

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-43-06>

УДК 621.382.2

**В. О. ЗОЗУЛЯ**, доктор філософії, н. с.

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

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

e-mail: [kyrylo.prykhodko@karazin.ua](mailto: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

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМОВИХ ДІОДІВ З ВАРІЗОННИМ КАТОДОМ З УРАХУВАННЯМ ЕФЕКТІВ САМОРОЗІГРІВАННЯ

**Актуальність.** Існує ряд обмежень щодо отримання генерації електромагнітних коливань на високих частотах та функціонального застосування твердотілих електронних пристроїв. Фізичні обмеження, або інерційність ключових процесів, які визначають його роботу, часто є перешкодою для досягнення відповідної робочої частоти, або потрібного функціоналу. Використання варізонних матеріалів та їх вдале поєднання із структурою приладу, на зразок біполярних гетеротранзисторів, або діодів на основі міждолинного переносу електронів, часто може забезпечити отримання відповідних характеристик. Використання варізонних матеріалів дає змогу покращити частотні характеристики приладів, що є актуальним для створення зокрема активних елементів призначених для генерації складних шумових сигналів.

**Метою роботи** є розробка та визначення характеристик активного елемента на основі GaN з варізонною меза-структурою на основі InGaN.

**Методи і методологія.** Для моделювання роботи діода та отримання його характеристик використано багаточастинковий метод Монте-Карло, що містить процедуру визначення розподілу температури та враховував теплові властивості контактних областей (катода, аноду і підкладки).

**Результати.** Запропоновано активний елемент на основі GaN для застосування в широкому діапазоні частот. Структура діода являє собою провідний канал з катодною мезо-структурою на основі варізонного шару InGaN та двома омичними контактами до катода та анода. Отримано характеристики діода при постійному струмі. Розглянуто умови для отримання необхідного розподілу електричного поля в катоді діода.

**Висновки.** Характеристики активного елемента на основі GaN з варізонною InGaN меза-структурою на катоді було отримано моделюванням методом Монте-Карло. Показано, що в такій структурі можна отримати стабілізацію електричного поля, ударну іонізацію та використати її для генерації шумового сигналу в широкій смузі частот.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** GaN, меза-структура, напруженість електричного поля, статичний домен, варізонний шар, ударна іонізація, самонагрівання

**Як цитувати:** Зозуля ВО., Приходько КГ. Характеристики шумових діодів з варізонним катодом з урахуванням ефектів саморозігрівання. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2025;43:62-67. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-43-06>

**In cites:** Zozulia VO, Prykhodko KH. Characteristics of noise diodes with a graded-gap cathode accounting for self-heating effects. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series Radiophysics and Electronics. 2025;43:62-67. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2025-43-06>

### ВСТУП

Активні діодні елементи, в основі роботи яких лежить ефект міждолинного перенесення електронів (МПЕ), мають широку функціональність. Ці пристрої можуть бути джерелами коливань, підсилювачами і забезпечувати різні функції, такі як модуляція, генерація ультразвуку та інші [1]. Однак існує кілька обмежень, коли мова йде про отримання високих частот та функціональне застосування цих пристроїв. Так, прилади з МПЕ демонструють значне зниження потужності змінного струму на частоті близькій до оберненого проміжку часу, що характеризує перенесення електронів між долинами зони провідності, а їх діапазон робочих частот є вузьким, що обмежує застосування приладів у розробках з широкою частотною смугою.

Значні зміни властивостей пристрою можна досягти, використовуючи матеріали, що мають змінну просторову решітку, і, відповідно, залежну від координати ширину забороненої зони, так звані варізонні напівпровідники [2]. Застосування варізонних напівпровідників добре відоме як спосіб модифікації електронного транспорту електронів у діоді Ганна [3,4]. Однією з основних властивостей діодів зі змінною

© Зозуля В. О., Приходько К.Г., 2025

**Open access.** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

шириною забороненої зони є гарні частотні характеристики, що забезпечують налаштування частоти шляхом зміни величини напруги зміщення [4], на відміну від звичайних діодів, що мають слабку залежність робочої частоти від величини постійної напруги. Розширення частоти також було продемонстровано в планарній структурі діода з активними бічними границями (АБГ) [5,6]. В структурах цього типу напівпровідниковий елемент (АБГ) розташовувався поверх провідного каналу з двома омичними контактами у вигляді мезоструктури, яка електрично поєднана з анодним контактом. Варто зазначити, що найбільш широкий діапазон зміни робочої частоти, що є характерним для цих структур, було отримано саме для АБГ у вигляді варізонного шару [7].

