

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.04.289>  
УДК 621.382.2

І.П. Стороженко<sup>1</sup>, С.І. Санін<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державний біотехнологічний університет  
вул. Алчевських, 44, Харків, 61002, Україна  
E-mail: Prof.Igor.Storozhenko@gmail.com

<sup>2</sup> Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України  
вул. Акад. Проскури, 12, Харків, 61085, Україна

## ТЕРАГЕРЦОВІ КОЛИВАННЯ В InN-ДІОДАХ ГАННА З ДОВЖИНОЮ АКТИВНОЇ ОБЛАСТІ 1 мкм ТА З GaInN ВАРИЗОННИМ ШАРОМ

**Предмет і мета роботи.** Приладом, що потенційно може забезпечувати генерацію потужних коливань на частотах вище 300 ГГц, вважається InN-діод Ганна. Одним із засобів підвищення НВЧ-потужності та граничної частоти діодів Ганна є використання варизонних напівпровідників. Об'єктом даного дослідження є процес генерації в InN- та варизонних GaInN-діодах Ганна з омичними катодним та анодним контактами та довжиною активної області 1 мкм. Для збільшення потужності коливань пропонується зміна складу GaInN-напівпровідника. Метою роботи є оптимізація структури варизонного GaInN-діода для отримання максимальної потужності та частоти коливань при мінімальній потужності постійного струму.

**Методи та методологія.** Застосовано математичну модель гідродинамічного транспорту електронів у варизонних напівпровідниках, а також інтегродиференціальне рівняння відносно падіння напруги на коливальному RLC-контурі.

**Результати.** Отримано та проаналізовано спектри потужності коливань при різних параметрах діода та коливального контуру. Знайдено залежності потужності коливань від частоти для різних концентрацій електронів, які свідчать про можливість отримання суттєвої НВЧ-потужності на частотах понад 300 ГГц за допомогою InN-діодів Ганна з варизонним GaInN-шаром.

**Висновок.** Підтверджено перспективність використання варизонного GaInN-шару в InN-діоді для підвищення потужності електричних коливань, зниження необхідної потужності постійного струму та зменшення залежності вихідних характеристик від концентрації електронів. Найбільшу потужність коливань демонстрував InN-діод з варизонним GaInN-шаром довжиною 0.1 мкм, проте частота коливань у такому діоді була нижчою, ніж в InN-діоді. Діод з варизонним GaInN-шаром довжиною 0.9 мкм забезпечує компроміс між потужністю та частотою НВЧ-коливань і потребує найменшої потужності постійного струму для генерації на високих частотах.

**Ключові слова:** діод Ганна, нітрид індію, нітрид індію-галію, терагерцовий діапазон, варизонний напівпровідник, генератор, потужність коливань, вихідна потужність, гранична частота, міждолинне перенесення електронів.

Ц и т у в а н н я: Стороженко І.П., Санін С.І. Терагерцові коливання в InN-діодах Ганна з довжиною активної області 1 мкм та з GaInN варизонним шаром. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27. № 4. С. 289–298. <https://doi.org/10.15407/rpra27.04.289>  
C i t a t i o n: Storozhenko, I.P., Sanin, S.I., 2022. Terahertz oscillations in InN Gunn diodes with an active region length of 1 μm and with a graded GaInN layer. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 27(4), pp. 289–298. <https://doi.org/10.15407/rpra27.04.289>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2022. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akademperiodyka" of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## Вступ

Основні переваги використання терагерцового діапазону електромагнітних хвиль вже достатньо відомі і викликають значний інтерес. Однією з основних проблем, яка ускладнює широке застосування систем терагерцового діапазону, є відсутність ефективних активних твердотільних джерел [1]. Переглядаючи існуючі прилади терагерцового діапазону можна легко помітити суттєву різницю між детекторами і джерелами за доступністю, різноманітністю та ціною. Джерел терагерцового діапазону мало, вони або занадто дорогі для широкого використання або великі за розміром, або і те й інше. Саме тому увага багатьох дослідників твердотільної електроніки зосереджена на технології створення дешевих транзисторів з частотною границею понад 300 ГГц [2]. Поряд дослідженнями в області технології швидкодіючих транзисторів активно ведеться пошук шляхів підвищення граничної частоти генерації традиційних твердотільних джерел міліметрового діапазону. До таких пристроїв відносяться діод Ганна, лавинно-пролітний діод, резонансно-тунельний діод і каскади помножувачів частоти [2]. Усі ці пристрої на частотах понад 30...100 ГГц мають низку фізичних проблем, які обмежують зверху їх робочу частоту.

Розглянемо діоди Ганна. Вони виділяються серед інших активних джерел міліметрового діапазону сукупністю позитивних властивостей, серед яких можна виділити невеликий розмір, низьку собівартість, мале енергоспоживання та низький рівень шуму [2]. Робота діодів Ганна заснована на ефекті міждолинного перенесення електронів (МПЕ). Коливання струму в діоді виникають завдяки послідовному циклічному утворенню, дрейфу та зникненню хвиль просторового заряду (електричного домену або збагаченого електронами шару). Якщо хвиля просторового заряду зростає, то струм у приладі спадає, а якщо вона зменшується, то струм зростає. Частота коливань таких пристроїв визначається часом, який витрачається на формування хвилі просторового заряду біля катода, її дрейф між катодним і анодним контактами в активній області та на її розсмоктування в аноді. Відповідно, щоб досягти більш високих частот, треба мінімізувати ці проміжки часу. Зменшити час дрейфу можна

збільшенням швидкості дрейфу або зменшенням довжини активної області.

Однак швидкість дрейфу хвилі просторового заряду в активній області обмежена мінімальною швидкістю дрейфу електронів у сильних полях. Зменшення довжини активної області стикається з різноманітними інерційними ефектами, які супроводжують утворення та розсмоктування хвилі просторового заряду при малих довжинах. Якщо довжина активної області стає занадто малою (менше 5...10 мкм), то потужність електричних коливань починає спадати. Оптимальний напівпровідниковий матеріал повинен, з одного боку, мати максимально можливу дрейфову швидкість електронів, а з іншого боку, хвиля просторового заряду повинна встигати сформуватися під час дрейфу електронів від катода до анода. Це суперечливі властивості напівпровідників. Відповідно, у роботі діодів Ганна існує багато інерційних фізичних ефектів, які обмежують зверху їх робочу частоту. Найповільнішим процесом є формування хвилі просторового заряду в активній зоні поблизу катодного контакту, який утворює довгу зону низької напруженості електричного поля. У цій зоні електрони дуже повільно набирають кінетичну енергію, необхідну для розсіювання в бічні долини зони провідності. Для зменшення впливу цього ефекту використовують різноманітні контактні явища, завдяки яким створюються умови для швидкого утворення хвилі просторового заряду. З різними типами катодних контактів, які використовуються в діодах Ганна, можна ознайомитися в роботах [2–4]. Одним з найбільш ефективних контактів є гетероперехід [3–6].

