

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-40-06>

УДК 621.382.2

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>

В. О. ЗОЗУЛЯ, Ph.D., н.с.

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

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

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМОВИХ ДІОДІВ З ГЕТЕРОКАТОДОМ

Актуальність. Створення компактних джерел шуму в широкому діапазоні частот, що здатні підтримувати незмінні в часі та від зовнішніх умов характеристики і формувати еталонні сигнали для вимірювання шумових характеристик підсилювачів та приймачів, є актуальною задачею в галузі телекомунікації та безпеки. Зразком приладів, які здатні задовольнити вимоги до джерел шуму, є діоди з катодним статичним доменом (ДКСД). Важливим фактором, який впливає на характеристики напівпровідникових приладів, є температура та ефект саморозігрівання.

Метою роботи є дослідження впливу температури та саморозігрівання на характеристики ДКСД на основі нітридних сполук, що містять варізонний шар на катоді.

Методи і методологія. Для отримання характеристик діода проводиться числове моделювання процесів переносу заряду в двовимірних напівпровідникових структурах з використанням багаточастинкового методу Монте-Карло. Враховуються всі суттєві механізми розсіяння носіїв заряду. У роботі обчислюються залежності густини струму, що протікає в діоді від величини постійної напруги на ньому, в умовах різної температури, в тому числі з урахуванням генерації тепла в ньому при протіканні електричного струму.

Результати. Отримано залежності густини струму від прикладеної напруги живлення для різних конструкцій ДКСД з варізонним AlGaIn - катодом за умов сталої температури різної величини та з урахуванням ефектів саморозігрівання. Показано, що підвищення температури призводить до зменшення густини струму, що протікає через діод, а ефекти саморозігрівання можуть суттєво обмежити діапазон робочих напруг діода.

Висновки. Продемонстровано вплив температури на роботу діодів на основі AlGaIn з варізонним гетерокатодом. Підвищення температури призводить до обмеження робочих напруг діода і в умовах виникнення ударної іонізації може привести до руйнування діода.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: катодний статичний домен, ефект міждолинного перенесення електронів, молярна частка, варізонний шар, ударна іонізація, розсіяння, числове моделювання.

Як цитувати: Боцула ОВ, Приходько КГ, Зозуля ВО. Вплив температури на характеристики шумових діодів з гетерокатодом. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2024; 40:68-73. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-40-06>

In cites: Botsula OV, Prykhodko KH, Zozulia VO. The impact of temperature on heterocathode noise diodes characteristics. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 024;40:68-73. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-40-06>

ВСТУП

На сьогоднішній день значення терагерцевої електроніки стає все більш очевидним. Терагерцові частоти застосовуються в радіометричних системах, системах, пов'язаних з біологічними дослідженнями, для моніторингу стану об'єктів [1], для отримання тривимірних (3D) ТГц зображень, в ТГц томографії [2-4] та ін. Незважаючи на те, що основними діапазонами частот, що використовуються, все ще є діапазони НВЧ і КВЧ [5,6], очевидною перевагою застосування ТГц є широка доступна смуга пропускання.

Джерела височастотного шуму використовуються як елементи еталонного сигналу при вимірюванні шуму в деяких комплексних приймачах, таких як радари, базові станції, радіометри тощо. Через спектральне положення ТГц діапазону існує проблема розробки ТГц компактних твердотільних джерел, оскільки необхідною вимогою є отримання великої вихідної потужності і можливість

калібрування та налаштування в широкому діапазоні частот. Другою вимогою є незмінність і відтворюваність характеристик шуму в часі і при різних зовнішніх умовах.

Можливими кандидатами для використання на терагерцових частотах можуть бути твердотільні джерела шуму [7-9]. Одним з них є діод з катодним статичним доменом, який запропоновано в [10] як джерело шуму на частотах міліметрового діапазону. Було встановлено, що розмір катодного статичного домена сильно впливає на спектральні властивості діода та виявлено сильну залежність спектральної густини потужності шуму (СГПШ) від прикладеної напруги зміщення. Це явище можна використовувати для кількох корисних застосувань. Одним із них може бути створення активних електронних навантажень (АЕН) для радіометричного калібрування [11].