Електронна війна та проблема, зумовлена зростаючим використанням летальної автономної зброї актуалізує задачі пошуку захисту від неї та пошук засобів створення перешкод для електромагнітних сигналів або зниження ефективності їх використання.

Метою роботи є розробка активного елемента на основі нітридних сполук з варізонним катодним InGaN шаром та дослідження його характеристик. Використання нітридів дозволяє створити пристрої високої потужності з такими перевагами як високе електричне поле, стійкість до високих температур, висока теплопровідність. Акцент робиться на створенні умов для стабільної іонізації в діоді та масштабованості діода для отримання необхідних частот і параметрів сигналу

### СТРУКТУРА І МОДЕЛЬ

Початкова структура пристрою визначається умовами, що унеможливають появу високочастотних коливань. У цьому випадку в діоді може виникати некогерентний або шумовий струм. Цей режим відповідає режиму підсилення в приладах з МПЕ, де поширення домену пригнічується. Щоб отримати таку умову, розподіл поля повинен контролюватися зовнішнім полем.

Існує кілька способів досягнення стабільності приладів з МПЕ. Надкритичні леговані пристрої можуть бути стабілізовані за допомогою спеціального профілю легування. Наприклад, це може бути область із зниженим рівнем легування біля катода або бар'єр Шоттки поблизу катода. Такого ж ефекту можна досягти, сформувавши спеціальну геометрію контакту діода або поєднавши спеціальну геометрію пристрою з вищезазначеними способами.

Розглянуто діод, що складається з планарної частини (2) на основі GaN товщиною  $L_x = 0,32$  мкм, яка розміщувалася на сапфіровій підкладці (1) товщиною 1,28 мкм (точка  $x_1$ ), Рис. 1 .

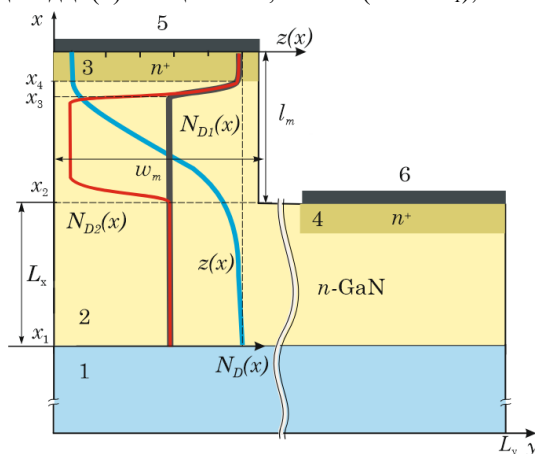


Рис. 1. Структура діода, розподіл складу напівпровідника та типові профілі легування.  
Fig. 1. Diode structure, composition profiles, and a typical doping profile.

Меза структура довжиною  $l_m$  і шириною  $w_m$  розміщена на верхній частині каналу, утворюючи катод діода. Концентрація донорів у сильно легованих контактних областях (3) і (4) становила  $5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Усі контакти в структурі вважаються омичними. Ширина металевого контакту (5) та (6) вибиралася рівною 0,16 мкм. Таким чином, довжина активної області складає близько 1 мкм, повна довжина структури, включаючи катодну меза-структуру, становить 1,92 мкм.

На Рис. 1 також показано розподіл легуючої домішки та залежність складу  $z(x)$  сполуки  $\text{In}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$  від координати  $x$  уздовж лінії поперечного перерізу діода, що включає канал і катодну меза-структуру:

$$z(x) = \begin{cases} 1, & x \leq x_2 \\ 1 - \exp\left(-\frac{(x-x_2)^2}{2\sigma^2}\right), & x \in (x_2, x_4) \\ 0, & x \geq x_4 \end{cases} \quad (1)$$

Було розглянуто два типи діодів, що відрізнялися профілем легування уздовж області, яка включає варізонний катод, на Рис.1  $N_{D1}(x)$  та  $N_{D2}(x)$ . Профілі легування  $N_{D1}(x)$  відповідали діодам без області зниженої концентрації (тип 1). Профілі легування  $N_{D2}(x)$  представляють діод з областю низького опору з концентрацією донорів  $10^{20} \text{ м}^{-3}$  (тип 2).