Іншим способом збільшення частоти коливань діодів Ганна є використання напівпровідникових матеріалів, в яких електрони мають вищу дрейфову швидкість та менші часи релаксації, ніж в GaAs. До таких матеріалів відносяться InP [2, 7–9], InGaAs [10–12], InGaPAs [3], InAlAs [13] та напівпровідникові нітриди [10, 15]. На цей час InP-діод є найпотужнішим напівпровідниковим джерелом на частотах понад 290 ГГц [2]. Прогнози також вказують на те, що InP-діодом може вироблятися значна кількість НВЧ-енергії, принаймні до 500 ГГц [8]. До напівпровідникових нітридів належать BN, GaN, AlN, InN та їх сплави. Ці матеріали визнані важливими для виробниц-

тва різних електронних пристроїв, включаючи діоди Ганна [14–16].

Існує велика кількість теоретичних робіт, присвячених дослідженням як транспортних властивостей GaN та InN, так і генерації електричних коливань у діодах на їх основі [16–25]. Результати досліджень свідчать, що GaN- та InN-діоди здатні демонструвати кращі характеристики за частотою та НВЧ-потужністю порівняно з GaAs- та InP-діодами. Однак практична генерація коливань в GaN- та InN-діодах залишається нереалізованою.

Справа в тому, що режим генерації коливань в GaN- та InN-діодах можливий при дуже великій потужності постійного струму. Порогове значення електричного поля від'ємної диференціальної рухливості (ВДР) у GaN в 50 разів, а в InN у 20 разів більше, ніж у GaAs, тоді як швидкість дрейфу в GaN і InN приблизно в 2 рази вища, ніж у GaAs [16–18]. Крім того, для виникнення дрейфових доменів у GaN- та InN-діодах Ганна потрібна більша концентрація електронів у активній області, ніж у GaAs [16, 18]. Досягнення порога ВДР потребує не тільки у кілька сотень разів більшої потужності постійного струму [23], яку необхідно відвести з приладу, але й створення умов поблизу катода для швидкого збільшення енергії електронів, необхідної для їх розсіювання в бічні долини зони провідності. Виявилось, що методи, які використовувалися в InP- та GaAs-діодах, є неефективними для GaN та InN [19–22].

Проблема ефективної генерації коливань за допомогою GaN- та InN-діодів Ганна залишається невирішеною до сьогодні. Щодо її подолання оптимізм вселяють роботи [26, 27], в яких вперше спостерігається генерація коливань у GaN-діоді.

З точки зору більших значень дрейфової швидкості більш привабливим є InN [16, 18, 24]. Однак треба мати на увазі, що в InN велика імовірність перекриття ефекту міждолинного перенесення електронів ударною іонізацією [25].

Сучасний стан у розробці діодів Ганна потребує досліджень, завдяки яким можна знайти шляхи вирішення проблеми застосування напівпровідникових нітридів.

Об'єктом дослідження є процес генерації електричних коливань в InN- та у варизонних GaInN-діодах Ганна з омичним катодним та анодним контактами і довжиною активної області

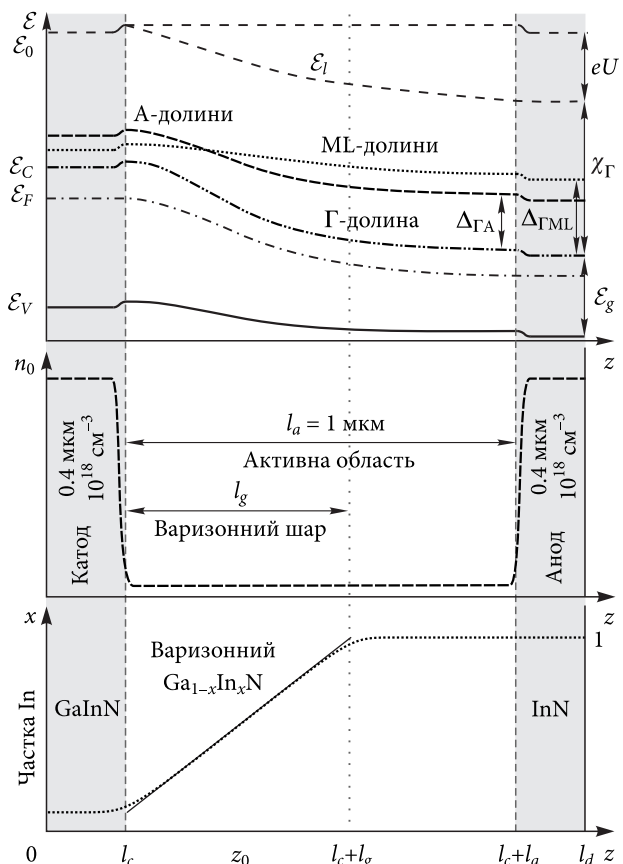


Рис. 1. Схеми зонної діаграми, рівня легування та молярної фракційної частки In в InN-діоді з варизонним GaInN–InN-шаром

1 мкм. Пропонується використовувати поступову зміну складу напівпровідника GaInN як засіб для стимуляції генерації дрейфуючих доменів, збільшення НВЧ-потужності та зменшення потужності постійного струму.

Мета дослідження – оптимізація структури варизонного GaInN-діода для отримання максимальних значень потужності та частоти коливань при мінімізації потужності постійного струму.

### 1. Постановка проблеми, параметри діода та методика дослідження

Схему  $n^+ - n - n^+$  InN-діода з варизонним GaInN–InN-шаром показано на рис. 1.

Діод містить  $n^+ - \text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  ( $x = 0 \dots 1$ ) катодний шар,  $n^+ - \text{InN}$  анодний шар і шар активної області, який розташовано між катодним і анодним шарами. Активна область, у свою чергу, містить шар варизонного напівпровідника  $n - \text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ , в якому при збільшенні відстані від катодного



Рис. 2. Схема генератора з підключенням діода до джерела напруги та еквівалентної схеми резонатора

шару молярна компонента In збільшується з координатою  $z$  від  $x = 0 \dots 1$  на межі катодного шару до  $x = 1$  на довжині не менше ніж 20 нм, але не більше довжини активної області, та шар  $n$ -InN на межі анодного шару.

