

УДК 621.382.2

ЧАСТОТНІ МОЖЛИВОСТІ ВАРИЗОННИХ СТРУКТУР З УДАРНОЮ ІОНІЗАЦІЄЮ НА ОСНОВІ GaInAs

О. В. Боцула, К. Г. Приходько, О. Р. Шевченко

*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
4, м. Свободи, Харків, 61077, Україна, Тел.(0572) 7051262*

E-mail: oleg.botsula@karazin.ua, kyrylo.prykhodko@karazin.ua

Поступила до редакції 21 листопада 2017 р.

Розглядаються кінетичні процеси в потрійній напівпровідниковій сполуці Ga_zIn_{1-z}As в умовах виникнення ініційованої електронами ударної іонізації. Аналіз роботи діодів проводився із використанням методу Монте-Карло з урахуванням залежності всіх параметрів напівпровідника від координати. Визначено параметри ударної іонізації в однорідних сполуках Ga_zIn_{1-z}As в залежності від вмісту Ga та неоднорідних структурах з різним законом його просторового розподілу та зроблено їх порівняльний аналіз. Показано, що проміжки часу затримки розвитку ударної іонізації відповідають частотам терагерцового діапазону, а ударну іонізацію у варизонних напівпровідниках можна використати для отримання генерації в цьому діапазоні.

КЛЮЧЕВІ СЛОВА: ударна іонізація, молярна частка, широкозонний напівпровідник, напруженість електричного поля, час затримки.

Рассматривались кинетические процессы в тройном полупроводниковом соединении Ga_zIn_{1-z}As в условиях возникновения инициированной электронами ударной ионизации. Анализ работы диодов проводился с использованием метода Монте-Карло с учетом зависимости всех параметров полупроводника от координаты. Определены параметры ударной ионизации в однородных соединениях Ga_zIn_{1-z}As в зависимости от содержания Ga и неоднородных структурах с различным законом его пространственного распределения и произведен их сравнительный анализ. Показано, что промежуток времени задержки развития ударной ионизации соответствуют частотам терагерцового диапазона, а ударную ионизацию в варизонных полупроводниках возможно использовать для получения генерации в этом диапазоне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ударная ионизация, молярная доля, широкозонный полупроводник, напряженность электрического поля, время задержки.

The kinetic processes in the triple semiconductor compound Ga_zIn_{1-z}As are considered in the conditions of electron initiated impact ionization. An analysis of the diode operating was carried out using the Monte Carlo method, taking into account the coordinate dependence of all semiconductor parameters. The impact ionization parameters of homogeneous Ga_zIn_{1-z}As compounds were determined depending on the Ga content and in heterogeneous structures with different laws of its spatial distribution. The comparative analysis of obtained parameter was carried out. The time delay intervals of the impact ionization development is shown to correspond to the terahertz frequencies range, and impact ionization in the graded band semiconductors can be used for generation obtaining in this range.

KEYWORD: impact ionization, molar fraction, wide band semiconductor, electric field strength, delay time.

ВСТУП

Основним способом підвищення швидкодії і відповідно збільшення частоти залишається зменшення розмірів елементів. Однак, прилади наноелектроніки, наприклад, резонансно тунельні діоди, хоч і є по своїй суті досить високочастотними елементами, не здатні забезпечити прийнятні рівні вихідної потужності в силу необхідності використання малих площ діодів для зниження їх ємності. У той же час серед всіх відомих твердотільних джерел терагерцового випромінювання найбільшими рівнями вихідною потужністю володіють прилади на лавинних ефектах і ефекті міждолинного перенесення електронів [1]. Тому, саме цим ефектам потрібно віддати перевагу при створенні ефективних джерел терагерцового випромінювання.

Потрібно відзначити, якщо довжина активної області складає близько сотні або декількох сотень нанометрів, то її можна порівняти з характерними довжинами релаксації носіїв по імпульсу і енергії, а час прольоту носіїв може стати близьким до проміжку часу, протягом якого в діоді стає можливим розвиток ударної іонізації. Цей проміжок для різних напівпровідникових матеріалів може відрізнятися на декілька порядків. Наприклад, в широкозонних матеріалах, на зразок нітриду галію, може становити величину порядку 10⁻¹⁴ с, що робить цей механізм привабливим для розробки активних елементів терагерцового діапазону [2].

