УДК 621.382.2

СТАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДІВ З ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ GaAs-AlGaAs ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ НВЧ – ШУМУ

О. В. Боцула

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
4, пл. Свободи, Харків,61077, Україна, Тел.(0572) 7051262
E- mail: oleg.botsula@mail.ru
Надійшла в редакцію 20 березня 2014 г.

Розглядаються діоди, в яких за певних умов утворюється катодний статичний домен. В таких діодах виникає ударна іонізація, лавинно-прольотний ефект і шумова генерація в широкому діапазоні частот.

Аналіз роботи діода проводився з використанням методу Монте-Карло. Враховано можливість виникнення ударної іонізації та наявність носіїв обох знаків Отримані розподіли концентрації носіїв та електричного поля в діодах. Показано, що введення гетеропереходу в більшій мірі впливає на положення максимуму напруженості електричного поля, ніж на його величину. Вольтамперні характеристкики діодів, що розглядалися, демонструють однакову якісну поведінку: сублінійне зростання струму з тенденцією до насичення до певних напруг та суперлінійне зростання струму, що пов'язане з ударною іонізацією в домені сильного поля.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ударна іонізація, статичний катодний домен, вольтамперні характеристики, гетероперехід, пробивні напруги.

Рассматривается диод, в котором при определенных условиях образуется катодный статический домен. В таких диодах возникает ударная ионизация, лавинно-пролетный еффект и шумовая генерация в широком диапазоне частот.

Анализ работы диода проводился с использованием метода Монте -Карло. Учитывалась возможность возникновения ударной ионизации и наличие носителей обоих знаков. Получены разпределения концентраций носителей та электрического поля в диодах. Показано, що введение гетероперехода в большей степени влияет на положение максимума напряженности электрического поля, чем на его величину. Вольтамперные характеристики рассмотренных диодов демонстрируют одинакое качественное поведение: сублинейный рост тока с тенденцией к насыщению до определенных напряжений и суперлинейный рост тока, связанный с ударной ионизацией в домене сильного поля.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ударная ионизация, статический катодный домен, вольтамперные характеристики, гетеропереход, пробивные напряжения.

Diode where in a cathode the static domain has been formed under certain conditions is considered. An impact ionization, avalanche transit effects and noise generation are arisen in the such diodes in wide frequency range.

The analysis of the diode operation was performed using Monte Carlo technique. The possibility of impact ionization and present of as electron as hole are take into consideration. An insertion of heterojunction influence on maximal electric field position more then its magnitude have been shown. A current – voltage characteristics of considered diodes show the same features. They contain region of sublinear current increasing to be have tendency toward saturation up to certain voltage and superliner growth of current associated with the impact ionization in the domain of a strong field.

KEYWORD: impact ionization, static cathode domain, current voltage characteristics, heterojunction, breakdown voltage.

ВСТУП

Діоди з катодним статичним доменом є джерелом шумової генерації з спектральною щільністю потужності шуму до 10^5 кT_0 [1-3,4,5]. Діоди, що розглядалися раніше, мали структуру $n^+ - n^- - n - n^+$. У шумовому діоді з катодним статичним доменом область сильного поля формується на межі розділу $n^- - n$ переходу. Причому, як показали проведені раніше дослідження, для діодів на основі GaAs всі параметри статичного домену визначаються саме переходом і слабо залежать від довжини n - області [2].

У прикатодній області характеристики матеріалу GaAs можуть бути відмінні від об'ємних характеристик GaAs. Дійсно, в експериментальних діодах слаболегована частина діода була напівізолюючим арсенідом галію [1,3,5]. Такий матеріал має низьку рухливість носіїв заряду та відмінну від об'єму залежність дрейфової швидкості електронів і дірок від напруженості електричного поля.

© Боцула О.В., 2014

В модифікації діода, що розглядається, пропонується використання шарів різних матеріалів для створення в $n^- - n$ - переході додаткової неоднорідності у вигляді гетеропереходу.

Розглянуто два можливі варіанти діода з використанням гетеропереходу GaAs –AlGaAs. У першому варіанті в якості n^-- шара на катодному контакті використовується вузькозонний матеріал(GaAs), а n - область є широкозонним матеріалом(AlGaAs). В цьому випадку зі сторони AlGaAs виникає додатковий бар'єр для електронів, що сприяє накопиченню електронів в області n^--шара і зменшенню ймовірності ударної іонізації в n - області.