Довжини катода і анода становлять 0.4 мкм, а активної області — 1.0 мкм. Концентрація електронів у катоді та в аноді —  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Концентрація електронів у активній області встановлювалась від  $4 \cdot 10^{16}$  до  $9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

У дослідженні використовувалась модель GaInN-модифікації вюрцит з Г-, МL- та А-долинами [14, 17]. Мольна частка In в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  задається S-залежністю так само, як в статтях [22, 23]. Діод має площу перерізу  $S = 400 \text{ мкм}^2$ .

Вивчався процес генерації електричних коливань у діодах на основі напівпровідників з різним складом, різною довжиною варизонного шару та різною концентрацією електронів у активній області. Отримано спектри потужності коливань під час дії імпульсу прикладеної напруги протягом 2130 пс.

Дослідження було проведено за допомогою математичної моделі транспорту електронів у варизонному напівпровіднику. Модель ґрунтується на розв'язанні кінетичного рівняння Больцмана у припущенні, що електрони підпорядковані зміщеному розподілу Максвелла, і являє собою систему рівнянь, яка складається з рівнянь неперервності, рівнянь густини струму та рівнянь балансу енергії для кожної з трьох нееквівалентних долин зони провідності напівпровідника, а також рівняння Пуассона. Детально модель пояснюється в роботах [3, 4, 23]. Ця система рівнянь розв'язується числовим методом. Диференціальні рівняння апроксимуються різницевиими рівняннями, кожне з яких зводиться до системи алгебричних рівнянь та розв'язується за алго-

ритмом Томаса (метод «прогонки»). Усі процеси розглядаються лише за координатою  $z$ . Припустимо, що на напівпровідник діє тільки зовнішнє електричне поле. Температуру кристалічної ґратки вважаємо постійною та рівною 300 К. Середня густина струму в приладі визначається як сума середніх струмів провідності електронів та струму зміщення.

Розглянемо коливання в діоді з резонатором і без нього. Якщо резонатор відсутній, то напруга  $U$  подається безпосередньо на діод. Середня потужність  $k$ -ї гармоніки визначається за формулою  $P_k = 0.5 J_k V_k S \cos(\Delta\theta_k)$ , де  $J_k$  і  $V_k$  — амплітуди коливань густини струму і падіння напруги на діоді  $k$ -ї гармоніки;  $\Delta\theta_k$  — різниця фаз між коливаннями густини струму і напругою,  $k = 1, 2, 3$  — номер гармоніки. Середня потужність постійного струму  $P_0 = J_0 V_0 S$ .

Розміщення діода в резонаторі моделюється еквівалентною схемою підключення діода до паралельного коливального RLC-контурі, як показано на рис. 2.

У цьому випадку на діод подається напруга  $U(t) = U - U_c(t)$ , де  $U_c$  — падіння напруги на коливальному контурі:

$$\frac{1}{C} \frac{dU_c}{dt} + L \int_0^t U_c dt + \frac{1}{R} U_c = J(t).$$

Інтегродиференціальне рівняння для коливального контуру розв'язується числовим методом сумісно з системою транспортних рівнянь діода Ганна. Потужність коливань у коливальному контурі визначається за формулою  $P(t) = J(t)U_c(t)S$ . Вхідними даними є прикладена постійна напруга  $U$ , рівень легування, мольна частка In в GaInN, довжина варизонного шару  $l_g$ , довжина діода  $l_d$ , довжина активної області  $l_a = 1$  мкм, індуктивність  $L$ , ємність  $C$  і навантаження  $R = 376.73$  Ом еквівалентного резонансного контуру та параметри напівпровідників [14, 16, 17]. Вихідними даними є динамічні розподіли концентрації електронів, їх енергії, густини струму, напруженості електричного поля, залежності середньої густини струму, що протікає в діоді, спектр потужності коливань у діоді, в коливальному контурі та в активному опорі (вихідна потужність).

Досліджено спектри середньої потужності коливань при різній довжині варизонного шару,



різній концентрації електронів у активній зоні, різних мольних частках In в сплаві GaInN, різній прикладеній напрузі і різних індуктивності та ємності.

## 2. Генерація коливань у діоді

Генерація електричних коливань залежить від багатьох параметрів діода. Одним із основних параметрів є концентрація електронів у активній області. При зменшенні концентрації електронів потужність коливань у діоді Ганна спадає і за певної концентрації коливання стають неможливими [10]. За оцінками [18], критерій Крамера для InN становить  $nl_a = 2.1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , а за оцінками [16] —  $nl_a = 3.81 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Тобто для виникнення нестійкості струму, яка пов'язана з дрейфом електричного домену, концентрація електронів у активній області повинна бути не менше  $2.1 \cdot 10^{16} \dots 3.8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . У результаті нашого моделювання незгасаючі автоколивання в InN-діоді стають можливими за концентрації електронів у активній області не менше  $8.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Причиною виникнення коливань струму є дрейф збагаченого електронами шару. Передній фронт у рухомій хвилі просторового заряду не збіднений носіями заряду. При менших концентраціях електронів виникають тільки згасаючі автоколивання, але такі, що під час роботи діода в резонаторі можуть бути підсилені. Для порівняння, незгасаючі коливання в GaN-діоді за такої концентрації не відбуваються [23].

Що стосується InN-діода з  $n = 9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , то в ньому виникають коливання струму починаючи з напруги  $U = 13 \text{ В}$  і закінчуються при  $U = 25.5 \text{ В}$ . Частота коливань перебуває в діапазоні від 370 до 374 ГГц. При збільшенні напруги частота коливань зменшується. Середня потужність коливань досягає свого максимуму при оптимальному значенні напруги 18...19 В. Максимальна потужність основної гармоніки  $P_1 = 15,1 \text{ мВт}$  на частоті 369.8 ГГц, при  $U = 18 \text{ В}$ . Потужність постійного струму становить 53.9 Вт. Потужність другої гармоніки  $P_2 = 18 \text{ мкВт}$  на частоті 739.6 ГГц.