Метою роботи є вивчення особливостей ударної іонізації в напівпровідниках АЗВ5 на прикладі сполуки GaInAs.

МОДЕЛЬ І РЕЗУЛЬТАТИ

Основою особливістю ударної іонізації в коротких структурах є її нелокальний характер як в часовій так і просторовій областях. Це, насамперед, пов'язано з кінцевим часом набору електроном енергії, необхідної для акта ударної іонізації. По-друге, в таких діодах її хід в більшій мірі залежить від енергії електрону, ніж від величини напруженості електричного поля [3]. В таких умовах можна впливати на її розвиток шляхом формування відповідного профілю потенціальної енергії, за рахунок використання різних напівпровідникових матеріалів. З цією метою розглядалися діоди на основі сполуки $Ga_zIn_{1-z}As$, як з однорідним, так і з неоднорідним розподілом складу $z(x)$. Була розглянута трьохдолинна модель зони провідності, з урахуванням нижньої - Γ і верхніх X і L -долин та непараболічний закон дисперсії електронів $E_c(k)$. Валентна зона враховувалася зоною важких дірок Γ_{v1} . Всі деталі моделювання відповідають [4-6].

В загальній модельній задачі передбачалося, що параметри напівпровідникової сполуки $Ga_zIn_{1-z}As$ змінюються у відповідності до закону $z(x)$, проте, при врахуванні розсіювання електрона залишаються незмінними в межах комірки просторової дискретизації і дорівнюють значенням в середині інтервалу, що розглядається. В таблиці 1 наведені функціональні залежності параметрів напівпровідника від вмісту Ga , які використовуються при моделюванні методом Монте-Карло.

Таблиця 1. Залежність параметрів сполуки $Ga_zIn_{1-z}As$ від молярної частки Ga [6].

Параметр	Величина параметру в $Ga_zIn_{1-z}As$	
Стала решітки, Å	6,058-0,416z	
Густина, кг/м ³	(5,680-0,32z)·1000	
Низькочастотна діелектрична стала	15,1-2,87z+0,67z ²	
Високочастотна діелектрична стала	12,3-1,4z	
Швидкість звуку, м/с	4280+960z	
Акустичний деформаційний потенціал, еВ	Γ	7z+5,8(z-1)
	L	9,2z+5,8(z-1)
	X	9,27z+5,8(z-1)
Ефективна маса, m_e / m^*	Γ	1/(0,023+0,037z+0,003 z ²)
	L $m_l (m_l)$	0,758-0,232z (3,571+9,692z)
	X $m_l (m_l)$	0,28+0,489z (8,333-3,985z)
Енергетичні мінімуми долин, еВ	Γ	0,356+0,581z+0,502z ²
	L	1,08-0,129z+0,818z ²
	X	1,37-0,684z+1,275z ²
Коефіцієнт непараболічності, еВ ⁻¹	Γ	(1-m _l [*]) ² /ε _Γ
	L	0,65z+0,54(z-1)
	X	0,36z+0,9(z-1)
Міждолинний деформаційний потенціал, еВ/м	Γ -L	0,65·10 ¹¹ z+10 ¹¹ (z-1)
	Γ -X, L-L	10 ¹¹
	L-X	0,5·10 ¹¹ z+9·10 ¹⁰ (z-1)
	X-X	0,7·10 ¹¹ z+9·10 ¹⁰ (z-1)
Енергія міждолинних фононів, еВ	0,06584+0,009915z	
Електронна спорідненість, еВ	4,9-0,83z	
Оптичний деформаційний потенціал, еВ/м	0,3z+(z-1)	
Енергія оптичних фононів, еВ	0,0343z+0,03128(z-1)	

Достовірність використаної моделі перевірялась шляхом обчислення залежності дрейфової швидкості v_d носіїв струму від напруженості однорідного електричного поля, що дозволяє провести пряме порівняння експериментальних і розрахованих методом Монте-Карло результатів та підібрати величини параметрів, які використовуються в чисельному моделюванні. На рис.1 показано залежності дрейфової швидкості носіїв заряду від напруженості електричного поля в сполуці $Ga_zIn_{1-z}As$ з різними молярними часток Ga , які були розраховані методом Монте-Карло за даними таблиці 1.

