

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-07>

УДК 621.382.2

**ПРО ПІДВИЩЕННЯ ПОТУЖНОСТІ КОРОТКИХ ДІОДІВ ГАННА НА ОСНОВІ  
ВАРИЗОННОГО InGaPAs****І.П. Стороженко<sup>1</sup>, Ю.В. Аркуша<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, вул.  
Алчевських, 44

E-mail: prof.igor.storozhenko@gmail.com

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

E-mail: y.v.arkusha@gmail.com

Надійшла до редакції 9 жовтня 2019 р.

**Актуальність.** Проблема освоєння терагерцового діапазону твердотільними приладами залишається на сьогодні актуальною. Як активні елементи використовуються діоди Ганна, IMPATT-діоди, резонансно-тунельні діоди та інші. На частотах вище 100 ГГц ці прилади мають ряд фізичних проблем, які обмежують максимальну роботу зверху. Однією з можливостей створення високочастотних діодів Ганна є використання різних варизонних багатокомпонентних напівпровідникових сполук. Діоди Ганна на основі таких сполук мають більш високі значення ефективності генерації і, відповідно, вихідної потужності.

**Мета роботи.** Багатокомпонентні напівпровідники, фракційний склад яких змінюється в просторі, дозволяють покращити взаємодію електричного поля і електронів в пристроях, що працюють на ефекті міждолинного перенесення електронів. Для досягнення найкращого ефекту такий напівпровідник повинен мати оптимальну залежність енергетичного зазору між нееквівалентними долинами зони провідності від координати. Тому мета роботи - дослідити залежності ефективної генерації коливань струму в терагерцовому діапазоні на основі варизонних напівпровідників  $Ga_{1-x}(z)In_y(z)P_y(z)As_{1-y}(z)$ .

**Матеріали та методи.** За допомогою математичного моделювання розглядаються  $n + - n - n + -$  діоди Ганна на основі варизонного напівпровідника  $Ga_{1-x}(z)In_y(z)P_y(z)As_{1-y}(z)$  з довжиною активної області 1,0 мкм і концентрацією іонізованих домішок в ній  $9 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Дослідження проведено на основі рішення кінетичного рівняння Больцмана для трирівневої  $\Gamma - L - X$  моделі міждолинного перенесення електронів. Система рівнянь, яка отримана, вирішується чисельно і дозволяє отримати динамічні розподіли концентрації носіїв, їх енергії, щільності струму, напруженості електричного поля а також падіння напруги на діоді.

**Результати.** Показано, що у варизонних діодах на основі  $Ga_{1-x}(z)In_y(z)P_y(z)As_{1-y}(z)$  може бути реалізований доменний режим нестабільності струму. На відміну від аналогічних приладів на основі однорідних за складом напівпровідників, таких як GaAs, InP або  $Ga_{0,5}In_{0,5}As$ , в діодах на основі варизонного  $Ga_{1-x}(z)In_y(z)P_y(z)As_{1-y}(z)$  виникають незгасаючі коливання струму. Максимальна потужність основної моди таких коливань становить 19 мВт на частоті 95 ГГц. В спектрі коливань присутні вищі гармоніки: потужність другої гармоніки - 1,6 мВт, а на третій - 0,3 мВт. Частота і потужність автоколивань в варизонних діодах залежить від складу напівпровідникових сполук як в аноді, так і в катоді і спостерігається при оптимальних значеннях прикладеної напруги.

**Висновки.** Варизонні діоди Ганна на основі  $Ga_{1-x}(z)In_y(z)P_y(z)As_{1-y}(z)$  з довжиною активної області 1,0 мкм і з концентрацією іонізованих донорних домішок  $9 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  можуть генерувати безперервні коливання струму в досить широкому частотному діапазоні за рахунок ефективної роботи на основній, другій та третій гармоніках. Результати дослідження можна використовувати при розробці високочастотних приладів для різних наукових досліджень.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** діод Ганна, моделювання, варизонний напівпровідник, ефект міждолинного переносу електронів, автоколивання, терагерцовий діапазон, гетероперехід