InN-діод з варизонним GaInN-шаром здатний генерувати незгасаючі коливання за меншої концентрації електронів, ніж InN-діод. На рис. 3 показано, що якщо концентрація електронів спадає, то потужність коливань зменшується, а їх частота зростає. Це цілком очікувано і зрозумі-

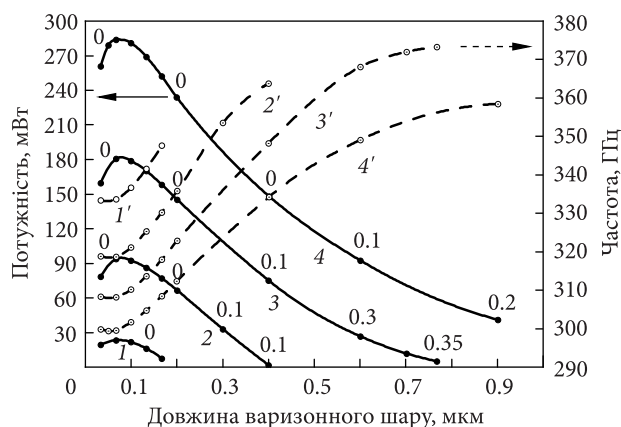


Рис. 3. Залежності середньої потужності (суцільні лінії) та частоти (штрихові лінії) коливань основної гармоніки Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N-InN-діода від довжини варизонного шару, коли мольна частка In та прикладена напруга є оптимальними для різної концентрації електронів: 1 —  $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 2 —  $7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 3 —  $8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; 4 —  $9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Числа над точками означають оптимальну молярну частку In в сплаві для максимальної середньої потужності коливань

ло. Максимальна потужність досягається, коли катод складається з GaN і довжина варизонного шару становить 0.07...0.1 мкм. Однак частота коливань у цьому випадку є мінімальною. Джерелом коливань струму є дрейф електричного домену. Передній фронт рухомої хвилі просторового заряду збіднений носіями заряду. Потужність і частота коливань залежать від прикладеної напруги так само, як в InN-діоді. При збільшенні прикладеної напруги частота коливань зменшується, а потужність коливань має максимум. Такі залежності однотипні для варизонних GaInN-діодів. Наприклад, в GaN-InN-діоді з  $l_g = 0,1 \text{ мкм}$  і  $n = 9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  коливання починають виникати при  $U = 11 \text{ В}$  і закінчуються при  $U = 21 \text{ В}$ . Частота коливань перебуває в діапазоні від 333 до 353 ГГц. Такий діод має максимальну потужність  $P_1 = 24.6 \text{ мВт}$  на частоті 336.3 ГГц при  $U = 17 \text{ В}$ . У цьому випадку потужність постійного струму дорівнює 30.4 Вт, а потужності другої та третьої гармонік  $P_2 = 425$  і  $P_3 = 0.2 \text{ мкВт}$ , відповідно.

Найвищу частоту коливань 382 ГГц з потужністю 0.4 мВт має Ga<sub>0,35</sub>In<sub>0,65</sub>N-InN-діод з  $l_g = 0.7 \text{ мкм}$  і  $n = 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при  $U = 14.2 \text{ В}$ . Максимальна потужність такого діода складає 11.8 мВт на частоті 371.9 ГГц при  $U = 17 \text{ В}$ . Потужності другої та третьої гармонік занадто малі.

Екстраполяція залежності максимальної потужності коливань в GaN-InN-діоді від концен-

трації електронів показує, що діод без резонатора втрачає свої активні властивості при концентрації приблизно  $5.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

З причинами збільшення потужності коливань і деталями виникнення та дрейфу хвиль просторового заряду в діодах на основі варизонних напівпровідників можна ознайомитися в роботах [3, 5, 6, 19, 21–23].

### 3. Генерація коливань у резонаторі з діодом

Розглянемо процеси в діоді на основі InN з варизонним GaN–InN-шаром, якщо діод помістити в резонатор. Довжина варизонного шару становить 0.1 і 0.9 мкм.

Моделювання показує, що якщо діод помістити в резонатор, то потужність і частота коливань змінюються. Частота коливань, що виникають в резонаторі з діодом, менше власної частоти резонатора і частоти автоколивань діода. Це пов'язано зі збільшенням амплітуди коливань напруги на діоді. Під дією постійною напруги, яка прикладена до діода, в ньому виникають автоколивання. Унаслідок резонансу амплітуда коливання напруги на діоді збільшується. Це призводить до зменшення частоти коливання струму в діоді та його виходу з резонансу коливального контуру. Зауважимо, що тут треба розрізнити потужність коливань в  $RLC$ -контурі з діодом і потужність коливань у навантаженні  $R$  (вихідну потужність). Вихідна потужність приблизно в  $10^2 \dots 10^3$  разів менша за потужність коливань у  $RLC$ -контурі з діодом. На рис. 4 показано залежність максимальної потужності коливань в  $RLC$ -контурі від частоти. Індуктивність та ємність коливального контуру оптимізовані за максимумом потужності коливань. При збільшенні добротності  $RLC$ -контуру потужність коливань має максимум, а частота коливань зростає (прямує до власної частоти коливального контуру). Одною з причин такої залежності є обмеженість за часом дії імпульсу напруги, яка прикладена до діода. Добротність коливального контуру перебуває в межах від 100 до 4000. Зі збільшенням частоти коливань для максимізації потужності треба брати більш високе значення добротності коливального контуру.

Отже, діапазон робочих частот коливань у резонаторі з діодом збільшується в бік нижчих

частот в порівнянні з коливаннями, що виникають у діоді без резонатора. Потужності коливань діода з резонатором та без резонатора збігаються тільки на високих частотах, близьких до граничної частоти. Максимальна потужність коливань спостерігається на менших частотах, ніж у діоді без резонатора.

Причиною виникнення коливань у діодах з варизонним GaN–InN-шаром є дрейф електричного домену, як і у випадку такого самого діода без резонатора.

Максимум потужності коливань спостерігається на оптимальній частоті за оптимальної напруги, які не збігаються з цими значеннями в діоді без резонатора. Наприклад, максимальна потужність GaN–InN-діода з  $l_g = 0.1$  мкм,  $n = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  і з резонатором дорівнює 1 196 мВт на частоті 211.8 ГГц за прикладеної напруги  $U = 50$  В. Для цього випадку потужність постійного струму  $P_0$  становить 98.7 Вт, а вихідна потужність — 17.3 мВт. Тобто оптимальна частота зменшується в 1.5 разу, а потужність коливань збільшується в 48 разів.

Оптимальна напруга та потужність постійного струму зменшуються зі збільшенням частоти. На частотах, близьких до граничної частоти, оптимальна напруга діода з резонатором майже збігається з оптимальною напругою діода без резонатора.