Видно, що з внесенням Ga відбувається зниження величини максимальної дрейфової швидкості носіїв заряду і величини негативної диференціальної рухливості, а також збільшення порогових напруженостей, відповідних максимуму дрейфової швидкості. Отримані результати співпадають з відомими даними, наприклад [7].

В коротких діодах найбільш важливими факторами є час розвитку ударної іонізації τ та величина області l_i в якій електрон набирає енергію, необхідну для ударної іонізації, так званої "мертвої зони".

Для визначення впливу безпосередньо складу напівпровідника на розвиток ударної іонізації було розглянуто різні однорідні структури.

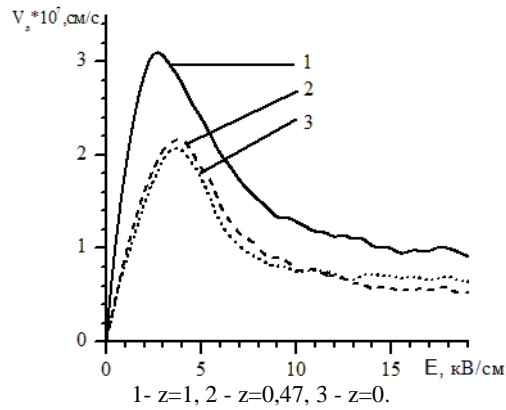


Рис. 1. Залежність дрейфової швидкості від електричного поля в сполуці $Ga_zIn_{1-z}As$

На рис. 2 показано залежність порогової напруженості її виникнення в залежності від молярного вмісту Ga. Результати отримано за умови, що первинними носіями є електрони. Виправданням цієї ситуації є більш високі значення порогової енергії виникнення ударної іонізації для дірок. Більш того, для розглянутих величин напруженості поля та параметрів діода іонізація за рахунок дірок не відбувається взагалі, оскільки час прольоту дірки через діод менше часу, необхідного для розвитку ударної іонізації. Тому отримані значення відображають саме її початок, а не явище пробую, при якому відбувається лавинне розмноження носіїв заряду.

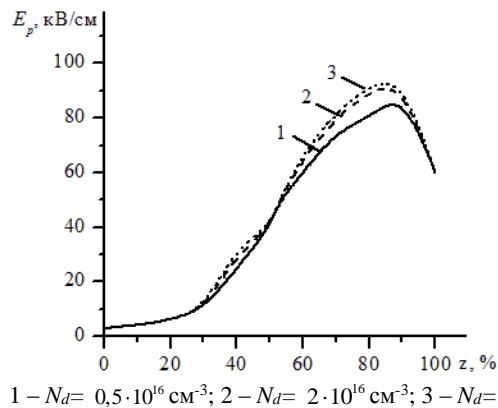


Рис. 2. Залежність порогової напруженості електричного поля від вмісту у сполуці $Ga_xIn_{1-x}As$ при різних рівнях легування.

Видно, що в цілому підвищення вмісту галію призводить до підвищення напруженості електричного поля, що насамперед пов'язане зі збільшенням ширини забороненої зони і відповідно до збільшення порогової енергії. Але в області значень z близьких до 1 відбувається зниження величини порогового поля. Таке явище можна пояснити впливом розсіювання електронів на сплавному потенціалі. Швидкість набору енергії в GaAs вище, ніж в сполуці $Ga_xIn_{1-x}As$ при $z < 1$. Впливом того ж фактора можна пояснити менший нахил залежності в області значень z близьких до нуля. Аналогічний вплив на швидкість набору енергії має розсіювання на іонізованих домішках. В області значень z близьких до 1 порогове значення напруженості змінюється найбільше.

