

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-03>

УДК 621.382.2

В. О. ЗОЗУЛЯ, н.с.

e-mail: v.zozulia@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7371-5424>

О. В. БОЦУЛА, к. ф.-м. наук, доцент

e-mail: oleg.botsula@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2809-9482>

К. Г. ПРИХОДЬКО, к. ф.-м. наук, доцент

e-mail: kyrylo.prykhodko@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7627-1171>

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м.
Свободи, 4

ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ GaAs - ДІОДІВ З БІЧНОЮ ГРАНИЦЕЮ НА ОСНОВІ ВАРІЗОННОГО GaInAs

Актуальність. Розвиток сучасних систем зв'язку, безпеки та медицини потребує компактних джерел терагерцового випромінювання які здатні працювати при нормальних умовах. Одним з приладів, які здатні забезпечити генерацію терагерцових коливань у низькочастотній частині терагерцового діапазону залишаються діоди, що працюють на ефекті міждолинного перенесення електронів. Модифікація планарних варіантів таких приладів дозволяє підвищити ефективність та граничні частоти їх роботи. Планарні діоди, що містять бічну активну границю, яка являє собою варізонний напівпровідник розглядаються як можливі твердотілі джерела терагерцового випромінювання. Оптимізація їх параметрів є важливий процес, що дозволить підвищити ефективність їх роботи.

Метою роботи є дослідження впливу концентрації легуючої домішки на характеристики планарних GaAs- діодів з активною бічною границею на основі варізонного InGaAs

Методи і методологія. Для отримання характеристик діода проводиться числове моделювання процесів переносу заряду в ньому з використання багаточастинкового методу Монте-Карло з врахуванням усіх актуальних механізмів розсіяння та процесу ударної іонізації. У роботі обчислюються залежності густини струму при різній величині постійної напруги на діоді, а також визначаються оптимізовані за діючою напругою на діоді ефективності та потужності змінного струму при роботі діода в режимі генерації. Всі обчислення проводяться для різних концентрацій донорної домішки в каналі діода та в активній бічній границі на частотах резонатора 200 ГГц та 250 ГГц.

Результати. Показано існування оптимальних концентрацій та співвідношення між концентраціями в каналі діода та бічній границі. Максимальна величина ефективності відповідає концентрації в каналі близько 10^{17} см^{-3} та концентраціям донорної домішки активній бічній границі $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при генерації на частоті 250 ГГц.

Висновки. Оптимальна концентрація для GaAs- діода Ганна з довжиною 1,28 мкм є більшою 10^{17} см^{-3} в каналі діода і складає близько $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ у АБГ. Існує можливість отримання оптимальних умов для генерації на максимальних частотах роботи діода.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ефект міждолинного перенесення електронів, активна бічна границя, молярна частка, варізонний шар, ударна іонізація, розсіяння, чисельне моделювання, субтерагерцовий діапазон.

Як цитувати: Зозуля ВО, Боцула ОВ, Приходько КГ. Вплив легування на ефективність роботи GaAs - діодів з бічною границею на основі варізонного GaInAs. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023;39:27-35. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-03>

In cites: Zozulia VO, Botsula OV, Prykhodko KH. The impact of doping on the efficiency of GaAs –diode with active graded GaInAs side border. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”. 2023 ;39:27-35. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-39-03>

ВСТУП

Створення мініатюрних джерел терагерцового випромінювання є одною із актуальних задач, що виникає у зв'язку із активним інтересом до розробки систем терагерцового діапазону. Терагерцове випромінювання має великі перспективи для використання засобах неінвазивного й безруйнівного контролю [1], у засобах діагности медичного призначення [2-4], у системах передачі даних та зв'язку ближнього радіусу дії [5,6] та інших. Окремими прикладами застосування терагерцового випромінювання є системи безпеки, де воно використовується для виявлення вибухових речовин або об'єктів, які є прозорими у рентгенівському діапазоні [7-10].

Хоча на сьогодні існує багато прикладів створення ефективних та достатньо потужних джерел терагерцового діапазону, більшість з них є достатньо габаритними. Сюди відносяться всі прилади вакуумної електроніки та більшість твердотілих лазерів, деякі з яких, як, наприклад, квантово-каскадні лазери, мають досить непогані характеристики, однак потребують в тому числі додаткового охолодження та не здатні працювати за температури вищої 250 К [11,12].

Компактні твердотілі прилади традиційної електроніки мають ряд фундаментальних обмежень, які обумовлені інерційністю процесів переносу заряду в них. Фактично, лише діоди, що працюють на ефекті резонансного тунелювання, мають досить малі розміри та можуть забезпечити генерацію коливань на частотах до 2 ТГц [13]. Основним їх недоліком є мала вихідна потужність, яка складає одиниці мікроват, що в багатьох випадках є недостатнім.

Частково компенсувати потребу в малогабаритних джерел в низькочастотній частині терагерцового діапазону можна шляхом покращення параметрів традиційних приладів на зразок діодів, що використовують ефект міждолинного переносу електронів (МПЕ) та приладів на лавино-пролітних ефектах. Лавино-пролітні діоди здатні генерувати коливань струму на частотах вищих 300 ГГц з високою вихідною потужністю [14,15], однак головною проблемою таких пристроїв є поява шумів, які пов'язані з ударною іонізацією (УІ). Інтенсивність шуму ЛПД вища за тепловий шум, який виникає в процесі формування домену в діоді Ганна [16,17].