Для отримання залежності струму, що відображає стохастичні процеси в реальному часі, для моделювання діода використано синхронний багатокомпонентний метод Монте-Карло (МК). Крок часу  $5 \times 10^{-16}$  с. Було використано трьохдолинну модель зони провідності, представлену нижньою  $\Gamma$ -долиною та верхніми  $\Gamma_1$ - і  $M-L$ -долинами. Розглядається початкова стадія ударної іонізації, що виникає внаслідок сильного електричного поля, що формується в діоді. Враховуючи, що іонізація фактично відбувається за ініціації одним типом носіїв заряду (електронів), закони збереження енергії та імпульсу були застосовані точно. Деталі моделювання розсіювання носіїв заряду наведені в [7]. Параметри матеріалу обрані відповідно до [7-10]. Анізотропія властивостей матеріалів була врахована у залежності від координат діелектричної проникності, коефіцієнтів ударної іонізації, параметрів розсіювання та теплових параметрів матеріалів.

З огляду на важливість теплового нагріву діода в умовах сильних електричних полів, ефект самонагрівання в діоді було враховано аналогічно до моделі [11,12]. Багатокомпонентний метод Монте-Карло було реалізовано самоузгоджено з рівнянням Пуассона та рівнянням теплопровідності, які розв'язувалися чисельно з використанням повного багатосіткового алгоритму [13].

Температура нижньої сапфірової поверхні прийнята рівною 300 К, так само як і температура на поверхні контактів. На решті поверхні задається умова адіабатичності. Залежності теплових параметрів InGaN від температури беруться з [14]. Омичний контакт розглядався, як зроблений із золота з адгезійним шаром титану. Для такого контакту теплова провідність на межі метал-InN і метал-GaN прийнята однаковою і становить  $2 \cdot 10^8 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$  [15]. Теплова провідність на межі розділу GaN і сапфірової підкладки прийнята рівною  $10^7 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$  [16]. Самонагрівання було розглянуто як процес, що відбувається за участі фононів, які разом з ударною іонізацією є основними джерелами тепла в приладі.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ДІОДІВ

Відомо, що квазіелектричне поле у варізонному шарі компенсується внутрішнім електричним полем, що утворюється внаслідок зміщення електронів у напівпровіднику  $n$ -типу. Через це квазіелектричне поле діє на дірки значно сильніше, ніж на електрони. Дірки, що з'являються в результаті ударної іонізації, швидко переміщуються в катод. Через високу концентрацію електронів в області  $n^+$ , електричні поля в меза-структурі майже не змінюються.

