\text{K}) = 0,07\text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$).
- При легуванні напівпровідників (GaN, GaAs) картина співвідношення рухливостей носіїв зберігається. При порівнянні дрейфової рухливості електронів у фосфіді індію та досліджених нітридах слід звернути увагу, що відповідна характеристика для арсеніду галію в цілому має однакові з InP

рис. Вказана характеристика для InP лише при певних температурах на декілька відсотків вище або нижче, ніж для GaAs.

Порівняння поле-швидкісних характеристик електронів для нітридів (InN, GaN), GaAs і InP показує:

- близькі значення пікових величин дрейфової швидкості характерні парам напівпровідників: нітрид індію і фосфід індію; нітрид галію і арсенід галію;
- другий характерний параметр поле-швидкісної характеристики – усталене значення дрейфової швидкості – для нітридів вище, ніж для GaAs, InP;
- найбільші значення критичного поля характерні дослідженим нітридам, причому для GaN параметр перевищує більше, ніж на порядок. Відзначимо, що характерні параметри поле-швидкісної характеристики вказують:
 - більше значення усталеної дрейфової швидкості – на можливість отримання підвищеної

щільності струму і швидкодії;

- більше значення критичної напруженості електричного поля – на доцільність конструювання на їх основі приладів підвищеної потужності.

Висновки

Для нітридів індію та галію розраховані та проаналізовані швидкості розсіювання імпульсу для типових видів домішкового і фононних механізмів.

Вперше для нітридів індію та галію розрахована слабкопольова температурна залежність дрейфової рухливості електронів у широкому діапазоні значень концентрації легуючої домішки.

Проведена верифікація результатів моделювання температурної залежності дрейфової рухливості електронів за допомогою перерахунку її в величині холлівської рухливості. Для нітриду індію отримана прийнятна відповідність результатів моделювання з експериментальними даними, для нітриду галію – задовільна.

Для досліджуваних нітридів запропоновані вихідні параметри, що забезпечують узгодження з експериментальними даними при моделюванні транспортних властивостей електронів у режимі слабого електричного поля.

На основі запропонованого набору вихідних параметрів матеріалів розрахована поле-швидкісна характеристика. Її вигляд дозволяє сподіватися на те, що прийнятий набір буде прийнятним також для моделювання властивостей нітриду і в сильному електричному полі.

Проведено порівняння транспортних властивостей нітридів (InN, GaN) з арсенідом галію та фосфідом індію. Відзначимо, що результати чисельного моделювання вказують на перспективність створення на основі InN і GaN високоефективних, швидкодіючих, потужних приладів різного призначення та доцільність проведення досліджень в режимі сильного електричного поля.

Література

- [1] S. O'Leary, P. Siddiqua, W. A. Hadi, B. E. Foutz, M. S. Shur and L. F. Eastman, «*Electron Transport Within III-V Nitride Semiconductors*», Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, Springer International Publishing AG 2017, 2017, pp. 829-850. DOI: 10.1007/978-3-319-48933-9_32
- [2] Sung-Pyo Jung, Denise Ullery, Chien-Hung Lin and Henry P. Leea, «High-performance GaN-based light-emitting diode using high-transparency Ni / Au / Al-doped ZnO composite contacts», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, p.181107, 2005. DOI: 10.1063/1.2120913
- [3] T. Saurova, and I. Baida, «Infrared detectors based on ternary semiconductor quantum structures», *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, Вип. 52(2), с. 65-71, 2016. DOI: 10.20535/1970.52(2).2016.92951
- [4] C.J. Humphreys, «Solid-State Lighting», *Mater. Res. Bull.*, vol. 33, pp. 459-470, 2008. DOI: 10.1557/mrs2008.91
- [5] M. S. Shur, and M. A. Khan, «GaN/AlGaIn heterostructure devices: photodetectors and field-effect transistors», *Mater. Res. Bull.*, no. 22(2), pp. 44-50, 1997. DOI: 10.1557/S0883769400032565
- [6] W. Lu, V. Kumar, E. L. Piner, I. Adesida, «DC, RF, and microwave noise performance of AlGaIn-GaN field effect transistors dependence of aluminum concentration», *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 50, pp. 1069-1074, 2003. DOI: 10.1109/TED.2003.812083
- [7] S. Nakamura, «Blue-green light-emitting diodes and violet laser diodes», *Mater. Res. Soc. Bull.*, no. 22(2), pp. 29-35, 1997. DOI: 10.1557/S088376940003253X
- [8] Ioffe Physico-Technical Institute, "New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties". Режим доступу: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>
- [9] Sadao Adachi. *Properties of Semiconductor Alloys: Group -IV, III-V, II-VI Semiconductors*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2009, 400.
- [10] J. Wu, «When group-III nitrides go infrared: New properties and perspectives», *J. App. Phys.*, vol. 106, p. 011101, 2009. DOI: 10.1063/1.3155798
- [11] В. А. Москалюк, *Фізика електронних процесів. Динамічні процеси*, Київ, Україна: Політехніка, 2004, 180 с.
- [12] Т. А. Саурова, О. В. Семеновська, О. О. Шевчук, «Дослідження дрейфової рухливості електронів в арсеніді індію», *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, Вип. 58(2), с. 41-47, 2019. DOI: 10.20535/1970.58(2).2019.189478
- [13] V. W. L. Chin, T. L. Tansley, T. Osotchan, «Electron mobilities in gallium, indium, and aluminum nitrides», *J. Appl. Phys.* vol. 75, pp. 7365-7372, 1994. DOI: 10.1063/1.356650
- [14] П. С. Киреев, *Фізика полупроводников*, Москва, СССР: Высшая школа, 1975, 584.
- [15] T. D. Veal, C. F. McConville, W. J. Schaff, *Indium Nitride and Related Alloys*, New York: CRC Press by Taylor and Francis Group, 2010, 615.
- [16] В. О. Москалюк, В. І. Тимофеев, А. В. Федяй, *Надшвидкодіючі прилади електроніки*, Київ, Україна: Політехніка, 2014, 528.
- [17] Т. А. Саурова, В. О. Борс, «Властивості арсеніду алюмінію-галію в імпульсному режимі електричного поля», *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, Вип. 57(1), с. 49-55, 2019. DOI: 10.20535/1970.57(1).2019.172023
- [18] Т. Saurova, D. Kuzmenko «Research of impulse properties of indium phosphide», *Вісник КПІ. Серія приладобудування*, Вип. 54(2), с. 49-52, 2017. DOI: 10.20535/1970.54(2).2017.119530