**О ПОВЫШЕНИИ МОЩНОСТИ КОРОТКИХ ДИОДОВ ГАННА НА ОСНОВЕ  
ВАРИЗОННОГО InGaPAs****И.П. Стороженко<sup>1</sup>, Ю.В. Аркуша<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенка, ул.  
Алчевских, 44<sup>2</sup> Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

**Актуальность.** Проблема освоения терагерцового диапазона твердотельными приборами остается на сегодняшний день актуальной. В качестве активных элементов используются диоды Ганна, IMPATT-диоды, резонансно-туннельные диоды и другие. На частотах выше 100 ГГц эти приборы имеют ряд физических проблем, которые ограничивают максимальную работу сверху. Одной из возможностей создания высокочастотных диодов Ганна есть использование различных варизонных многокомпонентных полупроводниковых соединений. Диоды Ганна на основе таких соединений имеют более высокие значения эффективности генерации и, соответственно, выходной мощности.

**Цель работы.** Многокомпонентные полупроводники, фракционный состав которых меняется в пространстве, позволяют улучшить взаимодействие электрического поля и электронов в устройствах, работающих на эффекте междолинного переноса электронов. Для достижения наилучшего эффекта такой полупроводник должен иметь оптимальную зависимость энергетического зазора между неэквивалентными долинами зоны проводимости от координаты. Поэтому цель работы – исследовать зависимости эффективной генерации колебаний тока в терагерцовом диапазоне на основе варизонного полупроводника  $Ga_{1-x(z)}In_{y(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$ .

**Материалы и методы.** С помощью математического моделирования рассматриваются  $n^+ - n - n^+$  диоды Ганна на основе варизонного полупроводника  $Ga_{1-x(z)}In_{y(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$  с длиной активной области 1,0 мкм и концентрацией ионизированных примесей в ней  $9 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Исследование проведено на основе решения кинетического уравнения Больцмана для трехуровневой  $\Gamma - L - X$  модели междолинного переноса электронов. Полученная система уравнений решается численно и позволяет получить динамические распределения концентрации носителей, их энергии, плотности тока, напряженности электрического поля а также падение напряжения на диоде.

**Результаты.** Показано, что в варизонных диодах на основе  $Ga_{1-x(z)}In_{y(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$  может быть реализован доменный режим нестабильности тока. В отличие от аналогичных приборов на основе однородных по составу полупроводников, таких как GaAs, InP или  $Ga_{0,5}In_{0,5}As$ , в диодах на основе варизонного  $Ga_{1-x(z)}In_{y(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$  возникают незатухающие колебания тока. Максимальная мощность основной моды таких колебаний составляет 19 мВт на частоте 95 ГГц. В спектре колебаний присутствуют высшие гармоники: мощность второй гармоники – 1,6 мВт, а на третьей – 0,3 мВт. Частота и мощность автоколебаний в варизонных диодах зависит от состава полупроводникового соединения как в аноде, так и в катоде и наблюдается при оптимальных значениях приложенного напряжения.

**Выводы.** Варизонные диоды Ганна на основе  $Ga_{1-x(z)}In_{y(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$  с длиной активной области 1,0 мкм и с концентрацией ионизированных донорных примесей  $9 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  могут генерировать непрерывные колебания тока в достаточно широком частотном диапазоне за счет эффективной работы на основной, второй третьей гармониках. Результаты исследования можно использовать при разработке высокочастотных приборов для различных научных исследований.

**Ключевые слова:** диод Ганна, моделирование, варизонный полупроводник, эффект междолинного переноса электронов, автоколебания, терагерцовый диапазон, гетеропереход

## ON INCREASING POWER OF SHORT InGaPAs GRADED-GAP GUNN DIODES

I.P. Stotozhenko<sup>1</sup>, Yu.V. Arkusha<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, 44 Alchevskih St., Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

**Background.** The problem of development of the terahertz range with solid state devices remains relevant today. Gunn diodes, IMPATT diodes, resonant tunneling diodes and others are used as active elements. At frequencies above 100 GHz, these devices have a number of physical problems that limit maximum operation from above. One of the possibilities of creating high-frequency Gunn diodes is the use of various graded-gap multicomponent semiconductor compounds. Gunn diodes based on such compounds have higher generation efficiency and, accordingly, output power.