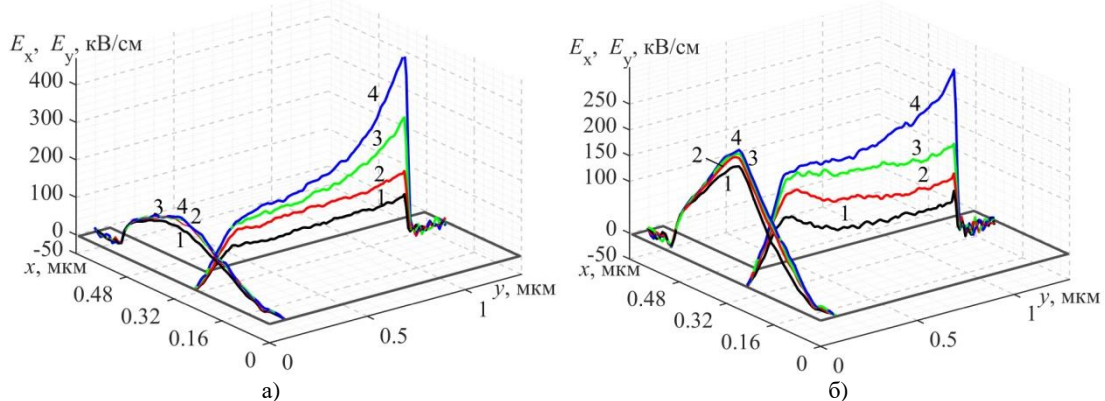


Рис. 2. Розподіл напруженості електричного поля у двох перпендикулярних напрямках в діоді уздовж ліній  $x=0,24 \text{ мкм}$  ( $E_y$ ) та  $y=0,08 \text{ мкм}$  ( $E_x$ ),  $N_d=6 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , а – тип 1, б – тип 2 і різній прикладеній напрузі: 1 –  $U=10 \text{ В}$ ; 2 –  $U=15 \text{ В}$ ; 3 –  $U=20 \text{ В}$ ; 4 –  $U=25 \text{ В}$ .

Fig. 2. Distribution of components electric field in two perpendicular directions in the diode along the lines  $x=0.24 \text{ }\mu\text{m}$  ( $E_y$ ) and  $y=0.08 \text{ }\mu\text{m}$  ( $E_x$ ),  $N_d=6 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ , а – type 1, б – type 2 and at different applied voltage: 1 –  $U=10 \text{ V}$ ; 2 –  $U=15 \text{ V}$ ; 3 –  $U=20 \text{ V}$ ; 4 –  $U=25 \text{ V}$ .

Розподіл електричного поля, отриманий для діодів типу 1 і типу 2, показаний на Рис. 2 для різної напруги постійного струму, що прикладається до діодів.

У випадку діода типу 2 максимальна величина електричного поля майже вдвічі більша, ніж у діода типу 1, що призводить до часткової іонізації в каналі діода. В каналі можуть накопичуватися дірки, що сприяє зростанню провідності і, відповідно, збільшенню струму.

Слід зазначити, що розподіл електричного поля в широкому діапазоні зміщення залишається досить однорідним або має невелике відхилення від однорідного. Ця умова є оптимальною для створення підсилувачів на ефекті міждолинного переносу електронів. У цьому випадку більший приріст електричного поля спостерігається поблизу катода, а в решті діода розподіл поля є майже рівномірним. Винятком є коротка ділянка поблизу початку каналу, де електричне поле є низьким.

Залежності густини струму від прикладеної напруги зміщення для діода з різним рівнем легування  $2 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ,  $6 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  та  $10^{23} \text{ м}^{-3}$  показано на Рис. 3. Характеристики діода, отримані за температури навколишнього середовища 300 К, досліджено з урахуванням можливих ефектів самонагрівання.

На Рис. 3 всі суцільні лінії відповідають діодам типу 2. Для цих діодів найбільший поріг ударної іонізації з'являється при концентрації меншій  $10^{23} \text{ м}^{-3}$ . При великій концентрації легування ударна іонізація призводить до значного підвищення концентрації електронів у каналі, що спричиняє зростання струму. У діоді типу 1 додаткове зростання струму пов'язане зі збільшенням концентрації дірок у каналі. Коли ширина області з високим опором невелика, властивості діода наближаються до властивостей діода типу 1.