У другому випадку в якості n^-- шара на катодному контакті використовується широкозонний матеріал(AlGaAs), а n - область є вузькозонним матеріалом(GaAs). Рухливість в AlGaAs нижче, ніж в GaAs, що також повинно сприяти накопичення електронів в n^--шарі, але на відміну від попереднього випадку ця властивість повинна зберігатися і в сильних електричних полях, коли кінетична енергія електрона стане більша ніж висота потенціального бар'єру в $n^- - n$ - переході.

МОДЕЛЬ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

Діоди, що розглядалися, мали структуру $n^+ - n^- - n - n^+$, де n^+ – сильнолеговані області катода і анода з концентрацією домішки $5\cdot10^{16}…10^{17}$ см^3, n – область, що легована слабше, з концентрацією до 10^{16} см^3, має довжину L_2, n^- – область біля катода з довжиною та рівнем легування на порядок меншим, ніж в n- області. Контакти до катодної і анодної n^+ - області вважаються омічними. Довжини, на яких відбувається зміна концентрації в $n^+ - n^-$, $n^- - n$ и $n - n^+$ переходах, складали 0,5 мкм.

Розрахункова область являла собою прямокутник. Для проведення моделювання роботи діода використовувався багаточастковий метод Монте Карло. Всі аспекти моделювання електронів, що були використані при моделюванні методом Монте – Карло, аналогічні [6]. Крім цього, для правильного опису напівпровідника в передпробійному стані була врахована наявність носіїв заряду обох знаків (електронів і дірок). Оскільки мінімальна енергія іонізації зона – зона визначається ефективною масою важких дірок, то розглядалася саме підзона важких дірок. Дисперсійне співвідношення для важких дірок було взяте у вигляді анізотропного закону дисперсії, що являє собою гофровані ізоенергетичні поверхні [7]:

$$E_{\vec{k}} = E_{V0} - \frac{\hbar^2}{2m_0}(\gamma_1(k_\perp^2 + k_\parallel^2) \pm \sqrt{4\gamma_2^2 k^4 + 12(\gamma_3^2 - \gamma_2^2)(k_\perp^2 k_\parallel^2 + k_y^2 k_z^2)}), \quad (1)$$

де γ_1 , γ_2 и γ_3 - зонні параметри Латтінжера. Використання їх у виразі для закону дисперсії дає можливість застосувати лінійну апроксимацію при визначенні величин γ_1 , γ_2 и γ_3 в сполуці $Al_xGa_{1-x}As$ при різних значеннях молярної частки алюмінію x [8]. При розрахунках процесів розсіяння за участю дірок використовується закон дисперсії у вигляді

$$E_{\vec{k}} = E_{V0} - \frac{\hbar^2(k_\perp^2 + k_\parallel^2)|A|}{2m_0}(1 \pm g(\theta,\varphi)), \quad (2)$$

де

$$g(\theta,\varphi) = \sqrt{b^2 + c^2(\sin^2\theta\cos^2\theta + \sin^4\theta\cos^2\varphi\sin^2\varphi)}, \quad (3)$$

$$b = \frac{|B|}{|A|},\ c = \frac{|C|}{|A|},\ A = \gamma_1;\ \ B = 2\gamma_2,\ C = \sqrt{12(\gamma_3^2 - \gamma_2^2)}. \quad (4)$$

Існує великий розкид параметрів γ_1, γ_2 і γ_3. Для GaAs: γ_1 = 6,79 – 7,2; γ_2 = 1,9 – 2,88; γ_3 = 2,681 – 3,05. Для AlAs: γ_1 = 3,42 – 4,04; γ_2 = 0,67 – 1,23; γ_3 = 1,17 –1,57 [9]. Найбільш вживані параметри для GaAs: γ_1 = 6,98; γ_2 = 2,06; γ_3 = 2,93, для AlAs: γ_1 = 3,76; γ_2 = 0,82; γ_3 = 1,42. Використання цих параметрів призводить до значення ефективної маси щільності станів для важких дірок $0{,}61\,m_0$ для GaAs та $0{,}786\,m_0$ для AlAs.

Ми описуємо ударну іонізацію, використовуючи ймовірність ударної іонізації у вигляді [10]:

$$W_{ii}(E) = 1{,}19\cdot10^{13}\left(\frac{E - E_p}{E_p}\right)^a \sigma(E - E_p), \quad (5)$$

де E - енергія електрона в еВ, E_p порогова енергія ударної іонізації. В залежності від молярної частки алюмінію x порогова енергія визначається за формулою [10]:

$$E_p = \frac{1}{8}(E_\Gamma + 3E_L + 4E_X)\,, \qquad (6)$$

де E_Γ, E_L, E_X - енергія відповідних долин зони провідності, що відраховані від стелі валентної зони.