**Objectives.** Multicomponent semiconductors, the fractional composition of which varies in space, can improve the interaction of the electric field and electrons in devices operating on the effect of intervalley electron transfer. To achieve the best effect, such a semiconductor should have an optimal coordinate dependence between the nonequivalent valleys of the conduction band. Therefore, the aim of the work is to investigate the dependences of the effective generation of current oscillations in the terahertz range based on a graded-gap semiconductor  $Ga_{1-x(z)}In_{y(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$ .

**Materials and methods.** Using mathematical modeling  $n^+ - n - n^+$  Gunn diodes based on a graded-gap semiconductor  $Ga_{1-x(z)}In_{y(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$  with active region length being 1,0  $\mu\text{m}$  and the concentration of ionized impurities in it being  $9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  are considered. The study was carried out based on the solving Boltzmann kinetic equation for a three-level  $\Gamma-L-X$  model of intervalley electron transfer. The resulting system of equations is solved numerically and allows one to get the dynamic distribution of the concentration of charge carriers, their energy, current density, electric field strength, and the voltage drop across the diode.

**Results.** It is shown that in graded-gap diodes based on  $Ga_{1-x(z)}In_{y(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$  some domain current instability mode can be implemented. Unlike similar devices based on homogeneous semiconductors, such as GaAs, InP or  $Ga_{0,5}In_{0,5}As$ , in diodes based on graded-gap  $Ga_{1-x(z)}In_{y(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$  undamped current oscillations occur. The maximum power of the main mode of such oscillations is 19 mW at a frequency of 95 GHz. Higher harmonics are present in the oscillations spectrum: the power of the second harmonic is 1,6 mW, and that of the third is 0,3 mW. The frequency and power of self-oscillations in graded-gap diodes depends on the composition of the semiconductor compound both in the anode and in the cathode and is observed at optimal values of the applied voltage.

**Conclusions.** Graded-gap Gunn diodes based on  $Ga_{1-x(z)}In_{y(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$  with active region length being 1,0  $\mu\text{m}$  and the concentration of ionized impurities in it being  $9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  are able to generate continuous current oscillations in a fairly wide frequency range due to efficient operation at the main, second and third harmonics. The research results can be used in the development of high-frequency devices for various scientific research.

**Keywords:** Gunn diode, simulation, graded-gap semiconductor, electron intervalley transport effect, self-oscillations, terahertz range, heterojunction.

## ВСТУП

Основні переваги і сценарії розвитку використання електромагнітних хвиль терагерцового діапазона вже достатньо відомі та викликають інтерес. Дешеві, малогабаритні та ефективні засоби генерації, випромінювання, ресстрації та обробки сигналів терагерцового діапазону на даний час мають великий попит. Переглядаючи існуючі прилади терагерцового діапазону, можна легко помітити суттєву різницю між детекторами і джерелами терагерцового випромінювання в доступності, різноманітності та ціні. Джерел терагерцового діапазону мало і вони занадто дорогі для широкого використання. Треба зауважити, що дійсно, існує багато матеріалів для антен, в яких терагерцовий сигнал збуджується фемтосекундним лазерним імпульсом оптичного діапазону. Однак, коли хтось думає використовувати джерела постійного струму, то виявляється, що існуючі пристрої або занадто великі за розміром, або дуже дорогі, або і те й інше. Наприклад, лазери на вільних електронах, синхротрони або молекулярні лазери. Отже, компактні твердотільні джерела неперервного випромінювання відіграють важливу роль у системах терагерцового діапазону, користуються великим попитом як для лабораторних випробувань, так і для комерційних цілей в багатьох областях.

Тут особливе місце займають досягнення в області створення високошвидкісних транзисторів з низьким рівнем шуму (HBT, DHBT і HEMT) з максимальною робочою частотою 0,3 ... 1 ТГц. Але вартість таких транзисторів залишається високою. Становлять особливий інтерес HEMT діоди з максимальною робочою частотою 279 ГГц, виготовлені за допомогою процесу хімічного осадження з парової фази, який може бути придатним для масового виробництва [1].