Гранична частота приладів з міждолинним перенесенням електронів обмежується низкою фізичних проблем, що пов'язані з інерційністю механізмів, з якими пов'язано виникнення коливань струму. Основними факторами є величина проміжку часу набору енергії для переходів електронів з центральної в бічні долини і обумовлений цим процес наростання хвилі просторового заряду, дрейфова швидкість руху носіїв заряду і час релаксації діода, який у звичайному діоді зв'язаний з розмоктуванні просторового заряду в анодному контакті.

Вочевидь для генерації коливань у субтерагерцовому та терагерцовому діапазоні діоди, що працюють на ефекті міждолинного переносу електронів також потребують модифікації. Одним із напрямків є використання напівпровідникових матеріалів, у яких вказані вище часові проміжки є мінімальними, а величина дрейфової швидкості є високою. Наприклад заміна традиційного GaAs на InP за умови збереження конструкції приладу дозволяє збільшити максимальну робочу частоту з 200 до 300 ГГц [18], максимальне експериментально отримане значення частоти генерації за умови використання в якості матеріалу нітрид галію склало 400 ГГц [19]. Окремо потрібно відзначити використання діодів з активною областю на основі варізонного напівпровідника. Результати моделювання таких приладів з використанням напівпровідникових сполук GaInAs та InPAs показують, що вони значно ефективніші за звичайні діоди і мають досить високі граничні частоти роботи [20,21]. У згаданих приладах підвищення ефективності роботи та граничної частоти досягається в основному завдяки зменшенню часу переходу із центральної долин в бічні та більш високій дрейфовій швидкості електронів.

Ще одним напрямком, який заслуговує уваги, є використання планарних діодних структур, які мають ряд переваг над вертикальними структурами. Насамперед це застосування методів літографії для формування каналу заданої довжини, що забезпечує точне отримання субмікронних розмірів активної області діода. Це дає можливість генерувати коливання на відповідних пролітних частотах [22] та керувати частотою генерації шляхом переходу на вищі гармоніки. Важливою особливістю таких діодів є можливість відтворити складну структуру приладу, наприклад, реалізувати його у вигляді сандвіч – структури, застосувати селективне та дельта- легування каналу діода [23], створити складні комбіновані контакти [24].

Планарна конструкція дозволяє розмішувати на бічній поверхні каналу додаткові електроди та елементи, що можуть впливати на роботу діода і його вихідні характеристики. Ряд таких приладів було розглянуто в роботах [25-27]. Їх особливістю є розміщення на каналі діода активних бічних напівпровідникових елементів у вигляді гомогенних та гетерогенних структур, які формували активну бічну границю (АБГ) до діода. Було виявлено, що такий підхід до формування структури діода дає можливість отримати частоти генерації вищі за 300 ГГц [25, 26], а у окремих випадках вищі за 500 ГГц [27]

Однак питання щодо подальшої оптимізації планарних діодів з АБГ залишається відкритим. Тому метою цієї роботи стало дослідження впливу концентрації носіїв заряду в каналі діода та АБГ на генерацію коливань струму планарним GaAs - діодами з АБГ на основі варізонного шару GaInAs.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

На рис.1 (а) показано переріз планарного n^+-n-n^+ діода Ганна з АБГ $n-n^+$ -структурою, який було розглянуто в роботі. Діод має планарну структуру загальною довжиною $L_y = 1,28$ мкм та шириною $L_x = 0,32$ мкм. Діод представляє собою n -GaAs канал (2) який сформовано на напівізолюючій (SI) підкладці (1). Контактні області n^+ , (3) та (4), мають $0,16 \times 0,16$ мкм, і представляють собою сильно леговані області з концентрацією домішок $5 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Відповідно, довжина активної області діода складає $l_a = 0,98$ мкм. Вважається, що металічні контакти (5) та (6) з n^+ -областями (3) та (4) утворюють омичні контакти. АБГ (7) являє собою варізонний шару GaInAs довжиною $L_B = 0,64$ мкм та шириною $l_b = 0,16$ мкм, який розміщується поверхні каналу на відстані $l_{kb} = 0,64$ мкм від n^+ - області катодного контакту та електрично з'єднується з анодним контактом (6) за допомогою металевого провідника (8).

Залежність молярної частки Ga у сполучі $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$ в АБГ від відстані до каналу показано на рис.1 (б). Вона описується функцією Гаусса з максимумом на межі, яка розділяє канал та АБГ.

Для моделювання роботи діода була використана двовимірна модель, яка відповідала рис. 1. Моделювання руху електронів в приладі проводилося з використанням багаточастинкового методу Монте-Карло, особливості якого наведено в роботах [25-27]. При моделюванні процесів розсіювання носіїв заряду було враховано усі найвпливовіші механізми розсіювання, які існують у розглянутих матеріалах: розсіювання на деформаційному потенціалі акустичних та оптичних фононів, розсіювання на полярних оптичних фонах, міждолинне розсіювання, та розсіювання на іонізованих домішках. В області варізонного шару також враховувалося розсіювання на сплавному потенціалі.