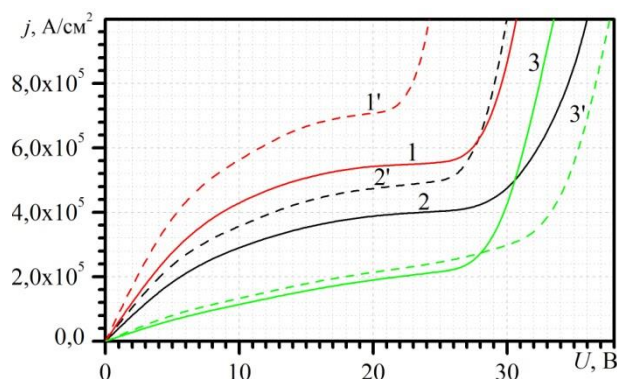
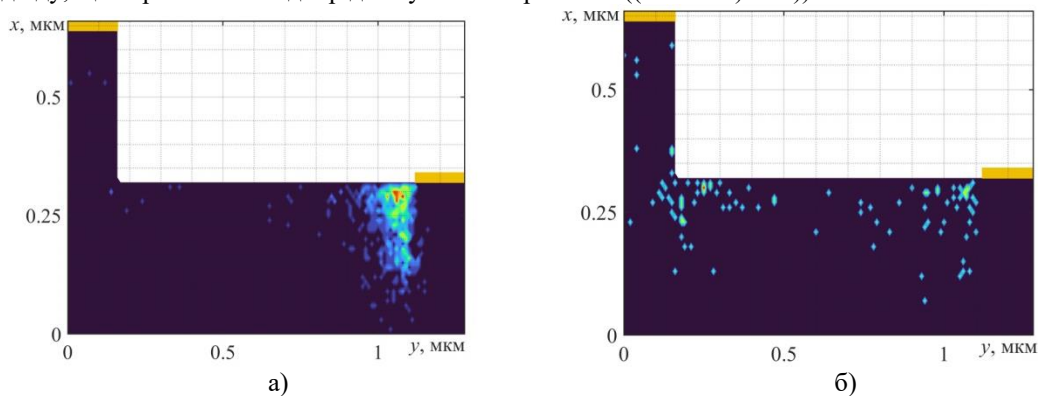


Рис. 3. Залежності густини струму від прикладеної напруги: 1, 1' –  $N_d=10^{23} \text{ м}^{-3}$ ; 2, 2' –  $N_d=6 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ; 3, 3' –  $N_d=2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ; 1-3 – тип 1, 1'-3' – тип 2.

Fig. 3. Dependence of current density on applied bias voltage: 1, 1' –  $N_d=10^{23} \text{ м}^{-3}$ ; 2, 2' –  $N_d=6 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ; 3, 3' –  $N_d=2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ; 1-3 – type 1, 1'-3' – type 2.

Ефект самонагрівання в діоді проявляється по-різному в залежності від типу профілю легування. Джерелом тепла є переважно ударна іонізація. Для діодів 1-го типу електричне поле локалізується поблизу анода, що сприяє появі УІ та активному нагріванню прилеглих до анода областей (рис. 4 а) та в)). Для діоду 2-го типу електричне поле локалізується біля меза-структури та УІ виникає як в самій меза-структурі, так і в каналі діоду, що сприяє більш однорідному його нагріванню (( Рис. 4 а) та в)).



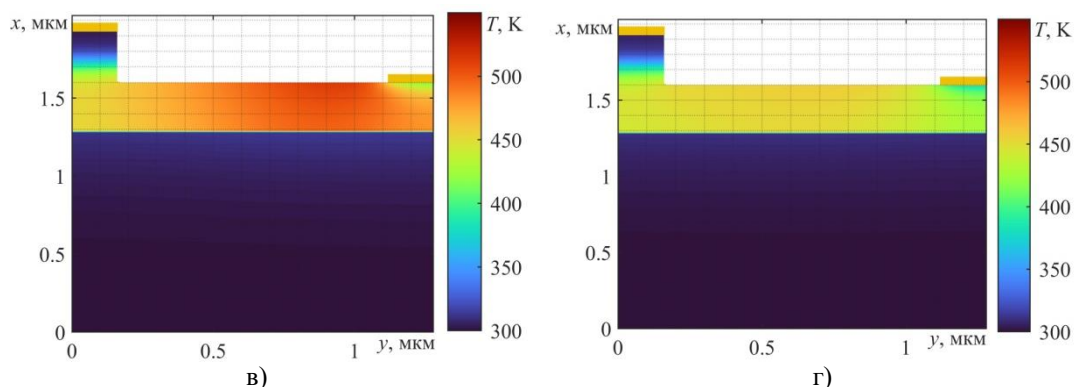


Рис. 4. Розподіл актів ударної іонізації (а, б) та температури у приладі (в, г) при  $U = 25\text{В}$ ,  $N_d = 6 \cdot 10^{22}\text{ м}^{-3}$  тип 1 (а, в) та тип 2 (б, г) за час моделювання  $t = 12,8\text{ нс}$ .

Fig. 4. Distribution of impact-ionization events (a, b) and temperature within the device (c, d) at  $U = 25\text{ V}$  and  $N_d = 6 \cdot 10^{22}\text{ m}^{-3}$  type 1 (a, c) and type 2 (b, d) for a total simulation time of  $t = 12,8\text{ ns}$ .