Поряд з прогресом в області технології виготовлення терагерцових транзисторів залишаються широко затребуваними традиційні активні елементи, такі як діоди Ганна, IMPATT діоди, резонансно-тунельні діоди і каскади помножувачів частоти. Всі ці пристрої на частотах вище 100 ГГц мають низку фізичних проблем, які обмежують робочу частоту зверху. Гранична частота резонансно-тунельних діодів складає 1,04 ТГц [2], в каскадах помножувачів частоти, наприклад на GaAs-діодах Шоттки, 2,7 ТГц [3], в діодах Ганна та IMPATT або TUNNETT діодах близько 0,3 ... 0,4 ТГц [4, 5].

Поміркуємо над діодами Ганна. На цей час InP-діод Ганна є найпотужнішим напівпровідниковим джерелом на частотах вище 290 ГГц [5]. Прогнози також вказують на те, що може вироблятися значна кількість НВЧ енергії, принаймні до 450 ГГц [6, 7]. В основі роботи діода Ганна лежить ефект міждолинного перенесу електронів. Перевагами таких приладів є висока потужність імпульсу, низький рівень шуму та широкий діапазон робочих частот. Їх гранична частота обмежена зверху цілою низкою фізичних проблем, таких як обмеженість часів переносу електронів з однієї долини зони провідності в іншу та часу «розігріву» електронів поблизу катодного контакту до енергії, яка необхідна для міждолинного переносу, обмеженість швидкості дрейфу електронів в напівпровіднику, збільшення ємності при зменшенні довжини приладу тощо.

На даний час для усунення негативного впливу деяких з перерахованих вище проблем використовуються різні катодні контакти, які створюють умови для швидкого збільшення енергії електронів. Такими контактами є зменшення рівня легування іонізованими домішками, зворотно зміщений гетероперехід і бар'єр Шоттки. Гранична частота таких діодів Ганна складає 100 ... 200 ГГц для GaAs і 200 ... 300 ГГц для InP [4 – 7]. Використання катодних контактів, таких як тунельний контакт [8, 9] і прямо зміщений гетероперехід [10], які поставляють в дрейфову область електрони з високим рівнем енергії, не мало значного успіху.

Другий підхід до вирішення цієї проблеми полягає в пошуку напівпровідникових матеріалів, які мають граничну частоту роботи більш ніж GaAs або InP. Такі матеріали включають InGaAs [11], GaInPAs і напівпровідникові нітриди.

Одним з маловідомих напрямків в області створення діодів Ганна є використання варізонних напівпровідникових сполук, завдяки яким можна в деякій мірі подолати необхідність нагрівання електронного газу біля катоду. Діоди Ганна на основі варізонних напівпровідників мають більш високі значення ефективності генерації та вихідної потужності [12, 13]. В якості причини такого збільшення вже давно розглядається інжекція гарячих електронів через гетероперехід в транзитний регіон [10, 14 – 16]. Однак, як було показано в роботах [17 – 19], енергія таких електронів в транзитній зоні діода швидко зменшується до енергії кристалічної решітки. Локальне зменшення енергетичної щільності між нееквівалентними долинами в катодному контакті виглядає більш імовірною причиною такого збільшення [12, 13]. Оптимальне значення енергетичної щільності між долинами в катодному контакті при температурі кристалічної решітки 300 К становить 0,1 ... 0,3 еВ. Наприклад, це відповідає  $Al_{1-x}Ga_xAs$  – GaAs діоду при  $x = 0,15$  ... 0,3. Найпоширенішою на сьогодні варізонною сполукою для діодів Ганна є AlGaAs – GaAs. Ідея використання варізонного GaInPAs у діодах Ганна [20] є цікавою та перспективною.