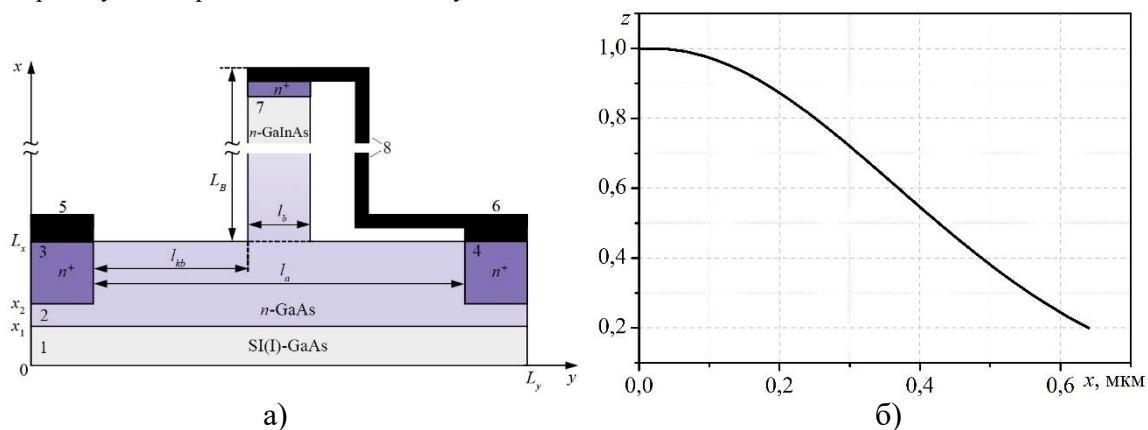


Рис. 1. Розріз структури діода (а): підкладка (1), активна область (2), високолеговані контактні області (n^+), катод (3) і анод (4), металеві контакти (5, 6), бічний граничний елемент (7), металева перемичка (8). Розподіл молярної частки Ga z у сполучі $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$ у активному бічному елементі (б)

Fig. 1. The cross-section of diode structure (a): substrate (1), active region (2), highly doped contact regions (n^+), cathode (3) and anode (4), metal contacts (5,6), side boundary element (7), metal jumper (8). Distribution of Ga mole fraction $z(x)$ in active side border (b)

Особливістю діода є існування досить малого значення ширини забороненої зони в GaInAs у варізонному шарі на анодному контакті. Відповідно, це призводить до можливості виникнення ударної іонізації як у варі зонному шарі АБГ, так і інших частинних діода за умови, що напруженості електричного поля в них є достатні для набуття електроном відповідної енергії. Тому для врахування цього процесу для опису зони провідності була використана трьохдолинна Γ -X-L- модель зони провідності у наближенні непараболічного закону дисперсії, а для валентної зони – однодолинна модель, яка включала параболічну зону важких дірок. Такий вибір обумовлений найбільшим значенням ефективної маси дірок, а відповідно, найменшим значенням порогової енергії виникнення ударної іонізації саме при взаємодії електронів з зоною важких дірок. Ударна іонізація описувалася в рамках моделі, що була запропонована в [28], що враховує вплив непараболічності закону дисперсії на величину порогової енергії, що відповідає початку ударної іонізації. В залежності молярної частки Ga в АБГ, яка показана на рис.1 (б) частка Ga на анодному контакті становить $z=0,2$. Такий розподіл молярної частки дозволяє локалізувати УІ у прианодній області, що продемонстровано у роботі [29].

Для визначення сили, що діє на частинку, в модельній області пристрою задавалися послідовність вкладених сіток G_H , розмір кожної з яких відрізняється від попередньої у 2 рази. Заряд кожної частинки розподіляються у вузли найдрібнішої сітки з використанням покращеної схеми СІС [30], яка враховувала просторову залежність діелектричної проникності середовища. Після цього знаходився розв'язок рівняння Пуассона з використанням повного багатосіткового методу [31]. За отриманим розподілом потенціалу та розподілом густини заряду визначалася величина сили, що діяла на кожен заряджений частинку з боку електричного поля. В області варізонного шару повна сила знаходилася із врахуванням квазіелектричних сил, що пов'язані зі зміною складу напівпровідника. Рух частинок визначався у відповідності до рівнянь руху з урахуванням закону дисперсії [32]. Параметри матеріалів були вибрані аналогічні до [29,33,34]. При моделюванні не враховувались ефекти пов'язані з розігрівом пристрою і температура кристалічної решітки вважалася постійною і дорівнювала 300 К.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДІВ

Основне завдання роботи було встановити як впливає концентрація домішки на характеристики діодів. Дослідження проводилися для зміни концентрації домішки в інтервалі від $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Залежності густини струму від величини постійної напруги, що діє на діоді показано на рис.2.

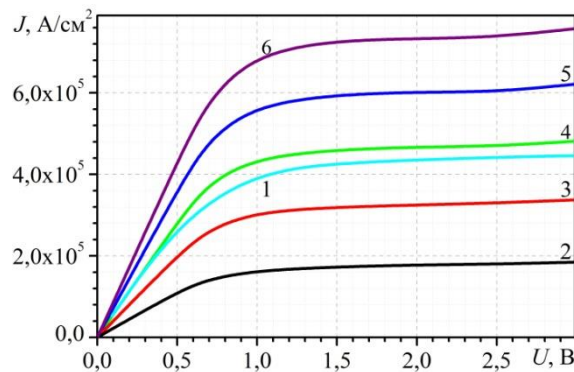


Рис. 2. Залежності густини струму від прикладеної напруги для GaAs планарного діоду з варізонною АБГ на основі $\text{Ga}_2\text{In}_{1-z}\text{As}$: 1 – планарний GaAs діод з концентрацією носіїв у каналі $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2-5 – при рівній концентрації носіїв у каналі та у АБГ: 2 – $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 3 – $N_d = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 4 – $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 5 – $N_d = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 6 – $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$