Якщо порівняти потужність та частоту коливань діодів з резонатором при різних концентраціях електронів у активній області, то виявиться наступне. Максимальні значення потужності коливань та потужність постійного струму більші, коли концентрація електронів вища. Спостерігається незначне збільшення оптимальної частоти при зменшенні концентрації електронів (рис. 4). Верхні граничні частоти майже не відрізняються в межах значень концентрації електронів  $4 \cdot 10^{16} \dots 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  та зменшуються при більш низьких її значеннях.

В GaN–InN-діоді з  $l_g = 0.1$  мкм верхня гранична частота становить 348 ГГц, якщо  $n = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , та 368 ГГц, якщо  $n = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Наприклад, діод з  $n = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  має потужність коливань 2.5 мВт і вихідну потужність 19 мкВт на частоті 347.4 ГГц з  $P_0 = 18.5$  Вт для  $U = 9$  В,  $L = 0.019$  пГн і  $C = 10.8634$  пФ. Діод з  $n = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  має потужність коливань 1.28 мВт і вихідну потужність

29.4 мВт на частоті 367.7 ГГц з  $P_0 = 14.3$  Вт, якщо  $U = 12$  В,  $L = 0.841$  пГн і  $C = 0.156$  пФ. Максимальна потужність коливань такого діода становить 751 мВт на частоті 214.0 ГГц з  $P_0 = 68$  Вт при  $U = 44$  В,  $L = 2.607$  пГн і  $C = 0.184$  пФ. У цьому випадку вихідна потужність становить 22.9 мВт.

Нагадаємо, що генерація незгасаючих автоколивань в GaN—InN-діоді з  $n = 4 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  без резонатора не відбувається (рис. 3). Наші оцінки показують, що генерація в GaN—InN-діоді з  $l_g = 0.1$  мкм і резонатором відбувається, якщо концентрація електронів не менша ніж  $0.6 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ .

Розглянемо процеси в InN-діоді з резонатором. Генерація коливань в такому діоді для заданих концентрацій електронів відбувається, на відміну від InN-діода без резонатора. Частота коливань, які виникають у InN-діоді, вища, ніж у GaN—InN-діоді ( $l_g = 0.1$  мкм). Це обумовлено тим, що електричні коливання в InN-діоді виникають завдяки дрейфу збагаченого електронами шару. Швидкість дрейфу такого шару більша, ніж швидкість дрейфу електричних доменів.

Максимальна потужність коливань у InN-діоді становить 930.0 мВт на частоті 255.8 ГГц для  $n = 6 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  ( $U = 40$  В,  $L = 0.5765$  пГн,  $C = 0.6499$  пФ) і 531.6 мВт на частоті 253.2 ГГц для  $n = 4 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  ( $U = 38$  В,  $L = 0.5765$  пГн,  $C = 0.6499$  пФ). Потужність постійного струму складає 83.7 і 62.4 Вт, відповідно. Верхня гранична частота InN-діода досягає 407 ГГц з  $P_0 = 38$  Вт для  $n = 6 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  та 420 ГГц з  $P_0 = 29$  Вт для  $n = 4 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  (див. вставку на рис. 4).

За нашими оцінками, гранична концентрація нестійкості струму в InN-діоді з резонатором дорівнює приблизно  $1.5 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ . Це значення майже збігається зі значенням концентрації щодо критерію Крамера  $2.1 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  [18].

Потужність і частота коливань у GaN—InN-діоді з  $l_g = 0.9$  мкм займає проміжне положення між характеристиками InN- і GaN—InN-діода з  $l_g = 0.1$  мкм. Коливання в такому діоді виникають унаслідок дрейфу електричного домену. Слід зауважити, що без резонатора незгасаючі автоколивання виникають, якщо концентрація електронів не менша ніж  $8.0 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$  (рис. 3).

У GaN—InN-діоді з  $l_g = 0.9$  мкм максимальна потужність коливань досягає 983 мВт на частоті 226.7 ГГц з  $P_0 = 99$  Вт, якщо  $n = 6 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ , та 619 мВт на частоті 229.7 ГГц з  $P_0 = 74$  Вт, якщо

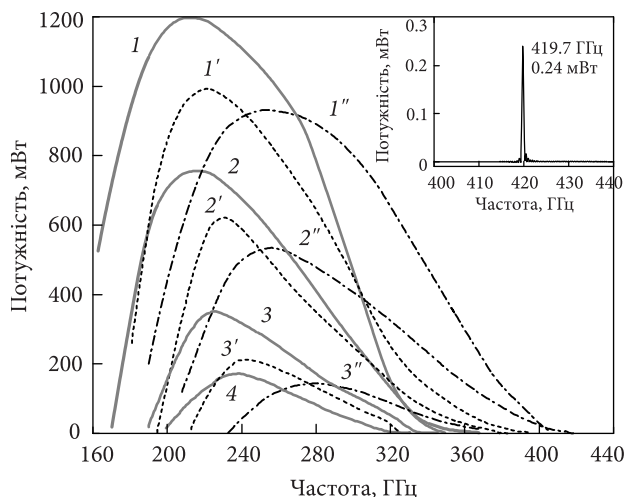


Рис. 4. Залежності середньої потужності коливань у резонаторі з InN-діодом (штрихпунктирні лінії) та з GaN—InN-діодом, якщо  $l_g = 0.1$  мкм (суцільні лінії) та  $l_g = 0.9$  мкм (пунктирні лінії) від частоти при різних концентраціях електронів у активній області діода: 1 —  $6 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 2 —  $4 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 3 —  $2 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ; 4 —  $1 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ . На вставці наведено спектр потужності коливань у резонаторі з InN-діодом при  $n = 4 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ ,  $U = 19$  В,  $L = 0.227$  пГн,  $C = 0.576$  пФ

$n = 4 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ . Верхня гранична частота складає 395.7 ГГц з  $P_0 = 15$  Вт, якщо  $n = 6 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ , та 378.7 ГГц з  $P_0 = 11$  Вт, якщо  $n = 4 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ . Найменша потужність постійного струму, що спостерігалася в процесі генерації, дорівнює 9.4 Вт для випадку GaN—InN-діода з  $l_g = 0.9$  мкм та  $n = 2 \cdot 10^{16}$  см $^{-3}$ .

Порівняємо отримані значення з НВЧ-потужністю, що генерується InP-діодом, представленою в статті [7]. InP-діоди мали активну область довжиною 1,1 мкм з градуированим профілем легування і діаметром перерізу 25...40 мкм. Найвища спостережувана частота третьої гармоніки становила 455 ГГц за вихідної потужності 23 мВт, а частота другої гармоніки 300.5 ГГц за вихідної потужності 3 мВт. Частота основної гармоніки 150...152 ГГц. У нашому дослідженні максимальна потужність спостерігається на частотах від 225 до 256 ГГц.