УДК 621.382.3

Т. А. Саурова, Е. В. Семеновская, М. Г. Емельянов*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОНОВ В НИТРИДАХ ИНДИЯ И ГАЛЛИЯ**

Одним из перспективных трехкомпонентных полупроводников является нитрид индия-галлия $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Прогнозирование перспектив создания приборов на основе $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ возможно при тщательном исследовании электрических свойств составляющих его бинарных нитридов; нитрида индия InN и нитрида галлия GaN . В научно-технической литературе представлены исследования холловской подвижности носителей заряда. Соответствие между результатами моделирования холловской подвижности и экспериментальными данными получены введением поправочных коэффициентов.

Целью данной работы является расчет для InN и GaN температурной зависимости дрейфовой подвижности электронов в широком диапазоне степени легирования полупроводников при выборе исходных параметров материалов, позволяющих получить наилучшее соответствие экспериментальным результатам.

Проведено моделирование процессов рассеяния электронов. Впервые для InN и GaN рассчитана температурная зависимость дрейфовой скорости электронов в широком диапазоне степени легирования полупроводника. Проведена верификация результатов моделирования. Рассчитаны поле-скоростные характеристики для InN и GaN .

Полученные результаты указывают на перспективность использования исследованных нитридов при создании высокоэффективных, быстродействующих, мощных приборов различного назначения.

Ключевые слова: нитрид индия; нитрид галлия; рассеяние; дрейфовая подвижность электронов; метод релаксационных уравнений.

T. Saurova, E. Semenovskaya, M. Emelianov*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine***RESEARCH OF TRANSPORT PROPERTIES OF ELECTRONS IN NITRIDES INDIUM AND GALLIUM**

Three-component semiconductors open up new possibilities for creating semiconductor devices.

One of the promising three-component semiconductors is indium-gallium nitride $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, which is considered as a solid alloy of binary compounds - indium nitride InN and gallium nitride GaN .

Prediction of the prospects for creating devices based on $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ is possible with a thorough study of the electrical properties of its binary nitrides; indium nitride and gallium nitride.

In the scientific literature, for these nitrides, studies of the Hall mobility predominate, the temperature dependence of which is described in a narrow range of impurity concentration values and the correspondence of the simulation results to the experimental ones is obtained by introducing correction factors.

The aim of this work is to calculate the temperature dependence of the electron drift mobility for InN and GaN in a wide range of the degree of doping of semiconductors and to choose the initial parameters of the materials that make it possible to obtain the best agreement with the experimental results.

For the nitrides under study, numerical modeling of scattering processes for typical types of impurity (on neutral atoms and impurity ions) and phonon (acoustic, polar optical, intervalley) mechanisms was carried out; momentum scattering rates were calculated and analyzed.

For the first time for indium and gallium nitrides, a temperature dependence of the electron drift mobility was calculated in a wide range of values of the dopant concentration. The simulation results were verified.

The field-velocity characteristics were calculated by the method of relaxation equations and compared with the results obtained by the Monte-Carlo method.

For the nitrides under study, initial parameters are proposed that ensure agreement with experimental data when simulating the transport properties of electrons in a weak electric field mode.

The results of numerical simulations indicate that it is promising to create highly efficient, high-speed, powerful devices for various purposes based on indium nitride and gallium nitride.

Keywords: indium nitride; gallium nitride; scattering rate; electron drift mobility; relaxation equation method.

*Надійшла до редакції
22 листопада 2020 року*

*Рецензовано
01 грудня 2020 року*