Третій спосіб збільшення граничної частоти пристроїв – це використання багаточастотних або нелінійних режимів коливань у напівпровідникових пристроях для отримання вихідної потужності на вищих гармоніках. Джерелами коливань, що супроводжуються базовими типами коливань в діоді Ганна,

є генерація електронно-діркових пар у статичному або рухомому домені [21 – 23], генерація електронно-діркових пар, викликаних зовнішнім оптичним імпульсом [24], іонізація нейтральних домішок [25], наслідки, що пов'язані з виникненням і дрейфом хвиль заряду в неоднорідних середовищах [12], нелінійна взаємодія з зовнішніми електродинамічними системами [24, 26] тощо.

У статті ми представили результати порівняльного аналізу спектрів автоколивань, що виникають в діодах Ганна на основі варізонного GaInPAs.

## ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ТА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ

### Структура пристрою

Діоди з профілем легування  $n^+ - n - n^+$  на основі варізонного  $\text{Ga}_{1-x(z)}\text{In}_{x(z)}\text{P}_{y(z)}\text{As}_{1-y(z)}$  моделюються з наступними параметрами: довжина області дрейфу (активна область) 1,0 мкм; концентрація іонізованих донорів в ній  $9 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ; довжини катода і анода становили 0,4 мкм; концентрація іонізованих донорів в катоді і аноді  $4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Діаграма зони провідності, розподіли домішок і бінарних фракцій в приладі показані на Рис. 1. Використовується  $\Gamma$ -L-X - рівнева модель для  $\text{Ga}_{1-x(z)}\text{In}_{x(z)}\text{P}_{y(z)}\text{As}_{1-y(z)}$ .

Енергетичні мінімуми  $i$ -долини в залежності від  $x$  та  $y$  задаються поверхнями:

$$E_{ixy} = E_{ix1}y + E_{ix0}(1-y) - \frac{0,3y(1-y)}{\sqrt{(E_{ix0} + E_{ix1})/2}}, \quad (1)$$

де  $E_{ix0} = E_{i10}x + E_{i00}(1-x) - \frac{0,3x(1-x)}{\sqrt{(E_{i00} + E_{i10})/2}}$  і  $E_{ix1} = E_{i01}x + E_{i11}(1-x) - \frac{0,3x(1-x)}{\sqrt{(E_{i01} + E_{i11})/2}}$ .

Енергетичний зазор між  $\Gamma$  і X долинами описується виразом  $\Delta_{\Gamma X}(x, y) = E_X(x, y) - E_{\Gamma}(x, y)$ . Енергетичний зазор між  $\Gamma$  і L долинами –  $\Delta_{\Gamma L}(x, y) = E_L(x, y) - E_{\Gamma}(x, y)$ .

В зоні провідності  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$  при  $x = 0 \dots 0,38$  і в  $\text{GaP}_y\text{As}_{1-y}$  при  $y = 0,48 \dots 1,0$  найнижчим за енергією є мінімум X-долини, тобто в  $\text{Ga}_{0,62}\text{In}_{0,38}\text{P}$  і в  $\text{GaP}_{0,48}\text{As}_{0,52}$   $\Delta_{\Gamma X} \approx 0$ . В цих випадках ефект міждолинного переносу електронів не приводить до від'ємної диференційної провідності в напівпровіднику і визначає границі складових компонент сполуки.

Розподіли фракційних часток In та P в  $\text{Ga}_{1-x(z)}\text{In}_{x(z)}\text{P}_{y(z)}\text{As}_{1-y(z)}$  задаються S-залежностями:

$$x(z) = (x_{-\infty} - x_{+\infty}) \left[ 1 + \exp\left(\frac{4(z - z_0)}{l_g}\right) \right]^{-1} + x_{+\infty} \quad \text{і} \quad y(z) = (y_{-\infty} - y_{+\infty}) \left[ 1 + \exp\left(\frac{4(z - z_0)}{l_g}\right) \right]^{-1} + y_{+\infty}, \quad (2)$$

де  $x_{-\infty}$  і  $x_{+\infty}$  – фракційні частки In в катоді ( $z \rightarrow -\infty$ ) і аноді ( $z \rightarrow +\infty$ ),  $y_{-\infty}$  та  $y_{+\infty}$  фракційні частки P в катоді ( $z \rightarrow -\infty$ ) і аноді ( $z \rightarrow +\infty$ ),  $l_g$  – довжина шару між напівпровідниками, в яких фракційні частки In та P не змінюються з координатою (довжина шару варізонного напівпровідника),  $z$  – координата,  $z_0$  – координата центру шару варізонного напівпровідника.