## Висновки

Результати наших досліджень показують, що InN-діод має найвищу оптимальну частоту коливань і найвищу граничну частоту. Однак потужність постійного струму є високою, а максимальна потужність коливань є найменшою

з розглянутих діодів. Діод без резонатора має незгасаючі автоколивання лише за умови, що концентрація електронів у активній області не менша  $9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Критична концентрація електронів в InN-діоді з резонатором становить приблизно  $1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Максимальна потужність коливань у діоді з  $n = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  майже в 2 рази менша, ніж у діоді з  $n = 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . З розглянутих діодів найбільш чутливим до зміни концентрації електронів виявився InN-діод. Збереження активних властивостей щодо генерації коливань при критично низьких рівнях легування є важливим критерієм для мінімізації потужності постійного струму. Якщо брати до уваги високу імовірність перекриття МПЕ ударною іонізацією [20], то перспектива отримання генерації в InN-діодах залишається під сумнівом.

Що стосується GaInN-діодів, то вони більш стійкі до зменшення концентрації електронів, ніж InN-діоди. Вони зберігають активні властивості при нижчих рівнях концентрації електро-

нів. Щоб досягти найвищої потужності коливань, слід використовувати GaN–InN-діод із коротким варизонним шаром довжиною приблизно 0.1 мкм. Однак такий діод має найнижчі значення оптимальної та верхньої граничної частоти.

GaN–InN-діод з варизонним шаром, довжина якого становить 0.9 мкм, забезпечує компроміс між потужністю та частотою коливань. Слід зауважити, що такий діод має найменшу потужність постійного струму на високих частотах та найменшу імовірність перекриття МПЕ ударною іонізацією серед розглянутих.

Підбиваючи підсумок цього дослідження, можна стверджувати, що генерацію електричних коливань з частотою основної гармоніки вище 300 ГГц може бути реалізовано завдяки діодам Ганна на основі варизонного GaInN.

Отримані результати розширюють знання про фізичні процеси перенесення носіїв у складних напівпровідникових структурах і можуть бути використані для технологічного проектування нових високошвидкісних приладів.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Hesler J., Prasankumar R., Tignon J. Advances in terahertz solid-state physics and devices. *J. Appl. Phys.* 2019. Vol. 126, Iss. 11. P. 110401. DOI: doi.org/10.1063/1.5122975.
2. Trew R.J. High-frequency solid-state electronic devices. *IEEE Trans. Electron Devices.* 2005. Vol. 52, Iss. 5. P. 638–649.
3. Storozhenko I. Gunn diodes based on graded-gap GaInPAs. *J. Nano- Electron. Phys.* 2020. Vol. 12, Iss. 1. P. 010151–010159. DOI: 10.21272/jnep.12(1).01015.
4. Arkusha Yu.V., Prokhorov E.D., Storozhenko I.P. In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs GaAs heterocathode in a GaAs millimeter-wave range Gunn diode. *Radiotekhnika i Elektronika.* 2000. Vol. 45, Iss. 4. P. 508–510.
5. Sharma S.K., Kim D.Y. Design, simulation, fabrication, packaging and testing of an AlGaAs/GaAs Gunn diode at 94 GHz. *J. Korean Phys. Soc.* 2015. Vol. 67, Iss. 4. P. 619–624. DOI: 10.3938/jkps.67.619.
6. Förster A., Lepsa M.I., Freundt D., Stock J., Montanari S. Hot electron injector Gunn diode for advanced driver assistance systems. *Appl. Phys. A.* 2007. Vol. 87. P. 545–558. DOI: 10.1007/s00339-007-3872-5.
7. Eisele H. Third-harmonic power extraction from InP Gunn devices up to 455 GHz. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2020. Vol. 19, Iss. 6. P. 416–418. DOI: 10.1109/LMWC.2009.2020044.
8. Eisele H., Kamoua R. Submillimeter-wave InP Gunn devices. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2004. Vol. 52, Iss. 10. P. 2371–2378. DOI: 10.1109/TMTT.2004.835974.
9. Garcia S., Perez S., Iniguez-de-la-Torre I., Mateos J., Gonzalez T. Comparative Monte Carlo analysis of InP- and GaN-based Gunn diodes. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115, Iss. 4. P. 44510. DOI: doi.org/10.1063/1.4863399.
10. Storozhenko I., Sanin S. Advanced micron sized Gunn diode based on graded-gap GaPAs – GaInAs. *J. Nano- Electron. Phys.* 2022. Vol. 14, Iss. 1. P. 01027–01032. DOI: 10.21272/jnep.14(1).01027.
11. Ata Khalid, Dunn G.M., Macpherson R.F., Thoms S., Macintyre D., Li C., Steer M.J., Papageorgiou V., Thayne I.G., Kuball M., Oxley C.H., Montes Bajo M., Stephen A., Glover J., and Cumming D.R.S. Terahertz oscillations in an In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As submicron planar Gunn diode. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115, Iss. 11. P. 114502. DOI: doi.org/10.1063/1.4868705.
12. Botsula O.V., Prykhodko K.H. Generation of electromagnetic oscillations of submillimeter range by Ga<sub>2</sub>In<sub>1-z</sub>As diodes using impact ionization. *J. Nano- Electron. Phys.* 2019. Vol. 11, Iss. 2. P. 020091–020095. DOI: 10.21272/jnep.11(2).02009.
13. Perez S., Gonzalez T., Pardo D., Mateos J. Terahertz Gunn-like oscillations in InGaAs/InAlAs planar diodes. *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 103, Iss. 9. P. 094516. DOI: https://doi.org/10.1063/1.2917246.
14. Dobrinsky A., Simin G., Gaska R., Shur M. III-Nitride Materials and Devices for Power Electronics. *ECS Trans.* 2013. Vol. 58, Iss. 4. P. 129–143. DOI: 10.1149/05804.0129ecst.
15. Yue Hao, Lin-An Yang, Jin-Cheng Zhang. GaN-based Semiconductor Devices for Terahertz Technology. *Int. J. Terahertz Sci. Technol.* 2008. Vol. 1, Iss. 2. P. 51–64. DOI: 10.11906/TST.051-064.2008.06.07.