Розглянуто діод, що має загальну довжину 20 мкм. У разі використання діода із структурою GaAs- AlGaAs область в інтервалі від 0 до 6,25 мкм являє собою GaAs, а область в інтервалі от 6,25 до 20 мкм. – AlGaAs з молярною долею Al (x=0…0,4).

Наявність гетеропереходу призводить до локалізації максимуму поля безпосередньо на переході, тоді як в діоді з $n^- - n$ переходом без гетеропереходу максимум електричного поля не співпадає з положенням металургійного переходу. Таким чином, видно, що в цілому введення гетеропереходу в більшій мірі впливає на положення максимуму напруженості електричного поля, ніж на величину самого поля.

Аналогічна ситуація спостерігається і для інших напруг, що прикладаються до діода.

Розподіли електричного поля та концентрації для усіх трьох варіантів діода, $Al_xGa_{1-x}As$-GaAs, GaAs-$Al_xGa_{1-x}As$ та GaAs діода без гетеропереходу при напрузі живлення 60 В показані на рис. 1, 2.

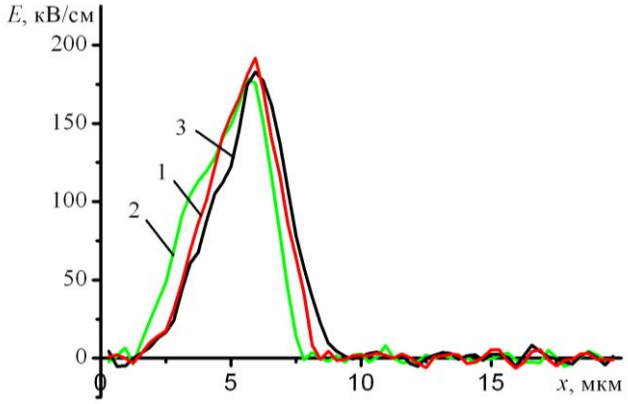

Рис. 1. Розподіл напруженості електричного поля в трьох діодах, $U = 40$ В. 1- GaAs- діод; 2- GaAs - $Al_xGa_{1-x}As$; 3 –діод $Al_xGa_{1-x}As$ - GaAs.

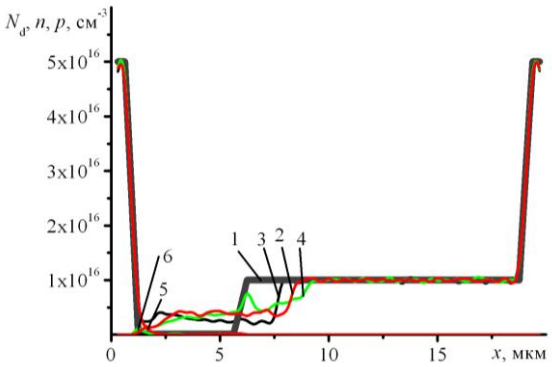

Рис. 2. Розподіл домішок та концентрацій носіїв заряду в діодах , $U = 60$ В. 1- $N_d(x)$; 2 - $n(x)$, GaAs-діод; 3- $n(x)$, GaAs - $Al_xGa_{1-x}As$- діод; 4- $n(x)$, $Al_xGa_{1-x}As$- GaAs - діод; 5 - $p(x)$, GaAs - діод; 6 - $p(x)$, $Al_xGa_{1-x}As$ - GaAs – диод.

З отриманих розподілів видно, що найвища напруженість електричного поля спостерігається в GaAs – діоді. Причому для GaAs – діода та діода, що має структуру GaAs - $Al_xGa_{1-x}As$, всі розподіли якісно близькі. Більш вузький домен сильного поля характерний для GaAs - $Al_xGa_{1-x}As$ діода.

Для діода, що має структуру $Al_xGa_{1-x}As$ – GaAs , розподіл концентрації практично лінійний, за винятком безпосередньо $n^- - n$ переходу, що призводить до зміщення катодного домену в сторону $n^+ - n^-$ - контакту. Також можна відмітити більш круті стінки домену та відсутність віртуального катоду на $n^+ - n^-$ - контакті.