Особливістю діодів є їх робота в режимі близькому до початку ударної іонізації, що передбачає суттєво великі напруженості електричного поля. Відповідно, виникає питання щодо можливості отримання таких режимів і стабільності роботи діодів в них.

Перспективним варіантом ДКСД є діод з варізонним гетерошаром на катоді, в якому можна досить легко створити умови для виникнення шумової генерації і який досить легко масштабується для роботи в різних частотних діапазонах [12]. Тому метою роботи стало дослідження впливу температури як одного із важливих факторів, що може впливати на роботу діодів.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Розглянуто діодні $n^+ - n^- - n - n^+$ -структури довжиною 1 мкм. В області катодного n^+ -шару і $n^- - n$ -області сформовано варізонний шар $\text{Al}_z\text{Ga}_{(1-z)}\text{N}$, в якому склад напівпровідника змінюється від GaN на катоді до $\text{Al}_z\text{Ga}_{(1-z)}\text{N}$ з різною молярною часткою z , в n^- -області ($z=0.45$, $z=0.12$). Моделювання діода відбувалося за допомогою багаточастинкового методу Монте-Карло. При моделюванні кінетичних процесів в діодах було враховано найважливіші механізми розсіяння носіїв заряду, такі як: розсіяння на деформаційному потенціалі неполярних оптичних та акустичних фононів, полярне оптичне, міждолинне розсіяння, розсіяння на сплаві і домішці та ударна іонізація.

Для опису процесів розігріву в обраних діодах було використано фононну модель [13]. У рамках цієї моделі основним джерелом зміни теплової енергії є оптичні та акустичні фонони, що генеруються або поглинаються у даному одиничному об'ємі матеріалу. Загальна зміна тепла в цьому об'ємі визначається виразом:

$$H = \frac{n}{N_{sim} \Delta t} \sum (\hbar \omega_{ems} - \hbar \omega_{abs}), \quad (1)$$

де: n – концентрація електронів, N_{sim} – кількість мікрочастинок, що моделюються, Δt – часовий крок моделювання, $\hbar \omega_{ems}$ – енергія випромінювання та $\hbar \omega_{abs}$ – енергія поглинання фонона.

Здатність проводити тепло обумовлена середньою довжиною вільного пробігу фонона l_f , яку можна оцінити, використовуючи термічні параметри матеріалу у вигляді:

$$K = \frac{1}{3} C_v v_f l_f, \quad (2)$$

де: K – коефіцієнт теплопровідності, C_v – об'ємна теплоємність, v_f – швидкість фононів.

За нормальних умов середня довжина вільного пробігу фонона для GaN та AlN становить порядку ~ 200- 300 нм [14,15]. Зі збільшенням температури середня довжина вільного пробігу зменшується, що обумовлено збільшенням кількості фононів та частоти їх зіткнень і, відповідно, зниженням переносу енергії.

Такі значення l_f дозволяють знехтувати розмірними ефектами, які пов'язані з розігрівом, у приладах довжиною більшою 100 нм, а термічні властивості розраховувати шляхом розв'язання диференційного рівняння теплопровідності:

$$\nabla \cdot [K \nabla T(r, t)] + H(r, t) = \rho c \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \quad (3)$$

де: $H(r, t)$ - функція теплових джерел.