Умови, при яких іонізація за рахунок дірок не відбувається, реалізуються при певному наборі факторів. Найважливішими з них є створення ситуації, коли дірки, що виникають в результаті ударної іонізації, виходять через зовнішні контакти раніше, ніж наберуть енергію достатню для проведення ударної іонізації. Найпростіше така ситуація реалізується в коротких діодах за умови, що закони руху електронів і дірок суттєво відрізняються. Одним із найбільш простих способів створення таких умов є використання напівпровідників зі змінним складом. Внаслідок відмінності в електронній спорідненості між двома напівпровідниками та різної ширини забороненої зони при формуванні варизонного шару між такими напівпровідниками величини квазіелектричних полів для електронів дірок можуть суттєво відрізнитися, що і має місце у випадку сполуки $Ga_zIn_{1-z}As$.

Модельна область мала розмір 1280 нм, що давало змогу оцінити параметри ударної іонізації в $Ga_zIn_{1-z}As$ при зміні вмісту галію від 0 до 1 та в широких межах змінювати величину електричного поля. Розглядалися випадки, коли вміст Ga в сполуці $Ga_zIn_{1-z}As$ змінювався за лінійним та нормальним законами по всій довжині діода, а також ситуація, коли катодна частина діода являє собою однорідний за складом матеріал. Результати розрахунків для однорідних за складом напівпровідників показані на рис. 3.

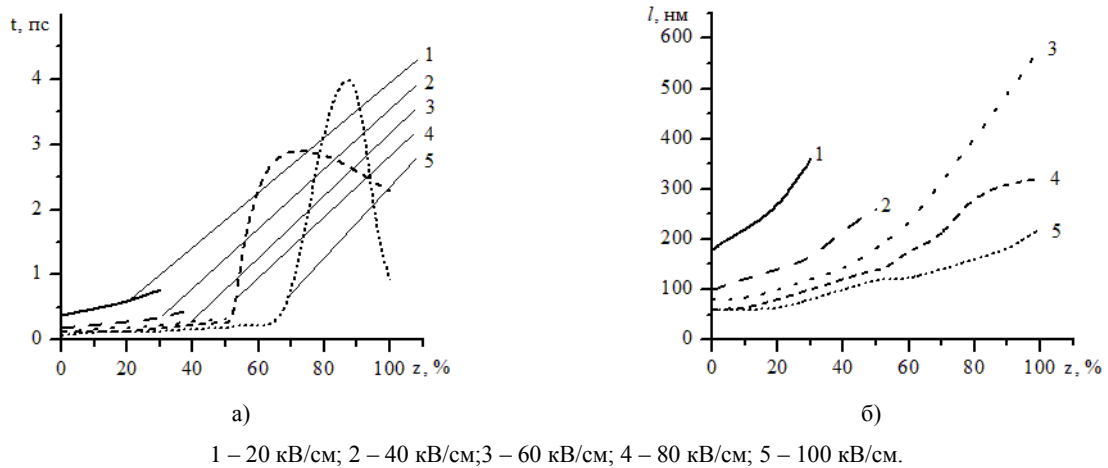


Рис. 3. Час затримки до початку ударної іонізації а) та довжина пробігу електронів до початку ударної іонізації б) для однорідного за складом напівпровідника на основі $Ga_{z}In_{1-z}As$ від молярної частки Ga.

Очікуваним результатом стало зменшення величини l_i та τ при переході від GaAs до InAs. Характерним є тенденція до насичення параметрів l_i та τ при збільшенні величини електричного поля, що пов'язано із втратами енергії електронами внаслідок підвищення інтенсивності розсіювання на фононах.

Більш складна картина спостерігається для напівпровідників з лінійними розподілами складу. Різниця в залежностях параметрів ударної іонізації найбільш виражена при помірних значеннях напруженості поля (до 100 кВ/см). При збільшенні градієнту складу спостерігається більш різка зміна l_i та τ . Так при зміні величини градієнту складу від $4,7 \cdot 10^{-4}$ до $7,8 \cdot 10^{-4}$ см⁻¹ проміжок часу розвитку ударної іонізації зменшується відповідно від $4 \cdot 10^{-12}$ до 10^{-12} с.