Для вибраної напруги $U = 60$ В характерним є наявність прояву ударної іонізація, що спостерігається в $Al_xGa_{1-x}As$ – GaAs та GaAs – діодах, та поява дірок. Концентрація дірок не

перевищує $2 \cdot 10^{15}$ $см^{-3}$ і ще суттєво не впливає на процеси в діоді. Такий стан можна назвати передпробійним і він являє інтерес з точки зору генерації шуму.

Вольтамперні характеристики (ВАХ) діодів, що розглядалися, показані на рис. 3.

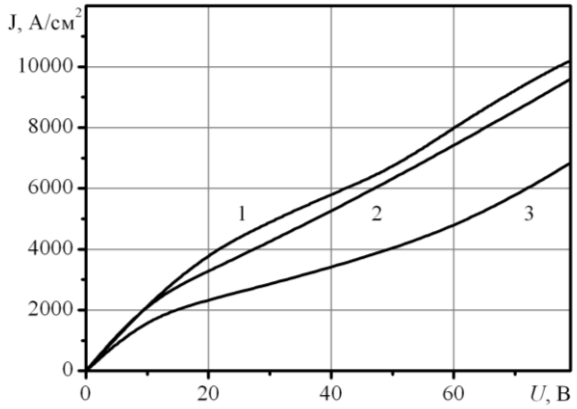

Рис. 3. Вольтамперні характеристики діода с катодним статичним доменом. 1- GaAs- діод;

2- GaAs - $Al_xGa_{1-x}As$; 3 –діод $Al_xGa_{1-x}As$ - GaAs.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз діодів з гетеропереходами AlGaAs – GaAs та GaAs – AlGaAs та порівняння з діодами на GaAs показало, що введення гетеропереходу в більшій мірі впливає на положення максимуму напруженості електричного поля ніж на величину поля.

Всі отримані ВАХ діодів, що розглядалися, демонструють однакову якісну поведінку : сублінійне зростання струму з тенденцією до насичення до певних напруг та суперлінійне зростання струму, що пов’язане з ударною іонізацією в домені сильного поля.

Причому ВАХ GaAs - $Al_xGa_{1-x}As$ – діодів та GaAs – діодів близькі, а ВАХ $Al_xGa_{1-x}A$ - GaAs діодів відрізняється меншою величною струму. Це свідчить про визначальну роль домену сильного поля в формуванні характеристик.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Прохоров Э.Д., Скоробогатова С.Н., Золотарев Е.С., Генерация СВЧ шума диодом с катодным статическим доменом//Радиотехника и электроника. – 1976. – Вып.21. – № 8. – С. 1732-1739.
2. Прохоров Э.Д., Боцула О.В., Соколов С.Б. Влияние параметров прикатодной области диода с катодным статическим доменом на порог генерации СВЧ шума// Радиофизика и электроника. – 2010. – Вып. 15. – № 1. – С. 91-95.
3. Золотарев Е.С., Прохоров Э.Д., Модели диодов с катодным статическим доменом//Радиотехника и электроника. – 1990. – Вып. 35. – № 10. – С. 2221- 2223.
4. Прохоров Э.Д., Скоробогатова С.Н., Шумовой спектр диода с катодным статическим доменом// Радиотехника и электроник. – 1985. – Вып. 31. – № 7. – С.1447- 1449.
5. А. с. № 1591775 Диод для генерации СВЧ шума / Прохоров Э. Д., Золотарев Е. С. (СССР). – от. 26. 07. 1989.
6. Прохоров Э. Д., Боцула О. В., Горбунов И. А. Моделирование диода с катодным статическим доменом методом Монте-Карло // Вестник ХНУ, Радиофизика и электроника. – 2013. – № 10. – Вып. 22-23. – С. 112-115.
7. Cook R. K., Frey J., Diffusion effects “Ballistic Transport”// IEEE Trans. Electron Devices. – 1981. – ED-28(8). – P. 951-953.
8. Vurgaftman I. , Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys // Jornal of applied physics. – 2001. – Vol. 89. – No 11. – P. 5815 – 5875.
9. Jacoboni C., Reggiani L. The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials // Rev. Modern Physics. – 1983. – V. 55. – N. 3. – 1983. – P. 675 -705.
10. Canali C., Pavan P. Lugli P., Malik R., Manfredi M., Neviani A., Vendrame L., Zanoni E., Zandler G. Experimental and Monte Carlo Analysis of Impact-Ionization in AlGaAs/GaAs HBT’s // IEEE Transaction on electron devices. – 1996. – Vol. 43. – No 11. P. 1769 – 1777.