У роботі використовується залежність коефіцієнту теплопровідності від температури, яка описується виразом [16,17]:

$$K(T) = K_{300K} \cdot \left(\frac{T}{300K} \right)^{\alpha}. \quad (4)$$

У зв'язку з наявністю шару змінного складу у розглянутих діодах, виникає необхідність визначення коефіцієнту теплопровідності, який залежить від складу z напівпровідника та температури. Залежності параметрів $K_{\text{AlGaIn}}(z)$ і $c_{\text{AlGaIn}}(z)$ визначаються правилом Вегарта та введенням відповідних параметрів нелінійності [16,17]:

$$c_{\text{AlGaIn}}(z) = z \cdot c_{\text{AlN}} + (1 - z) c_{\text{GaN}}, \quad (5)$$

та

$$K_{AlGaN}(z) = \left(\frac{z}{K_{AlN}} + \frac{(1-z)}{k_{GaN}} + \frac{z \cdot (1-z)}{C_{K,AlGaN}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$\alpha_{AlGaN}(z) = z \cdot \alpha_{AlN} + (1-z) \cdot \alpha_{GaN}, \quad (7)$$

де $C_{K,AlGaN}$ - параметр нелінійності.

При моделюванні температурних залежностей використовувались дані, які наведені в Табл. 1 [16,17].

Таблиця 1. Температурні параметри $Al_zGa_{1-z}N$

Table 1. Temperature parameters $Al_zGa_{1-z}N$

	$K, \text{Вт}/(\text{К}^*\text{м})$	α	$c, \text{Дж}/(\text{кг}^*\text{К})$	$C_{K,AlGaN}, \text{Вт}/(\text{К}^*\text{м})$
GaN	130	-0,43	491	6,95
AlN	285	-1,57	748	

Робота діода досліджувалась як з урахуванням ефекту саморозігрівання, так і без нього в наближенні постійної температури кристалічної решітки. На Рис. 1 зображені залежності коефіцієнту теплопровідності від температури при фіксованій частці AlN у твердому розчині $Al_zGa_{1-z}N$ (Рис.1 (а)) та в залежності від складу z сполуки $Al_zGa_{1-z}N$ при температурі 300 К (Рис.1 (б)).

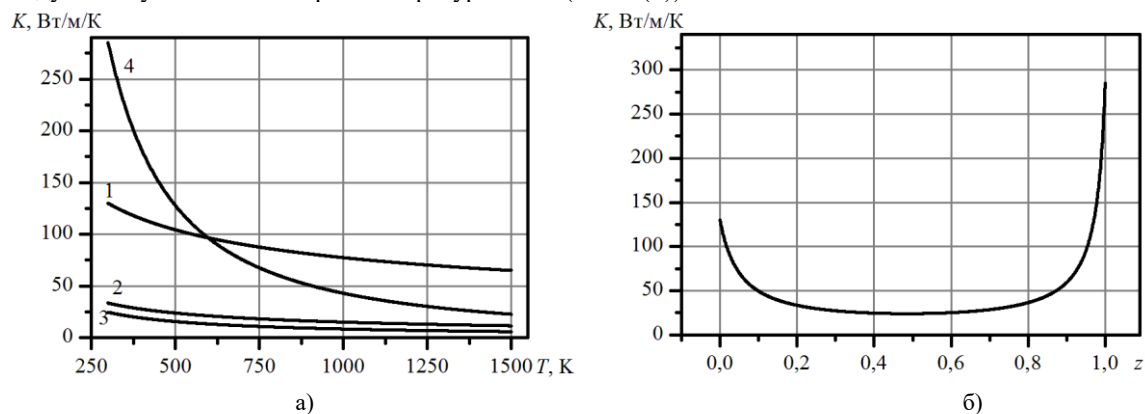


Рис. 1. Залежності коефіцієнту теплопровідності від температури (а), отримані при фіксованих частках AlN z в $Al_zGa_{1-z}N$: 1 – $z=0$; 2 – $z=0,2$; 3 – $z=0,4$; 4 – $z=1$. Залежності коефіцієнту теплопровідності від частки AlN z в $Al_zGa_{1-z}N$ при температурі 300К (б).