Зміна складу напівпровідника уздовж транзитної області відбувається таким чином, щоб енергетичний зазор між мінімумом  $\Gamma$ -долини і мінімумом найближчою до неї бічної долини був зростаючою функцією координати [12, 13]. У цьому дослідженні довжина перехідного шару  $l_g = 0,87$  мкм практично збігається з довжиною активної області  $l_a = 1,0$  мкм і центральна точка варізонного напівпровідника  $z_0 = 0,86$  мкм. Саме при таких параметрах очікується найбільша ефективність приладу [12]. Діод має поперечний переріз  $S = 20 \times 20 \text{ мкм}^2$ . Температура кристалевої решітки  $T_0$  вважалася постійною і дорівнювала 300 К. Нашою метою було вивчення особливостей роботи діодів на основі різних варізонних напівпровідників і отримання їх спектрів потужності випромінювання для різних напруг протягом 1000 пс.

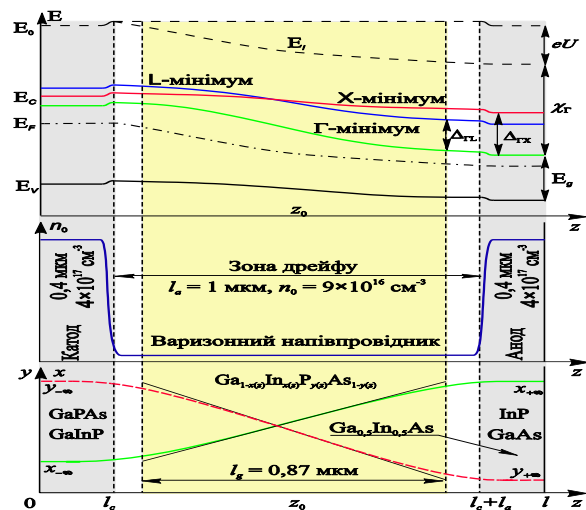


Рис.1. Схеми енергетичної діаграми, рівня легування і розподілу  $x$  та  $y$  фракцій в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}_y\text{As}_{1-y}$  варізонних діодах Ганна.

### Математична модель пристрою

Фактичне дослідження було проведено за допомогою трирівневої Г-Л-Х моделі міждолинного переносу електронів у варізонних напівпровідниках на основі розв'язання рівняння Больцмана для випадку зміщеного розподілу електронів Максвелла. Ця модель являє собою систему рівнянь, що складається з рівнянь безперервності (3), струму (4) і балансу енергії (5) для кожної з трьох Г, Л і Х нееквівалентних долин зони провідності напівпровідника, а також рівняння Пуассона (6). Детально модель пояснена в статтях [12, 27].

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\frac{\nabla \bar{j}_i}{e} + \frac{n_j}{\tau'_{nji}} + \frac{n_l}{\tau'_{nli}} - \frac{n_i}{\tau_{nij}} - \frac{n_i}{\tau_{nil}}; \quad (3)$$

$$\bar{j}_i = n_i \mu_i \nabla (\chi_i - \varphi) - \mu_i k_B [\nabla (n_i T_i) - 1.5 n_i T_i \nabla \ln(m_i)]; \quad (4)$$

$$\frac{3}{2} k_B \frac{\partial n_i T_i}{\partial t} = \frac{\bar{j}_i \nabla (\chi_i - \varphi)}{e} - \frac{5 k_B}{2e} \nabla (\bar{j}_i T_i) + \frac{3}{2} k_B \left( \frac{n_j T_j}{\tau'_{E,ji}} + \frac{n_l T_l}{\tau'_{E,li}} - \frac{n_i T_i}{\tau_{E,i}} \right); \quad (5)$$