При великих напруженостях поля параметри ударної іонізації мають тенденцію до насичення та близькі за величиною до параметрів для GaAs. Це пояснюється тим, що електрони набирають енергію в катодній області, властивості якої близькі до GaAs,

Серед розподілів складу, що розглядалися, були також такі, що містять в собі як однорідні області, що відповідають GaAs, так і області з лінійною зміною складу. Було розглянуто два варіанти з різною протяжністю GaAs-областей, 200 та 400 нм, та три варіанти величини градієнту складу. В таких розподілах довжина “мертвого” простору практично однакова при напруженостях більших 140 кВ/см, а час затримки до початку ударної іонізації співпадає при напруженостях більших 160 кВ/см. В області слабкого поля (напруженості менші 90 кВ/см) довжини “мертвого” простору визначаються протяжністю однорідної GaAs-області і близькі до 300 та 400 нм для розмірів GaAs-областей 200 та 400 нм відповідно. В області помірних значень полів (90 - 140 кВ/см) найменша величина l_i відповідає області однорідного складу 200 нм та найбільшому градієнту складу, а найменший час затримки відповідає профілю з однорідним шаром 400 нм та максимальним градієнтом складу. Найбільший час затримки відповідає профілю з однорідним шаром 200 нм та мінімальним градієнтом складу. Величина затримки змінюється в межах від $1,7 \cdot 10^{-12}$ с до $2,5 \cdot 10^{-12}$ с.

Таким чином, можна констатувати, що вирішальний вплив на довжину пробігу електронів до початку ударної іонізації має протяжність та склад області початкового розігріву електронів. На величину часу затримки до початку ударної іонізації впливають декілька факторів, серед яких очевидним є вплив величини градієнту складу напівпровідника у варизонному шарі – збільшення градієнту складу напівпровідника призводить до скорочення величини τ .

На останок було розглянуто ситуацію, коли вміст Ga змінювався з координатою за нормальним законом та містив GaAs-область на катоді (рис. 4 а)) Такий розподіл поблизу катоду близький до розглянутого вище, а в анодній частині має властивості близькі до InAs. Відповідні результати розрахунків приведені на рис. 4 б), в).

Результати моделювання показали, що використовуючи нормальний закон розподілу складу напівпровідника можна: 1) суттєво розширити діапазон зміни параметрів ударної іонізації, зокрема часу затримки до початку ударної іонізації, який змінюється від найменших до найбільших значень майже на порядок і складає в області помірних полів величину від $5 \cdot 10^{-13}$ до більш ніж $4 \cdot 10^{-12}$ с; 2) змістити величини полів, за яких можлива ударна іонізація в бік менших значень, практично до декількох десятків кВ/см.

Результати розрахунків свідчать, що, як в попередньому випадку, найменші величини, як l_i та τ відповідають максимальній різниці складу на кінцях розрахункової області. Поєднання однорідної області на основі GaAs та варизонного шару дає змогу впливати на параметри ударної іонізації при напруженостях поля

до 140 кВ/см. При напруженостях поля вищих 140 кВ/см час розвитку ударної іонізації для всіх розглянутих випадків не перевищує $5 \cdot 10^{-13}$ с.