Fig. 1. Dependencies of the thermal conductivity coefficient on temperature (a) for fixit contain AlN(z) in $Al_zGa_{1-z}N$: 1 – $z=0$; 2 – $z=0.2$; 3 – $z=0.4$; 4 – $z=1$. Dependencies of the thermal conductivity coefficient on the contain AlN(z) in $Al_zGa_{1-z}N$ at a temperature of 300K (b).

З Рис. 1 видно, що з ростом температури коефіцієнт теплопровідності матеріалу суттєво знижується. В розглянутому температурному діапазоні для GaN коефіцієнт теплопровідності зменшується вдвічі (крива 1 на Рис 1 (а)), а для AlN більше, ніж в шість разів (крива 4 на Рис 1 (а)). Варто відзначити, що коефіцієнт теплопровідності для потрійних $Al_zGa_{1-z}N$ сполук менший, ніж для подвійних (Рис 1 (б)). Це свідчить про можливе зменшення інтенсивності теплової передачі, що може вплинути на теплові властивості варізонних шарів.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДІВ

Отримані в результаті моделювання характерні розподіли напруженості електричного поля та температури показані на Рис. 2. Вони відповідають постійній напрузі живлення 25 В, яка прикладена до діода довжиною 1 мкм, що містить варізонний шар GaN- $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$.

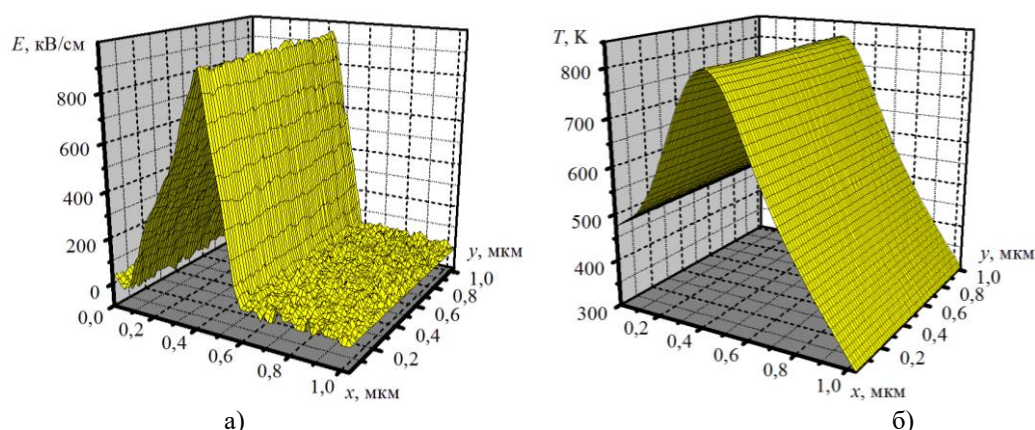


Рис. 2. Розподіл напруженості електричного поля (а) та температури (б) в діоді з варізонним шаром GaN- Al_{0,45}Ga_{0,55}N.
Fig. 2. Distribution of electric field strength (a) and temperature (b) in a diode with GaN- Al_{0,45}Ga_{0,55}N- graded-band layer.

З Рис. 2 (а) та Рис. 2 (б) видно, що максимальна температура відповідає області з максимальною напруженістю електричного поля, проте її положення дещо зміщене відносно області максимального поля на величину, близьку до довжини вільного пробігу носіїв (електронів). Саме в області високого поля носії заряду отримують додаткову кінетичну енергію, що передається кристалічній решітці. Зростання енергії носіїв збільшує імовірність їх розсіювання та збільшення кількості актів розсіювання на фонових, що призводить до локального підвищення температури кристалічної решітки. Наслідком цього є зниження рухливості носіїв заряду і, відповідно, зменшення величини струму, що протікає через діод. Розподіл потенціальної енергії в діоді і кінетичної енергії частинок, а також залежності густини струму від напруги за умови постійної температури діода та з урахуванням процесів саморозігрівання показані на Рис. 3.