В результаті за однакової величини постійної напруги підвищення температури в діоді типу 1 вище, ніж у діоді типу 2. Так, у випадку концентрації в каналі  $N_d = 6 \cdot 10^{22}\text{ м}^{-3}$ , якому відповідає Рис. 4, за постійної напруги 25 В ця різниця становить близько 60 К (до 510 К в діоді 1-го типу та 460 К в діоді 2-го типу). У разі підвищення концентрації величина температури і різниця температур між діодами зростає. Зокрема для  $N_d = 10^{23}\text{ м}^{-3}$  максимальні температури в діоді вже становлять 620 К та 545 К для діодів 1-го та 2-го типу, відповідно. Однак стабілізації електричного поля вже не вдається досягти і діод переходить в режим генерації коливальних, що обумовлено формуванням і руху в ньому доменів сильного поля та заряджених шарів.

Як показали попередні розрахунки за постійної напруги, що відповідає початку ударної іонізації, та стабілізації електричного поля в діодах спостерігається генерація шуму в широкій смузі частот. В діодах 1-го типу, діапазон частот, в якому спостерігається шумова генерація виявився ширшим порівняно з діодами 2-го типу, що пов'язано з більш інтенсивною ударною іонізацією та більш високою температурою в ньому.

Дослідження діодів з довшим каналом показує, що в них максимальна спектральна густина шуму зміщується в бік низьких частот. Це дозволяє впливати на частотні властивості діодів та відповідно розширити область їх практичного застосування і стане предметом подальших досліджень.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Основні результати зводяться до наступного:

1. Отримано характеристики на постійному струмі для планарних GaN-діодів з варізонною InGaN меза-структурою на катоді.
2. Показано формування стабільних розподілів напруженості електричного поля з можливістю для виникнення ударної в катодному або анодному контакті за відповідного вибору профілю легування.
3. Максимальна температура в каналі діодів може досягти більш 700 К і потенційно впливає на шумові властивості діодів.

## КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

## REFERENCES

1. Shur M. S. GaAs Devices and Circuits. Springer London, Limited, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1989-2>
2. Kaydash MV. Properties of AllInN Graded-Gap Gunn Diodes. Telecommun Eng. 2014; 73(10):899-908. <https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v73.i10.40>
3. Storozhenko I, Sanin S. Advanced Micron Sized Gunn Diode Based on Graded-Gap GaPAs – GaInAs. J Nano Electron Phys. 2022; 14(1):01027-1. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(1\).01027](https://doi.org/10.21272/jnep.14(1).01027)
4. Storozhenko I, Sanin S. Terahertz Oscillations in InN Gunn Diodes with an Active Region Length of 1 mm and With A Graded GaInN Layer. PHYS ASTRON. 2022; 27(4):289-98. <https://doi.org/10.15407/rpra27.04.289>
5. Botsula OV, Zozulia VO. Generation of THz Oscillations by Diodes with Resonant Tunneling Boundaries. J Nano Electron Phys. 2020; 12(6):06037-1. [https://doi.org/10.21272/jnep.12\(6\).06037](https://doi.org/10.21272/jnep.12(6).06037)
6. Botsula OV, Prykhodko KH, Zozulia VO. Diodes with Lateral n+-n -Border. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON); 2-6 лип. 2019; Lviv, Ukraine.: IEEE; 2019.