$$\nabla (\varepsilon \vec{E}) = 4\pi e (n_i + n_j + n_l - n_0), \quad (6)$$

Рівняння записані для Г долини. В цих рівняннях індекси  $i, j$  і  $l$  позначають три нееквівалентні долини. Тут  $n, \mu, m, J$  і  $T$  позначено, відповідно, концентрацію, рухливість, ефективну масу, щільність струму і температуру електронів,  $\tau_{n,ij}, \tau_{E,ij}$  – час релаксації концентрації і енергії електронів при  $i$ - $j$  міждолинному розсіюванні,  $\tau_{E,i}$  – час релаксації енергії електронів в  $i$ -долині при урахуванні усіх основних механізмів розсіювання електронів [12, 27],  $\chi_i$  – це енергія, яка необхідна для перенесення електронів від мінімуму енергії  $i$ -долини на локального рівня вакууму;  $E$  – напруженість електричного поля,  $n_0$  – концентрація іонізованих донорів,  $\varepsilon$  – діелектрична проникність,  $e$  – заряд електрона,  $k_B$  – стала Больцмана,  $t$  – час. Припускаємо дію тільки зовнішнього електричного поля:  $\nabla \varphi = e \vec{E}$ .

Середня щільність струму в пристрої, визначаються як сума середніх струмів провідності електронів і струму зміщення:

$$\bar{j}(t) = \bar{j}_G(t) + \bar{j}_L(t) + \bar{j}_X(t) + \frac{\varepsilon}{4\pi} \frac{d\vec{E}}{dt}, \quad (7)$$

Система рівнянь (3) – (6) вирішується чисельним методом з використанням алгоритму Томаса для одномірного випадку. Всі процеси вивчаються тільки по  $z$  координаті. Прикладена постійна напруга  $U$  і параметри напівпровідників є вхідними даними. Вихідні дані представляють собою динамічні розподіли концентрації носіїв, їх енергії, щільності струму, напруженості електричного поля, залежності від часу середньої щільності струму, що протікає через діод і падіння напруги на діоді  $V(t) = \int_0^l E(z,t) dz$ . Ми

досліджували спектр середньої потужності автоколивань. Середня потужність  $k$  гармоніки  $P_k = 0.5 J_k V_k S \cos(\Delta \theta_k)$ , де  $J_k$  і  $V_k$  – амплітуди коливань щільності струму і падіння напруги на діоді  $k$  гармоніки;  $\Delta \theta_k$  – різниця фаз між коливаннями щільності струму і напругою,  $k = 1, 2, 3$  номер гармоніки. Середня потужність постійного струму  $P_0 = J_0 V_0$ .

### Результати досліджень та їх аналіз

Генерація неперервних автоколивань не реалізується в класичних  $n^+ - n - n^+$  структурах коротких діодах Ганна на основі GaAs і InP. Коли резонатор відсутній, в діоді в кращому випадку виникають згасаючі коливання струму. Ситуація змінюється, якщо в активній області приладу створити умови для швидкого збільшення кінетичної енергії електронів, яка необхідна для інтенсивного їх розсіювання в бічні долини. Описані умови можуть бути створені за рахунок зменшення рівня легування, використання бар'єру Шотткі або гетеропереходу поблизу катодного контакту. Коливання струму, що виникають в такому діоді, пов'язані з дрейфом доменів. Домени утворюються біля області, яка збіднена рухливими електронами в наслідку названих причин. У разі варізонного напівпровідника також відбувається дрейф доменів в діоді, але причина їх виникнення інша. У варізонному напівпровіднику виникнення домену відбуваються через зростаючу залежність енергетичної щільності між Г-долиною та найближчою за енергією до неї бічною долиною. Всі подробиці про виникнення і поширення хвиль просторового заряду у варізонних напівпровідниках описані в статті [12]. Автоколивання струму в діодах Ганна на основі варізонних напівпровідників значно залежать від просторового розподілу складу фракцій у потрійних або четверних напівпровідникових сполуках.