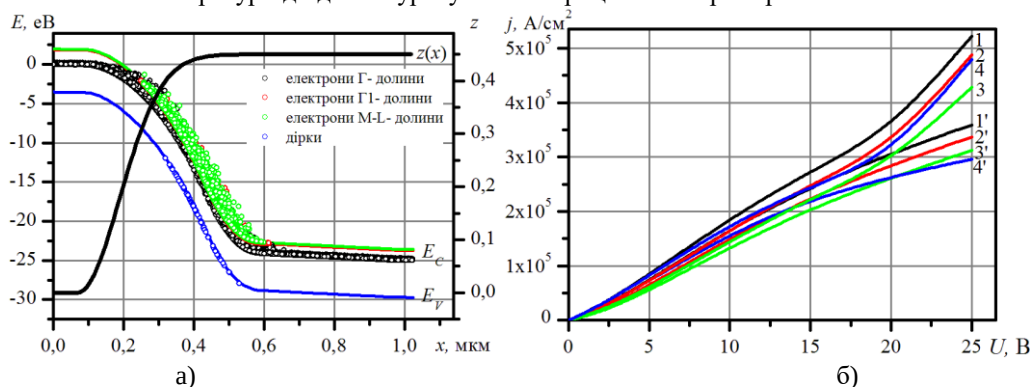


Рис. 3. Енергетична діаграма та розподіл молярної частки z а). Залежності густини струму від прикладеної напруги б): при фіксованих температурах кристалічної решітки 1, 1' – 300 K, 2, 2' – 400 K, 3, 3' – 500 K та 4, 4' – за температури 300 K з урахуванням процесу саморозігрівання для діода з варізонним шаром GaN- Al_{0,12}Ga_{0,88}N – 1-4, та GaN- Al_{0,45}Ga_{0,55}N – 1'-4'.

Fig. 3. Energy diagram and distribution of molar fraction z a). Dependencies of the current density on the applied voltage b): at fixed crystal lattice temperatures of 1, 1' – 300 K, 2, 2' – 400 K, 3, 3' – 500 K, and 4, 4' – at a temperature of 300 K obtaining with account the self-heating process for diode based on graded layer GaN- Al_{0,12}Ga_{0,88}N – 1-4 and GaN- Al_{0,45}Ga_{0,55}N – 1'-4'.

В умовах постійної високої температури в діоді спостерігається зменшення величини густини струму. Воно є найбільш суттєвим в області високих напруг, на ділянці насичення струму, що відповідає утворенню домену сильного поля на катоді. Характеристики діодів, які було отримано з урахуванням ефектів саморозігрівання мають схожу поведінку: спостерігається зменшення величини струму, яке виражене при великих напругах на діоді. Важливим моментом є суттєва неоднорідність розподілу температури, яка посилюється в момент виникнення ударної іонізації в ньому.

На Рис. 4 наведено залежності величини максимальної напруженості електричного поля та максимальної температури від постійної напруги, що прикладена до діода. Отримані величини відповідають станам, що сформувалися за час 12 нс від початку ввімкнення постійної напруги. Можна побачити, що температура в області домену може досягати величини більшої 800 K за умови високої напруги на діоді і початку розвитку ударної іонізації в ньому.

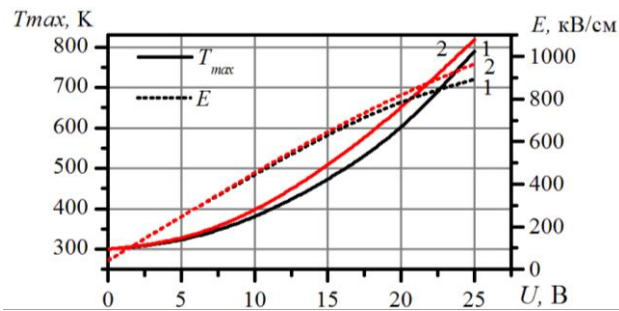


Рис. 4. Залежності максимальної температури та електричного поля від напруги в діоді з варізонним шаром: 1) GaN-Al_{0,12}Ga_{0,88}N; 2) GaN-Al_{0,45}Ga_{0,55}N.