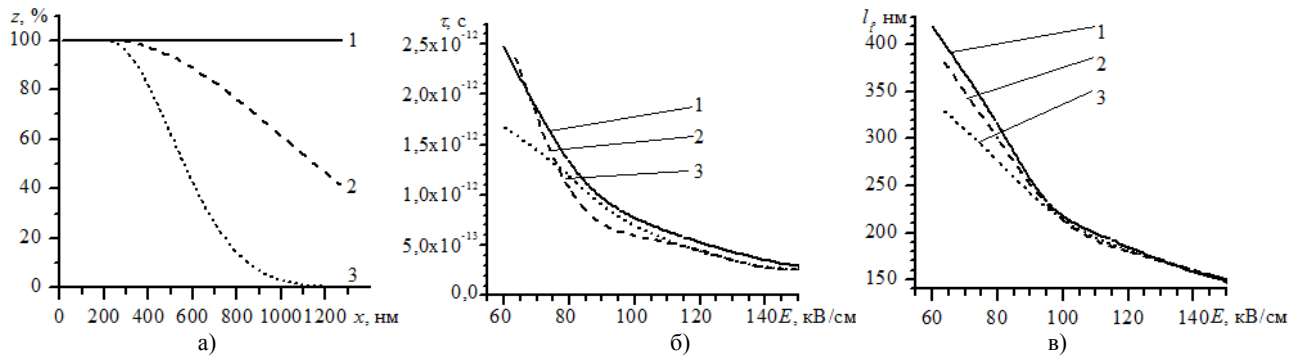


Рис. 4 Розподіли молярної частки Ga (а), час затримки до початку ударної іонізації (б) та довжина пробігу електронів до початку ударної іонізації (в). 1, 2, 3 відповідно до розподілу а).

ВИСНОВКИ

У випадку, коли час затримки ударної іонізації складає величину, що дорівнює приблизно половині періоду коливань $\tau = T / 2$, можна сподіватися на отримання негативної динамічної диференціальної провідності та генерації на частотах, для яких ця умова виконується. Аналізуючи розглянуті випадки, можна стверджувати, що час затримки ударної іонізації можна змінювати в межах від $5 \cdot 10^{-13}$ с до $4 \cdot 10^{-12}$ с, що відповідає частотам від 250 ГГц до 1 ТГц. На практиці затримка може бути більшою за рахунок кінцевого часу зростання напруги до рівня, що необхідний для виникнення ударної іонізації. При цьому треба врахувати важливий фактор - необхідність забезпечити швидку релаксацію системи до первинного стану (до початку ударної іонізації) за короткий проміжок часу, що насамперед передбачає використання коротких структур.

Використовуючи складний закон розподілу складу напівпровідника, можна суттєво розширити діапазон зміни параметрів ударної іонізації та використати часову затримку її появи в коротких варизонних структурах для отримання генерації в терагерцовому діапазоні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. B. Bhushan (ed.), Encyclopedia of Nanotechnology, Springer. – Springer Dordrecht Heidelberg New York London Library of Congress Control Number: 2012940716. – 2012. – P. 253- 267.
2. Acharyya A and Banerjee JP Potentiality of Impact Devices as THz Source // IETE Journal of research. – 2013. – Vol. 59. – ISSUE 2. p.118 – 127.
3. M. Levinshtein, J. Kostamovaara, S. Vainshtein Breakdown phenomena in semiconductoes and semiconductors devises Selected topics of electronic and system. – Vol. 36. – World ScientificPublishing. – Singapore. – 2005. – 208 P.
4. E.D. Prokhorov, O.V. Botsula, A.V. Dyadchenko, I.A. Gorbunov. "Monte Carlo simulation of diode with cathode static domain," Proceedings 23rd Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2013), Sevastopol, Crimea, Ukraine, pp. 139-140, 2013.
5. O. V. Botsula, K. H. Pryhodko, V. A. Zozulia. "Impact ionization in short Al_zGa_{1-z}N-based diodes// Telecommunications and Radio Engineering. –2017. – Vol. 76. – No. 1. – pp. 61-71.
6. K. H. Prykhodko, V. O. Zozulia, O. V. Botsula. Graded Band Gap InGaAs Diodes for Terahertz Applications // YSF-2017. – 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, Conference Proceedings. – pp. 291-294.
7. V. Balynas, A. Krotkus, A. Stalnionis, A.T. Gorelionok, N.M. Schmidt, and J.A. Tellefsen. Timeresolved, hot-electron conductivity measurement using an electro-optic sampling technique// Applied Physics A. –1990. –51(4). – pp. 357–360.