16. Storozhenko I.P., Arkusha Yu.V. Prospects for using Gunn diodes based on GaN, AlN and InN. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2012. Vol. 71, Iss. 8. P. 717–727. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i8.40.
17. Farahmand M., Garetto C., Bellotti E., Brennan K.F., Goano M., Ghillino E., Ghione G., Albrecht J.D., Ruden P.P. Monte Carlo simulation of electron transport in the III-nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2001. Vol. 48, Iss. 3. P. 535–542. DOI: 10.1109/16.906448.
18. Aloise G., Vitanov S., Palankovski V. Performance study of nitride-based Gunn diodes. *2011 NSTI Nanotechnology Conference and Expo (NSTI-Nanotech): Proc.* Boston, Massachusetts, USA, 13–16 Jun. 2011. Vol. 2. P. 599–602.
19. Storozhenko I.P. Resonance frequencies of Gunn diodes based on nitride graded-gap semiconductors. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2014. Vol. 73, Iss. 13. P. 1201–1207.
20. Islama M.O., Hassanb Md.G., Islama Md.R., Uddina Md.A., Mahmooda Z.H. Theoretical estimation of Gunn oscillation in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . *AIP Conf. Proc.* 2011. Vol. 1399, Iss. 1. P. 167. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3666309>.
21. Storozhenko I.P., Yaroshenko A.N., Arkusha Yu.V. InBN and GaBN graded-gap Gunn diodes. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2014. Vol. 73, Iss. 16. P. 1461–1470. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i16.60.
22. Storozhenko I.P., Yaroshenko A.N., Kaydash M.V. Graded-gap AllnN Gunn diodes. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* 2012. Vol. 15, Iss. 2. P. 176–180. DOI: <https://doi.org/10.15407/spqeo15.02>.
23. Storozhenko I., Kaydash M. Theoretical Study of Current Oscillations in Gunn Diodes Based on Graded III-nitrides Operating in Submillimeter Range: Frequency and Power. *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, 21–25 Sept. 2020. Vol. 3. P. 917–920. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252660.
24. Yang L., Long Sh., Guo X., Yue Hao. A comparative investigation on sub-micrometer InN and GaN Gunn diodes working at terahertz frequency. *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 111, Iss. 10. P. 104514. DOI: [doi.org/10.1063/1.4721667](https://doi.org/10.1063/1.4721667).
25. Botsula O.V., Prykhodko K.H. Graded band InGaN-based diode for noise generation in terahertz range. *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, 21–25 Sept. 2020. Vol. 3. P. 925–928. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252763.
26. Yilmazoglu O., Mutamba K., Pavlidis D., Karaduman T. First Observation of Bias Oscillations in GaN Gunn Diodes on GaN Substrate. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2008. Vol. 55, Iss. 6. P. 1563–1567. DOI: 10.1109/TED.2008.921253.
27. Hajo A.S., Yilmazoglu O., Samodi B., Dadgar A., Kuppers F., Kussorow T. A new approach to achieve Gunn effect for GaN based THz sources with high power. *44th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. Paris, France, 1–6 Sept. 2019. P. 1–2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8873720.

Стаття надійшла 05.07.2022

## REFERENCES

1. Hesler, J., Prasankumar, R., Tignon, J., 2019. Advances in terahertz solid-state physics and devices. *J. Appl. Phys.*, **126**(11), pp. 110401. DOI: [doi.org/10.1063/1.5122975](https://doi.org/10.1063/1.5122975).
2. Trew, R.J., 2005. High-frequency solid-state electronic devices. *IEEE Trans. Electron Devices*, **52**(5), pp. 638–649.
3. Storozhenko, I., 2020. Gunn diodes based on graded-gap GaInPAs. *J. Nano- Electron. Phys.*, **12**(1), pp. 010151–010159. DOI: 10.21272/jnep.12(1).01015.
4. Arkusha, Yu.V., Prokhorov, E.D., Storozhenko, I.P., 2000.  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  GaAs heterocathode in a GaAs millimeter-wave range Gunn diode. *Radiotekhnika i Elektronika*, **45**(4), pp. 508–510.
5. Sharma, S.K., Kim, D.Y., 2015. Design, simulation, fabrication, packaging and testing of an AlGaAs/GaAs Gunn diode at 94 GHz. *J. Korean Phys. Soc.*, **67**(4), pp. 619–624. DOI: 10.3938/jkps.67.619.
6. Förster, A., Lepsa, M.I., Freundt, D., Stock, J., Montanari, S., 2007. Hot electron injector Gunn diode for advanced driver assistance systems. *Appl. Phys. A*, **87**, pp. 545–558. DOI: 10.1007/s00339-007-3872-5.
7. Eisele, H., 2020. Third-harmonic power extraction from InP Gunn devices up to 455 GHz. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, **19**(6), pp. 416–418. DOI: 10.1109/LMWC.2009.2020044.
8. Eisele, H., Kamoua, R., 2004. Submillimeter-wave InP Gunn devices. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **52**(10), pp. 2371–2378. DOI: 10.1109/TMTT.2004.835974.
9. Garcia, S., Perez, S., Iniguez-de-la-Torre, I., Mateos, J., Gonzalez, T., 2014. Comparative Monte Carlo analysis of InP- and GaN-based Gunn diodes. *J. Appl. Phys.*, **115**(4), pp. 44510. DOI: [doi.org/10.1063/1.4863399](https://doi.org/10.1063/1.4863399).
10. Storozhenko, I., Sanin, S., 2022. Advanced micron sized Gunn diode based on graded-gap GaPAs – GaInAs. *J. Nano- Electron. Phys.*, **14**(1), pp. 01027–01032. DOI: 10.21272/jnep.14(1).01027.
11. Ata Khalid, Dunn, G.M., Macpherson, R.F., Thoms, S., Macintyre, D., Li, C., Steer, M.J., Papageorgiou, V., Thayne, I.G., Kuball, M., Oxley, C.H., Montes Bajo, M., Stephen, A., Glover, J., and Cumming, D.R.S., 2014. Terahertz oscillations in an  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  sub-micron planar Gunn diode. *J. Appl. Phys.*, **115**(11), pp. 114502. DOI: [doi.org/10.1063/1.4868705](https://doi.org/10.1063/1.4868705).
12. Botsula, O.V., Prykhodko, K.H., 2019. Generation of electromagnetic oscillations of submillimeter range by  $\text{Ga}_z\text{In}_{1-z}\text{As}$  diodes using impact ionization. *J. Nano- Electron. Phys.*, **11**(2), pp. 020091–020095. DOI: 10.21272/jnep.11(2).02009.
13. Perez, S., Gonzalez, T., Pardo, D., Mateos, J., 2008. Terahertz Gunn-like oscillations in InGaAs/InAlAs planar diodes. *J. Appl. Phys.*, **103**(9), pp. 094516. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2917246>.
14. Dobrinsky, A., Simin, G., Gaska, R., Shur, M., 2013. III-Nitride Materials and Devices for Power Electronics. *ECS Trans.*, **58**(4), pp. 129–143. DOI: 10.1149/05804.0129ecst.
15. Yue, Hao, Lin-An, Yang, Jin-Cheng, Zhang, 2008. GaN-based Semiconductor Devices for Terahertz Technology. *Int. J. Terahertz Sci. Technol.*, **1**(2), pp. 51–64. DOI: 10.11906/TST.051-064.2008.06.07.