Fig. 4. Dependencies of maximal temperature and electric field on applied voltage in a diode with graded-band layer: GaN-Al_{0,12}Ga_{0,88}N; 2) GaN-Al_{0,45}Ga_{0,55}N.

Слід зазначити, що отримані величини температури є критичними для роботи діодів. Для гетероструктур на основі GaN/AlGaIn найбільш поширеними є сплавні контакти на основі металічних шарів Ti/Al/X/Au, де X може бути Pt, Ni, Mo, та подібні до них [18,19]. Незважаючи на відмінні теплові властивості нітридів, температури, за яких відбувається формування контактів до діодів на їх основі, лежать в діапазоні 500 – 900°C, і підвищення температури на контактах вище вказаних значень може призвести до порушення їх стабільності та руйнування.

Отже, відповідно до отриманих результатів можна стверджувати про важливість врахування температурних ефектів, особливо, ефектів саморозігрівання, при конструюванні діодів з катодним доменом та їх суттєвий вплив на характеристики шумових діодів, навіть якщо мова йде про такі температурно стійкі матеріали як GaN і AlGaIn.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Основні результати зводяться до наступного:

1. У шумових діодах на основі AlGaIn, що містять варізонний гетеро катод, підвищення температури призводить до деградації характеристик – зменшення струму, що протікає через діод.
2. Аналіз ефекту саморозігрівання в діоді показує, що в умовах існування ударної іонізації у варізонному катодному шарі відбувається локальний розігрів діода до температур вищих 800 K, який може привести до його руйнування.
3. Врахування саморозігрівання повинно стати обов'язковим компонентом аналізу діодів, що містять стаціонарні області сильного поля і працюють в режимі ударної іонізації, не виключаючи діоди на основі нітридних сполук з розмірами порядку 1 мкм.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Crandall JP, O JH, Gajwani P, et al. Measurement of Brown Adipose Tissue Activity Using Microwave Radiometry and F-FDG PET/CT. *Journal of Nuclear Medicine*. 2018 Aug; 59(8): 1243–1248.
2. Song HJ, Tadao Nagatsuma. *Handbook of Terahertz Technologies*. CRC Press; 2015.
3. 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): 485–492.
4. Chan WL, Deibel J, Mittleman DM. Imaging with terahertz radiation. *Reports on Progress in Physics*. 2007 Jul 12;70(8): 1325–1379.
5. Price DC, Greenhill LJ, Fialkov A, et al. Design and characterization of the Large-aperture Experiment to Detect the Dark Age (LEDA) radiometer systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018 May; 478(3): 4193–4213.
6. Parashare CR, Kangaslahti PP, Brown ST, et al. Noise sources for internal calibration of millimeter-wave radiometers. 13th Specialist Meeting On Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (Microrad). 2014 Mar.
7. Ehsan N, Piepmeier J, Solly M, Macmurphy S, Lucey J, Wollack E. A robust waveguide millimeter-wave noise source. 2015 European Microwave Conference (EuMC). 2015 Sep 7.
8. Dunleavy L, Smith M, Lardizabal S, Fejzuli A, Roeder R. Design and characterization of fet based cold/hot noise sources. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 1997 Jun 8.
9. Kantanen M, Weissbrodt E, Varis J, et al. Active cold load MMICs for Ka-, V-, and W-bands. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2015 Jun, 9(8): 742–747.