Fig. 2. Current density J versus bias voltage U for GaAs planar diode with ASB based on graded gap $\text{Ga}_2\text{In}_{1-z}\text{As}$: 1 – GaAs planar diode with donor impurity concentration in active region $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; 2-5 – at equal impurity concentration in active region and ASB: 2 – $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; 3 – $N_d = 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; 4 – $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; 5 – $N_d = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; 6 – $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Наведені залежності відповідають різним величина концентрації домішки в діоді за умови її однокрової величини в каналі та АБГ. Для порівняння на цьому рисунку також наведено залежність густини струму від напруги для діода без АБГ з концентрацією донорної домішки в каналі $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Можна відмітити, що у всіх випадках ділянка статичної від'ємної диференціальної провідності на залежностях не спостерігається. В роботах [25,26] показано, що густини струму в діоді навіть без АБГ насичується за високих значеннях напруги за рахунок формування високих напруженостей електричного поля в аноді каналу, що характерно для каналів з високим ступенем легування. За низьких рівнів легування залежності густини струму якісно близькі до характеристики діоду без АБГ.

При збільшенні концентрації густина струму в цілому є вищою при усіх значеннях напруги. Водночас при збільшенні напруги з'являються ділянки зростання струму (рис.2. криві 4,5), які виникають через ударну іонізацію в АБГ. УІ з одного боку є деструктивним фактором, оскільки може негативно впливати на величину диференціального опору діода, а іншого боку за малої інтенсивності цього процесу вона може сприяти релаксації енергії електронів в аноді та покращити частотні властивості приладу, що було показано в [29].

Для визначення впливу концентрації на ефективність генерації було проаналізовано енергетичні характеристики діодів. Слід зазначити, що відсутність ділянок з від'ємною диференціальною провідністю на статичних залежностях густини струму від напруги у розглянутих діодах не є обов'язковим фактором виникнення генерації. Зокрема у роботах [14,35,36] показано, що у таких пристроях процес генерації пов'язаний з динамічною негативною провідністю, а частота на якій генерують діоди може бути досить високою.

В даній роботі оцінки величини ефективності генерації діодів були зроблено у припущенні, що прилад знаходиться в одноконтурному резонаторі з високою добротністю, і, відповідно, напругу, що діє на діоді, можна представити у вигляді суми постійної напруги зміщення U_0 та змінної складової на частоті резонатора (перша гармоніка):

$$U(t) = U_0 + U_1 \sin 2\pi ft, \quad (1)$$

де U_1 – амплітуда першої гармоніки, f – частота першої гармоніки.

Оцінювалася максимальна можлива величина ККД генерації, яка обчислювалася шляхом оптимізації цього параметра за значеннями напруги зміщення та амплітуди першої гармоніки. Оптимізація проводилася за постійної величини частоти резонатора, яка була вибрана рівною 250 ГГц. Розглядалися випадки, коли величина концентрації була однаковою в каналі і АБГ, так і випадки, коли ці концентрації відрізнялися.

На рис.3 показані отримані характеристики оптимізованого ККД та густини потужності для різних співвідношень концентрацій легуючих домішок в каналі та АБГ для двох фіксованих частот: 200 та 250 ГГц.

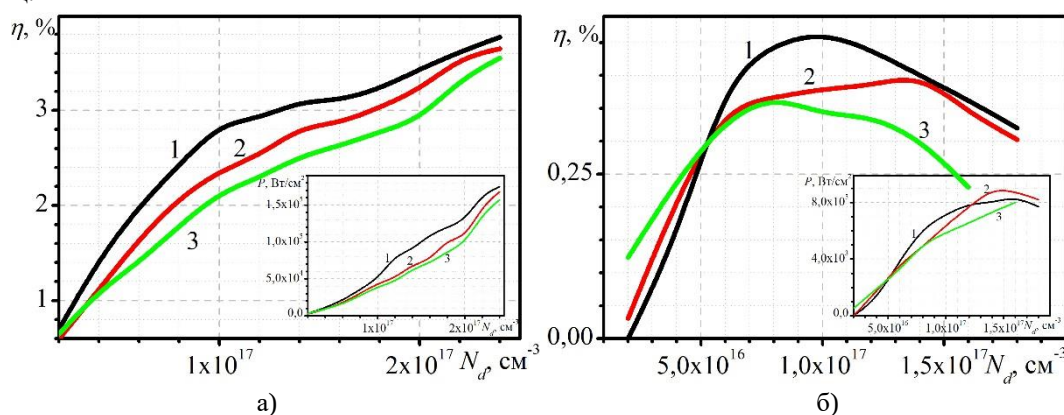


Рис. 3. Залежність оптимізованого ККД генерації від концентрації донорів у каналі планарного GaAs діода з АБГ на основі варізонного шару $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ та густини потужності (на вставці) на частоті (а) $f = 200$ ГГц (б) $f = 250$ ГГц при різних концентраціях донорів у АБГ: 1 – $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2 – $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 3 – $N_d = 10 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Fig. 3. Optimized generation efficiency for planar GaAs diode with ASB based on graded gap $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ and power density (inset) at frequency (a) $f = 200$ GHz (б) $f = 250$ GHz at different donor impurity concentration in ASB: 1 – $N_d = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 2 – $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 3 – $N_d = 10 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