16. Storozhenko, I.P., Arkusha, Yu.V., 2012. Prospects for using Gunn diodes based on GaN, AlN and InN. *Telecommunications and Radio Engineering*, **71**(8), pp. 717–727. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v71.i8.40.
17. Farahmand, M., Garetto, C., Bellotti, E., Brennan, K.F., Goano, M., Ghillino, E., Ghione, G., Albrecht, J.D., Ruden, P.P., 2001. Monte Carlo simulation of electron transport in the III-nitride wurtzite phase materials system: binaries and ternaries. *IEEE Trans. Electron Devices*, **48**(3), pp. 535–542. DOI: 10.1109/16.906448.
18. Aloise, G., Vitanov, S., Palankovski, V., 2011. Performance study of nitride-based Gunn diodes. In: *2011 NSTI Nanotechnology Conf. and Expo (NSTI-Nanotech): Proc.* Boston, Massachusetts, USA, 13–16 Jun. 2011. Vol. 2, pp. 599–602.
19. Storozhenko, I.P., 2014. Resonance frequencies of Gunn diodes based on nitride graded-gap semiconductors. *Telecommunications and Radio Engineering*, **73**(13), pp. 1201–1207.
20. Islama, M.O., Hassanb, Md.G., Islama, Md.R., Uddina, Md.A., Mahmooda, Z.H., 2011. Theoretical estimation of Gunn oscillation in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . *AIP Conf. Proc.*, **1399**(1), pp. 167. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3666309>.
21. Storozhenko, I.P., Yaroshenko, A.N., Arkusha, Yu.V., 2014. InBN and GaBN graded-gap Gunn diodes. *Telecommunications and Radio Engineering*, **73**(16), pp. 1461–1470. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i16.60.
22. Storozhenko, I.P., Yaroshenko, A.N., Kaydash, M.V., 2012. Graded-gap AlInN Gunn diodes. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.*, **15**(2), pp. 176–180. DOI: <https://doi.org/10.15407/spqeo15.02>.
23. Storozhenko, I., Kaydash, M., 2020. Theoretical Study of Current Oscillations in Gunn Diodes Based on Graded III-nitrides Operating in Submillimeter Range: Frequency and Power. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, 21–25 Sept. 2020. Vol. 3, pp. 917–920. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252660.
24. Yang, L., Long, Sh., Guo, X., Yue, Hao, 2012. A comparative investigation on sub-micrometer InN and GaN Gunn diodes working at terahertz frequency. *J. Appl. Phys.*, **111**(10), pp. 104514. DOI: [doi.org/10.1063/1.4721667](https://doi.org/10.1063/1.4721667).
25. Botsula, O.V., Prykhodko, K.H., 2020. Graded band InGaN-based diode for noise generation in terahertz range. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, 21–25 Sept. 2020. Vol. 3, pp. 925–928. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252763.
26. Yilmazoglu, O., Mutamba, K., Pavlidis, D., Karaduman, T., 2008. First Observation of Bias Oscillations in GaN Gunn Diodes on GaN Substrate. *IEEE Trans. Electron Devices*, **55**(6), pp. 1563–1567. DOI: 10.1109/TED.2008.921253.
27. Hajo, A.S., Yilmazoglu, O., Samodi, B., Dadgar, A., Kupperts, F., Kussorow, T., 2019. A new approach to achieve Gunn effect for GaN based THz sources with high power. In: *44th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. Paris, France, 1–6 Sept. 2019. P. 1–2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8873720.

Received 05.07.2022

I.P. Storozhenko<sup>1</sup>, S.I. Sanin<sup>2</sup><sup>1</sup> State Biotechnology University  
44, Alchevskikh St., Kharkiv, 61002, Ukraine<sup>2</sup> O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU  
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, UkraineTERAHERTZ OSCILLATIONS IN InN GUNN DIODES WITH AN ACTIVE  
REGION LENGTH OF 1  $\mu\text{m}$  AND WITH A GRADED GaInN LAYER

**Subject and Purpose.** The InN Gunn diode is known as the device capable of generating powerful oscillations at frequencies above 300 GHz. A possible way for increasing both the microwave power and the cutoff frequency of the Gunn diode is to employ graded-gap semiconductors. The subject of this research is the process for generating electrical oscillations in InN and graded-gap GaInN Gunn diodes that involve resistive contacts at the cathode and the anode, and possess a 1- $\mu\text{m}$  long active region. The research is aimed at suggesting an optimized structure for the graded-gap GaInN diode to obtain a maximum microwave power and maximum frequency of the oscillations, while consuming the lowest possible amount of DC power.

**Methods and Methodology.** A hydrodynamic simulation has been performed of transport of electrons in graded-gap semiconductors, and an integro-differential equation analyzed concerning voltage drop across elements of the related RLC circuit.

**Results.** The power spectra of oscillations have been analyzed for a variety of parameters of both the Gunn diode and the RLC circuit. The frequency dependences of the oscillatory power, characteristic of different electron concentrations, provide evidence for the possibility of obtaining considerable microwave powers at frequencies above 300 GHz through the use of graded-gap GaInN diodes.

**Conclusion.** The results that have been obtained clearly confirm the expected practicality of using a graded GaInN layer in the InN diode for increasing the power of microwave oscillations, reducing the necessary level of the DC power, and restraining the dependence of the output characteristics on the electron density. The highest power of oscillations has been demonstrated by the InN diode with a 0.1  $\mu\text{m}$  long graded-gap layer of GaInN. Meanwhile, the oscillation frequency generated in that diode is somewhat lower than in the InN diode. A compromise between the values of generated power and the oscillation frequency has been reached in the diode with a graded-gap GaInN layer of 0.9  $\mu\text{m}$  in length. In addition, the latter structure requires the lowest level of DC power for effectuating microwave generation at the higher feasible frequencies.

**Keywords:** Gunn diode, indium nitride, gallium-indium nitride, terahertz range, graded-gap semiconductor, oscillator, oscillatory power, output power, cutoff frequency, inter-valley transfer of electrons.