10. Prokhorov ED, Botsula OV, Dyadchenko AV, Gorbunov IA. Monte Carlo simulation of diode with cathode static domain. 2013 23rd Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo). 2013 Sep 8.
11. Storozhenko IP. Static domain in a transferred-electron device based on graded-gap AlGaAs. Telecommunications and Radio Engineering. 2016; 75(12): 1101–1111.
12. Botsula O, Prykhodko K, Zozulia V. Modeling of Planar 2D/3D Semiconductor Heterostructures Based on MoS₂/GaN Junction. 2022 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). 2022 Nov 14.
13. Fan A, Tarau C, Bonner R, Palacios T, Kaviani M. 2-D simulation of hot electron-phonon interactions in a submicron gallium nitride device using hydrodynamic transport approach. ASME 2012 Summer Heat Transfer Conference (HT2012). 2012 Jul 8.
14. Xu RL, Rojo MM, Islam SM, et. al. Thermal conductivity of crystalline AlN and the influence of atomic-scale defects. Journal of Applied Physics. 2019 Nov, 126: 185105-1–185105-6.
15. Tran DQ, Delgado-Carrascon R, Muth JF, et.al. Phonon-boundary scattering and thermal transport in Al_xGa_{1-x}N: Effect of layer thickness. Applied Physics Letters. 2021 Jan. 117: 252102-1–252102-5.
16. Adachi S. Properties of semiconductor alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors. John Wiley & Sons; 2009.
17. Quay R. Gallium Nitride Electronics. Springer; 2008.
18. Malmros A, Blanck H, Rorsman N. Electrical properties, microstructure, and thermal stability of Ta-based ohmic contacts annealed at low temperature for GaN HEMTs. Semiconductor Science and Technology. 2011 Mar; 26(7): 075006-1–075006-7.
19. Li Q, Zhou Q, Gao S, Liu X, Wang H. Ti/Al/Ti/TiW Au-free low temperature ohmic contacts for un-doped AlGaIn/GaN HEMTs. Solid-State Electronics. 2018 Sep; 147: 1–5.

Стаття надійшла до редакції: 6 березня 2024 р.

Рекомендовано до друку: 11 квітня 2024 р.

THE IMPACT OF TEMPERATURE ON HETEROCATHODE NOISE DIODES CHARACTERISTICS

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

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

Background. The creation of compact noise sources in a wide frequency range, capable of invariance and reproducibility characteristics over time and external conditions, is an urgent task in the telecommunications and security field, in particular, as reference signal sources for measuring the noise characteristics of amplifiers and receivers. One of the devices that can satisfy the requirements for noise sources are diodes with a cathode static domain (DCSD). An important factor that affects the characteristics of semiconductor devices is temperature and self-heating.

Purpose of Work. The aim of the work is to study the effect of temperature and self-heating on the characteristics of DCSDs containing a graded-band layer based on nitride compounds.

Techniques and Methodology. Diode characteristics are obtained by numerical modeling of carrier transfer processes in two-dimensional semiconductor structures using the ensemble Monte Carlo method. Substantial mechanisms of scattering of charge carriers are taken into account. The work calculates the dependences of the current density on different values of the constant bias voltage on the diode and on different temperatures with and without taking into account heating. The phonon model was used to describe the heating processes in the selected diodes.

Results. The dependences of the current density on the applied supply voltage were obtained for various DCSD diodes with a graded band AlGaIn cathode under the conditions of a different constant temperature and taking into account the effect of self-heating. It is shown that an increase in temperature leads to a decrease in the diode current density. The self-heating effect is shown can significantly limit the operating voltage range of the diode.

Conclusions: The effect of temperature on the operation of diodes based on AlGaIn with a graded gap heterocathode is demonstrated. An increase in temperature leads to a limitation of the working voltages of the diode and, under the conditions of impact ionization, can lead to the destruction of the diode.

KEY WORDS: static cathode domain, transferred electron effect, molar fraction, graded gap, impact ionization, scattering, numerical simulation.

The article was received by the editors: March 6 2024.

The article is recommended for printing: April 11 2024