Спостерігаються якісні відмінності в залежностях: залежність ККД генерації різних частотах. На частоті 250 ГГц спостерігається оптимум, який досягається коли концентрація електронів у каналі становить близько 10^{17} см^{-3} , а у АБГ – $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (крива 1 на рис 3(б)). На частоті 200 ГГц найбільша ефективність також відповідає концентрації в АБГ – $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ проте оптимуму не було отримано. При малих концентраціях електронів в каналі ефективність генерації є малою через труднощі у формування нестійкостей поля, амплітуда яких безпосередньо визначається величиною концентрації. Оптимальна концентрація в АБГ відповідає ситуації, коли на межі, що розділяє її з каналом утворюється область з підвищеною напруженістю електричного поля, яка сприяє формуванню рухомих нестійкостей поля як в каналі так і в активній області діода, рис.4. З наведених розподілів напруженостей поля протягом періоду коливань також видно, що у активній області викують нестійкості типу зарядженого шару, в той час як в області активної границі форма нестійкості близька до доменної, однак рух доменів спостерігається лише в обмеженій частині активної границі близькій до каналу. При підвищенні концентрації в каналі напруженість поля в аноді зростає, що ускладнює формування рухомих нестійкостей в каналі, однак це в меншій мірі впливає на нестійкості в АБГ та зменшує величину послідовного опору, ввімкненого послідовно з нею, що в деякій мірі пояснює залежність ККД на частоті 200 ГГц.

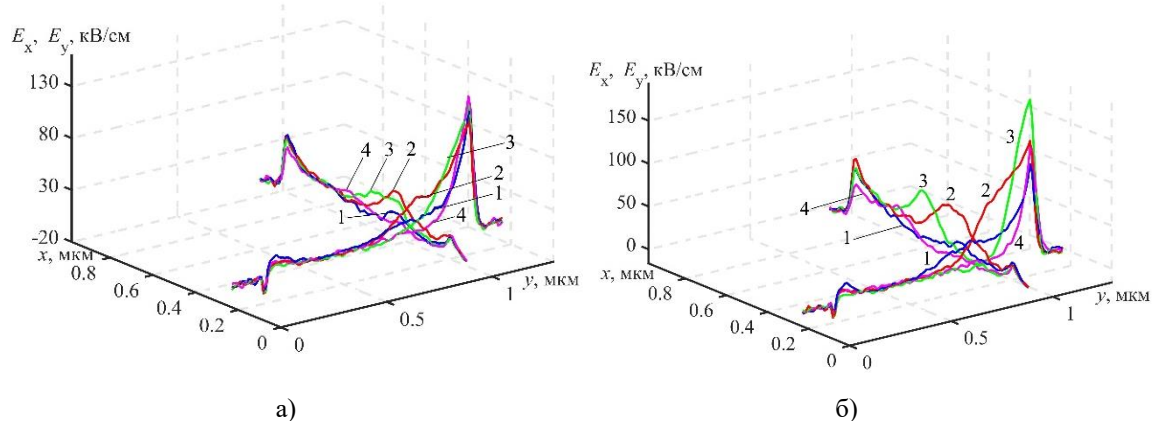


Рис. 4. Розподіл E_y -компоненти електричного поля уздовж лінії $x = 0,24$ мкм та E_x -компоненти уздовж лінії $y = 0,89$ мкм у різні моменти часу t протягом періоду коливань T у АБГ на основі $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$ з $l_b = 0,16$ мкм, $L_B = 0,64$ мкм та $l_{kb} = 0,64$ мкм та (а) з концентрацією домішок у АБГ $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ та $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ у каналі GaAs-діода у разі $f = 250$ ГГц, $U_0 = 2,3$ В, $U_1 = 0,35$ В та (б) з концентрацією домішок у АБГ $N_d = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_d = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ у каналі GaAs-діода у разі $f = 200$ ГГц, $U_0 = 2,7$ В, $U_1 = 0,7$ В: 1 – $t = 0$, 2 – $t = T/4$, 3 – $t = T/2$, 4 – $t = 3T/4$.

Fig. 4. Distribution of E_y -component of electrical field in cross section at $x = 0,24 \mu\text{m}$ and the E_x -component in cross section $y = 0,89 \mu\text{m}$ for GaAs planar diode with ASB based on graded gap $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$ with (a) donor impurity concentration in active region $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ and $N_d = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ donor impurity concentration in ASB at $f = 250$ GHz, $U_0 = 2,3$ V, $U_1 = 0,35$ V and (b) donor impurity concentration in active region $N_d = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and $N_d = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ donor impurity concentration in ASB at $f = 200$ GHz, $U_0 = 2,7$ V, $U_1 = 0,7$ V with $l_b = 0,16 \mu\text{m}$, $L_B = 0,64 \mu\text{m}$ та $l_{kb} = 0,64 \mu\text{m}$ at different times during the oscillations period T : 1 – $t = 0$, 2 – $t = T/4$, 3 – $t = T/2$, 4 – $t = 3T/4$.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Основні результати зводяться до наступного:

1. У GaAs діоді з АБГ на основі варізонного шару InGaAs формування нестійкостей статичного розподілу електричного поля в діоді спостерігається як в каналі діода, так і області АБГ.
2. Величина концентрації донорної домішки та співвідношення концентрацій донорної домішки в каналі та АБГ є суттєвим фактором, який впливає на ефективність генерації та вихідну потужність.
3. На максимальних для розглянутого діода частотах спостерігаються оптимальні співвідношення між концентрація донорної домішки в областях діода: 10^{17} см^{-3} , в каналі та $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в АБГ.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kiarash Ahi, Anwar M. Advanced terahertz techniques for quality control and counterfeit detection. Proceedings of SPIE. 2016 May 26.
2. Wei L, Yu L, Jiaoqi H, Guorong H, Yang Z, Weiling F. Application of terahertz spectroscopy in biomolecule detection. Frontiers in Laboratory Medicine. 2018 Dec;2(4):127–33.
3. Vafapour Z, Keshavarz A, Ghahraloud H. The potential of terahertz sensing for cancer diagnosis. Heliyon. 2020 Dec 3 ;6(12): e05623.
4. Arnone DD, Ciesla CM, A. Corchia, Shunji Egusa, Pepper M, Chamberlain JM, et al. Applications of terahertz (THz) technology to medical imaging. Proceedings of SPIE. 1999 Sep 9.
5. Oshima N, Hashimoto K, Suzuki S, Asada M. Wireless data transmission of 34 Gbit/s at a 500-GHz range using resonant-tunnelling-diode terahertz oscillator. Electronics Letters. 2016 Oct 27;52(22):1897–8.
6. Abdullah Al-Khalidi, Wang J, Wasige E. Compact J-band Oscillators With 1mW RF output Power and Over 110 GHz Modulation Bandwidth. Enlighten: Publications (The University of Glasgow). 2018 Sep 1.
7. Appleby R, Wallace HB. Standoff Detection of Weapons and Contraband in the 100 GHz to 1 THz Region. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2007 Nov;55(11):2944–56.
8. Song HJ, Tadao Nagatsuma. Handbook of Terahertz Technologies. CRC Press; 2015.
9. Isogawa T, Kumashiro T, Song HJ, Ajito K, Kukutsu N, Iwatsuki K, et al. Tomographic Imaging Using Photonically Generated Low-Coherence Terahertz Noise Sources. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2012 Sep;2(5):485–92.
10. Chan WL, Deibel J, Mittleman DM. Imaging with terahertz radiation. Reports on Progress in Physics. 2007

- Jul 12;70(8):1325–79.
11. Vitiello MS, Alessandro Tredicucci. Physics and technology of Terahertz quantum cascade lasers. *Advances in physics*: X. 2021 Jan 1;6(1).
 12. Khalatpour A, Paulsen A, Deimert C, Wasilewski ZR, Hu Q. High-power portable terahertz laser systems. *Nature Photonics*. 2020 Nov 2;15(1):16–20.
 13. Izumi R, Suzuki S, Asada M. 1.98 THz resonant-tunneling-diode oscillator with reduced conduction loss by thick antenna electrode. 2017 Aug 1.
 14. Dai Y, Lu Z, Ye Q, Dang J, Zhao S, Lei X, et al. Study of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Homotype Heterojunction IMPATT Diodes. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021 Nov 1;68(11):5469–75.
 15. Xiu-sheng L, Yang L, Zhang X, Ma X, Hao Y. $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructure IMPATT diode for D-band applications. *Applied Physics A*. 2019 Feb 23;125(3).
 16. Sze SM. *Modern Semiconductor Device Physics*. Wiley-Interscience; 1998.
 17. Sze SM, Ng KK. *Physics of semiconductor Devices*. John Wiley & Sons; 2006.
 18. Eisele H, Naftaly M, Fletcher JR, Steenson DP, Stone MR. The Study of Harmonic-Mode Operation of GaAs TUNNETT Diodes and InP Gunn Devices Using a Versatile Terahertz Interferometer. *Proceedings of the 15th International Symposium on Space Terahertz*. 2004 Jan 1;336.
 19. Hajo AS, Oktay Yilmazoglu, A. Dadgar, Franko Küppers, Kusserow T. Reliable GaN-Based THz Gunn Diodes With Side-Contact and Field-Plate Technologies. *IEEE Access*. 2020 Jan 1; 8:84116–22.
 20. Storozhenko IP. Frequency characteristics of diodes with intervalley electron transfer that are based on variband $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ with various cathode contacts. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2007 Oct 1;52(10):1158–64.
 21. Storozhenko IP. $\text{InP}_{1-x(z)}\text{As}_{x(z)}$ Variband Gunn Diodes with Different Cathode Contacts. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2007;66(19):1775–90.
 22. Shur MS. *GaAs Devices and Circuits*. Springer eBooks. 1987.
 23. Khalid A, Pilgrim NJ, Dunn GM, Holland M, Stanley CR, Thayne I, et al. A Planar Gunn Diode Operating Above 100 GHz. *IEEE Electron Device Letters*. 2007 Oct 1;28(10):849–51.
 24. Montes M, Dunn GM, Stephen A, Khalid A, Li C, David, et al. Reduction of Impact Ionization in GaAs-Based Planar Gunn Diodes by Anode Contact Design. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2012 Mar 1;59(3):654–60.
 25. Botsula OV, Zozulia VO. Energy and Frequency Properties of Planar n^+-n-n^+ Diodes with Active Side Boundary. *Journal of Nano-and electronic Physics*. 2021 Jan 1;13(6):06028-4.
 26. Zozulia VO, Botsula OV, Prykhodko KH, Sanin S, Katrich G, Fedosova S. Planar GaAs-InGaAs Heterostructure for Generation in Long Wave Part of Terahertz Range. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2022 Oct 3.
 27. Botsula OV, Zozulia VO. Generation of THz Oscillations by Diodes with Resonant Tunneling Boundaries. *Journal of Nano-and electronic Physics*. 2020 Jan 1;12(6):06037-4.
 28. Brennan KF, Mansour NS. Monte Carlo calculation of electron impact ionization in bulk InAs and HgCdTe. *Journal of Applied Physics*. 1991 Jun 1;69(11):7844–7.
 29. Botsula OV, Prykhodko KH, Zozulia VO. Impact ionization in graded gap transferred electron diode. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2021 Aug 26.
 30. Birdsall CK, Fuss D. Clouds-in-clouds, clouds-in-cells physics for many-body plasma simulation. *Journal of Computational Physics*. 1969 Apr 1;3(4):494–511.
 31. Joppich W, Mijalković S. Multigrid methods for process simulation. *Microelectronics Journal*. 1995 Mar 1;26(2–3):xxvii–xxviii.
 32. Приходько КГ, Боцула ОВ, Зозуля ВО. Особливості розвитку ударної іонізації в напівпровідникових сполуках InGaN та InAlN. *Вісник Харківського Національного Університету Імені ВН Каразіна*. 2021 Червень 30;(34):19–28.
 33. Vurgaftman I, Meyer JR, Ram-Mohan LR. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*. 2001 Jun 1;89(11):5815–75.
 34. Adachi S. *Properties of semiconductor alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. John Wiley & Sons; 2009.
 35. Iniguez-De-La-Torre A, Íñiguez-De-La-Torre I, Matéos J, González T, Sangaré P, Faucher M, et al. Searching for THz Gunn oscillations in GaN planar nanodiodes. *Journal of Applied Physics*. 111(11).
 36. Rolland PA, Friscourt, Salmer G, Constant E. Theoretical study of 100 GHz GaAs transferred-electron devices. *Journal De Physique Colloque*. 1981 Oct 1;42(C7):C7-176.