- <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879884>
7. Botsula OV, Prykhodko KH. Graded Band InGaN- Based Diode for Noise Generation in Terahertz Range. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW); 21-25 верес. 2020; Kharkiv, Ukraine.: IEEE; 2020. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252763>
  8. Adachi S. Properties of semiconductor alloys: Group-IV, III-V and II-VI semiconductors. Chichester, West Sussex, U.K: Wiley; 2009. <https://doi.org/10.1002/9780470744383>
  9. Morkoç H. Handbook of nitride semiconductors and devices. Weinheim: Wiley-VCH; 2008. <https://doi.org/10.1002/9783527628438>
  10. Siddiqua P, Hadi WA, Shur MS, O'Leary SK. A 2015 perspective on the nature of the steady-state and transient electron transport within the wurtzite phases of gallium nitride, aluminum nitride, indium nitride, and zinc oxide: a critical and retrospective review. J Mater Sci. 23 трав. 2015;26(7):4475-512. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3055-7>
  11. Zozulia VO, Khodachok YS, Botsula OV, Prykhodko KH. Self-Heating Effect in Planar GaN Diode with 2D-h-BN - Layer. J Nano Electron Phys. 2024; 16(6):06034-1. [https://doi.org/10.21272/jnep.16\(6\).06034](https://doi.org/10.21272/jnep.16(6).06034)
  12. Jacoboni C, Reggiani L. The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials. Rev Mod Phys. 1 лип. 1983; 55(3):645-705. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.55.645>
  13. Joppich W, Mijalković S. Multigrid methods for process simulation. Microelectron J. Берез. 1995; 26(2-3):xxvii—xxviii. [https://doi.org/10.1016/0026-2692\(95\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0026-2692(95)90020-9)
  14. Prykhodko K, Zozulia V, Botsula O, Gorovyi I, Khodachok Y. Impact of Temperature on Graded Gap InGaN-based Diode Characteristics. 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET); 8-12 жовт. 2024; Lviv, Ukraine. IEEE; 2024. с. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755943>
  15. Sarua A, Ji H, Hilton KP, Wallis DJ, Uren MJ, Martin T, Kuball M. Thermal Boundary Resistance Between GaN and Substrate in AlGaIn/GaN Electronic Devices. IEEE Trans Devices. 2007; 54(12):3152-8. <https://doi.org/10.1109/TED.2007.908874>
  16. Donovan BF, Szejewski CJ, Duda JC, Cheaito R, Gaskins JT, Peter Yang CY, Constantin C, Jones RE, Hopkins PE. Thermal boundary conductance across metal-gallium nitride interfaces from 80 to 450 K. Appl Phys Lett. 17 листоп. 2014;105(20):203502. <https://doi.org/10.1063/1.4902233>

Стаття надійшла до редакції: 14 жовтня

Рекомендовано до друку: 26 листопада

Опубліковано: 30 грудня 2025

## CHARACTERISTICS OF NOISE DIODES WITH A GRADED-GAP CATHODE ACCOUNTING FOR SELF-HEATING EFFECTS

V. O. Zozulia, K. H. Prykhodko

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, 61022, Kharkiv, Svobody square, 4

**Background.** There are a number of limitations to obtaining the generation of electromagnetic oscillations at high frequencies and for functional application of solid-state electronic devices. Physical limitations, and the inertia of key processes to be determinate its operation, are often an obstacle to achieving the appropriate operating frequency or the desired functionality. The use of graded materials and their successful integration into a device structure, such as bipolar heterotransistors or intervalley electron transfer diodes, can often ensure the obtaining of appropriate characteristics. The application of graded materials allows us to improve the frequency characteristics of devices. It is relevant for the creation of active elements intended for the generation of complex noise signals.

**Purpose of Work.** The aim of the work is the development of a GaN-based active element with an InGaIn-based graded gap mesa structure, and evaluation of their characterization.

**Techniques and Methodology.** To simulate the operation of the diode and obtain its characteristics, the Ensemble Monte Carlo method was applied. It involved into a procedure for determining of temperature distribution and took into account the thermal properties of the contact regions (cathode, anode and substrate).

**Results.** A GaN-based active element for a wide frequency range is proposed. The diode structure consists of a conductive channel with a cathode mesa structure based on a graded-gap InGaIn layer and two ohmic contacts to the cathode and anode. The direct current diode characteristics are obtained. The conditions to obtaining of the required electric field distribution in the diode cathode are examined

**Conclusions:** The characteristics of a GaN-based active element with graded InGaIn mesa structures at the cathode were obtained by using Monte Carlo simulation. Electric field stabilization and impact ionization can be obtained in the structure was shown. The structure may be used for wide frequency noise generation.

**KEY WORDS:** GaN, mesa structure, electric field strength, static cathode domain, graded gap layer, impact ionization, self-heating.

The article was received by the editors: October 14 2025

The article is recommended for printing: November 26 2025

Published: December 30 2025