REFERENCES

1. Kiarash Ahi, Anwar M. Advanced terahertz techniques for quality control and counterfeit detection. *Proceedings of SPIE*. 2016 May 26.
2. Wei L, Yu L, Jiaoqi H, Guorong H, Yang Z, Weiling F. Application of terahertz spectroscopy in biomolecule detection. *Frontiers in Laboratory Medicine*. 2018 Dec;2(4):127–33.

3. Vafapour Z, Keshavarz A, Ghahraloud H. The potential of terahertz sensing for cancer diagnosis. *Heliyon*. 2020 Dec 3 ;6(12): e05623.
4. Arnone DD, Ciesla CM, A. Corchia, Shunji Egusa, Pepper M, Chamberlain JM, et al. Applications of terahertz (THz) technology to medical imaging. *Proceedings of SPIE*. 1999 Sep 9.
5. Oshima N, Hashimoto K, Suzuki S, Asada M. Wireless data transmission of 34 Gbit/s at a 500-GHz range using resonant-tunnelling-diode terahertz oscillator. *Electronics Letters*. 2016 Oct 27;52(22):1897–8.
6. Abdullah Al-Khalidi, Wang J, Wasige E. Compact J-band Oscillators With 1mW RF output Power and Over 110 GHz Modulation Bandwidth. *Enlighten: Publications (The University of Glasgow)*. 2018 Sep 1.
7. Appleby R, Wallace HB. Standoff Detection of Weapons and Contraband in the 100 GHz to 1 THz Region. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2007 Nov;55(11):2944–56.
8. Song HJ, Tadao Nagatsuma. *Handbook of Terahertz Technologies*. CRC Press; 2015.
9. Isogawa T, Kumashiro T, Song HJ, Ajito K, Kukutsu N, Iwatsuki K, et al. Tomographic Imaging Using Photonically Generated Low-Coherence Terahertz Noise Sources. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2012 Sep;2(5):485–92.
10. Chan WL, Deibel J, Mittleman DM. Imaging with terahertz radiation. *Reports on Progress in Physics*. 2007 Jul 12;70(8):1325–79.
11. Vitiello MS, Alessandro Tredicucci. Physics and technology of Terahertz quantum cascade lasers. *Advances in physics: X*. 2021 Jan 1;6(1).
12. Khalatpour A, Paulsen A, Deimert C, Wasilewski ZR, Hu Q. High-power portable terahertz laser systems. *Nature Photonics*. 2020 Nov 2;15(1):16–20.
13. Izumi R, Suzuki S, Asada M. 1.98 THz resonant-tunneling-diode oscillator with reduced conduction loss by thick antenna electrode. 2017 Aug 1.
14. Dai Y, Lu Z, Ye Q, Dang J, Zhao S, Lei X, et al. Study of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Homotype Heterojunction IMPATT Diodes. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021 Nov 1;68(11):5469–75.
15. Xiu-sheng L, Yang L, Zhang X, Ma X, Hao Y. $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ heterostructure IMPATT diode for D-band applications. *Applied Physics A*. 2019 Feb 23;125(3).
16. Sze SM. *Modern Semiconductor Device Physics*. Wiley-Interscience; 1998.
17. Sze SM, Ng KK. *Physics of semiconductor Devices*. John Wiley & Sons; 2006.
18. Eisele H, Naftaly M, Fletcher JR, Steenson DP, Stone MR. The Study of Harmonic-Mode Operation of GaAs TUNNETT Diodes and InP Gunn Devices Using a Versatile Terahertz Interferometer. *Proceedings of the 15th International Symposium on Space Terahertz*. 2004 Jan 1;336.
19. Hajo AS, Oktay Yilmazoglu, A. Dadgar, Franko Küppers, Kusserow T. Reliable GaN-Based THz Gunn Diodes With Side-Contact and Field-Plate Technologies. *IEEE Access*. 2020 Jan 1; 8:84116–22.
20. Storozhenko IP. Frequency characteristics of diodes with intervalley electron transfer that are based on variband $\text{In}_{x(z)}\text{Ga}_{1-x(z)}\text{As}$ with various cathode contacts. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2007 Oct 1;52(10):1158–64.
21. Storozhenko IP. $\text{InP}_{1-x(z)}\text{As}_{x(z)}$ Variband Gunn Diodes with Different Cathode Contacts. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2007;66(19):1775–90.
22. Shur MS. *GaAs Devices and Circuits*. Springer eBooks. 1987.
23. Khalid A, Pilgrim NJ, Dunn GM, Holland M, Stanley CR, Thayne I, et al. A Planar Gunn Diode Operating Above 100 GHz. *IEEE Electron Device Letters*. 2007 Oct 1;28(10):849–51.
24. Montes M, Dunn GM, Stephen A, Khalid A, Li C, David, et al. Reduction of Impact Ionization in GaAs-Based Planar Gunn Diodes by Anode Contact Design. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2012 Mar 1;59(3):654–60.
25. Botsula OV, Zozulia VO. Energy and Frequency Properties of Planar n^+-n-n^+ Diodes with Active Side Boundary. *Journal of Nano-and electronic Physics*. 2021 Jan 1;13(6):06028-4.
26. Zozulia VO, Botsula OV, Prykhodko KH, Sanin S, Katrich G, Fedosova S. Planar GaAs-InGaAs Heterostructure for Generation in Long Wave Part of Terahertz Range. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2022 Oct 3.
27. Botsula OV, Zozulia VO. Generation of THz Oscillations by Diodes with Resonant Tunneling Boundaries. *Journal of Nano-and electronic Physics*. 2020 Jan 1;12(6):06037-4.
28. Brennan KF, Mansour NS. Monte Carlo calculation of electron impact ionization in bulk InAs and HgCdTe. *Journal of Applied Physics*. 1991 Jun 1;69(11):7844–7.
29. Botsula OV, Prykhodko KH, Zozulia VO. Impact ionization in graded gap transferred electron diode. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2021 Aug 26.
30. Birdsall CK, Fuss D. Clouds-in-clouds, clouds-in-cells physics for many-body plasma simulation. *Journal of Computational Physics*. 1969 Apr 1;3(4):494–511.
31. Joppich W, Mijalković S. Multigrid methods for process simulation. *Microelectronics Journal*. 1995 Mar 1;26(2–3):xxvii–xxviii.
32. Приходько КГ, Боцула ОВ, Зозуля ВО. Особливості розвитку ударної іонізації в напівпровідникових сполуках InGaAs та InAlN . Вісник Харківського Національного Університету Імені ВН Каразіна. 2021 Червень 30;(34):19–28.

33. Vurgaftman I, Meyer JR, Ram-Mohan LR. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*. 2001 Jun 1;89(11):5815–75.
34. Adachi S. Properties of semiconductor alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. John Wiley & Sons; 2009.
35. Iniguez-De-La-Torre A, Íñiguez-De-La-Torre I, Matéos J, González T, Sangaré P, Faucher M, et al. Searching for THz Gunn oscillations in GaN planar nanodiodes. *Journal of Applied Physics*. 111(11).
36. Rolland PA, Friscourt, Salmer G, Constant E. Theoretical study of 100 GHz GaAs transferred-electron devices. *Journal De Physique Colloque*. 1981 Oct 1;42(C7):C7-176.

Стаття надійшла до редакції: 30 жовтня 2023 р.

Рекомендовано до друку: 1 грудня 2023 р.

THE IMPACT OF DOPING ON THE EFFICIENCY OF GAAS –DIODE WITH ACTIVE GRADED GAINAS SIDE BORDER

V. O. Zozulia, O. V. Botsula, K. H. Prykhodko

V. N. Karazin Kharkiv National University, 61022, Kharkiv, Svobody square, 4

Background. The development of modern communication, security, and medical systems requires compact terahertz radiation sources that can operate under normal conditions. One of the most promising devices is solid-state electronics, namely, Gunn diodes. Gunn diodes are quite miniature devices capable of generating microwave current oscillations under normal conditions, but to generate in the sub-terahertz and terahertz range, they need to be modified to eliminate physical limitations that prevent generation in these ranges.

Purpose of Work. The aim of this work is to study the effect of the dopant concentration on the static and dynamic characteristics of a planar Gunn diode with a graded gap active side boundary.

Techniques and Methodology. To obtain the characteristics of the diode, the charge transfer processes in it are numerically modeled using the ensemble Monte Carlo method, taking into account all relevant scattering mechanisms and the process of shock ionization. The paper calculates the current density dependences at different values of the DC voltage across the diode, and determines the efficiency and AC power optimized by the operating voltage across the diode when the diode is in the generation mode. All calculations are carried out for different concentrations of the donor impurity in the diode channel and in the active side boundary at the resonator frequencies of 200 GHz and 250 GHz.

Results: The existence of optimal concentrations and the ratio between the concentrations in the diode channel and the side boundary are shown. The maximum value of efficiency corresponds to a concentration in the channel of about 10^{17} cm^{-3} and the concentration of the donor doping in the active side boundary of $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ at frequency 250 GHz are demonstrated.

Conclusions: Optimal doping concentration for Gunn diode of $1,28 \text{ }\mu\text{m}$ with a graded gap active side boundary is above 10^{17} cm^{-3} in diode channel, and at about $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ in ASB. It is possible to give optimal generation condition at maximal frequency of diode.

KEY WORDS: transferred electron effect, active side boundary, molar fraction, graded gap, impact ionization, scattering, numerical simulation, sub-terahertz range.

The article was received by the editors: October 30 2023.

The article is recommended for printing: December 1 2023