## GaPAs – GaAs і GaInP – GaAs діоди

Розглянемо процеси у варізонних діодах Ганна на основі GaInP – GaAs. В GaInP – GaAs приладах активна зона складається з варізонного сплаву  $Ga_{1-x(z)}In_{x(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$  і в GaPAs – GaAs з варізонного сплаву  $GaP_{y(z)}As_{1-y(z)}$ . Тобто, в GaInP – GaAs діодах фракційні складові сплаву  $Ga_{1-x(z)}In_{x(z)}P_{y(z)}As_{1-y(z)}$  змінюється уздовж активної області від GaInP в катоді до GaAs в аноді. Відповідно відбувається в GaPAs – GaAs діодах. Сьогодні GaPAs – GaAs діоди на відміну від AlGaAs – GaAs не використовуються. Причинами цього є встановлені уявлення про необхідність надати електронам в активній зоні високу кінетичну енергію через гетероперехід і більша неузгодженість постійних решіток в парі GaPAs і GaAs. Наші дослідження показують, що GaPAs – GaAs діоди не відрізняються від AlGaAs – GaAs як по фізиці процесів, так і по вихідним характеристикам [17].

Результати числових експериментів показують, що неперервні коливання струму в GaAs діоді не виникають (Рис 2, крива 1). Але, якщо збільшувати GaP фракцію в катоді і не змінювати склад напівпровідника в аноді, то процеси, що відбуваються в діоді, змінюються наступним чином.

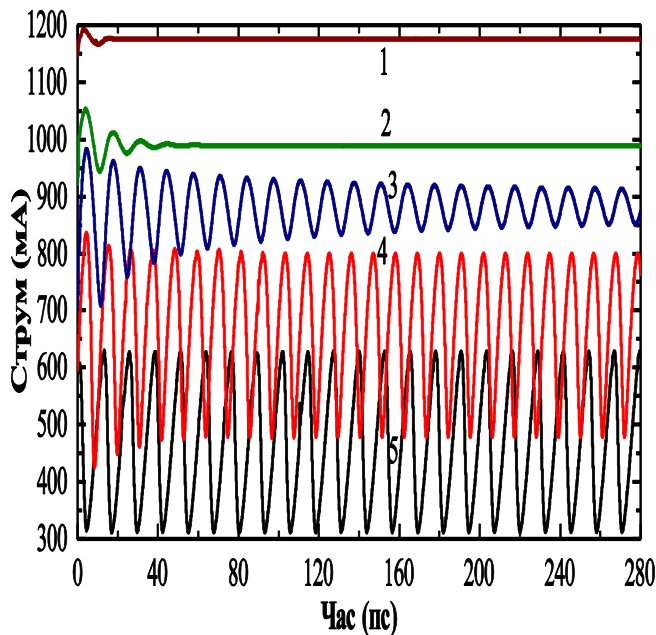


Рис.2. Коливання струму в  $GaP_yAs_{1-y} – GaAs$  діоді при  $y = 0$  (1),  $y = 0,1$  (2) та  $y = 0,2$  (3) при напрузі  $U = 0,8$  В,  $y = 0,3$  при  $U = 1,0$  В (4) та  $y = 0,4$  при  $U = 1,8$  В (5).

Це ще більш підвищує концентрацію електронів в бічних долинах і зменшує їх концентрацію в Г-долині. А це призводить до падіння рухливості електронів. Виникає додатний зворотний зв'язок, завдяки якому накопичується об'ємний заряд в шарі варізонного напівпровідника біля катоду. При достатній зовнішній напрузі цей об'ємний заряд починає просуватися вздовж транзитної області у бік анодного контакту. Тобто на шарі варізонного напівпровідника формується об'ємний рухливий заряд. Область, де формується нестабільність заряду, дислокується у варізонному шарі в області між центром транзитної області і катодом. Постійний струм в діоді при збільшенні GaP частки зменшується (Рис.2, криві 1 – 5). Довжина «мертвої» зони в таких приладах є меншою, ніж в однотипних GaAs діодах. Коливання струму в  $GaP_yAs_{1-y} – GaAs$  діодах є згасаючими, якщо  $y = 0 \dots 0,2$  (Рис. 2, криві 1 – 3). Формою нестабільності заряду, яка з'являється та розповсюджується в таких діодах є збагачений (аккумуляційний) шар. Характерною особливістю такої нестійкості є відсутність збідненого носіями заряду переднього краю. Але, якщо  $y = 0,23 \dots 0,44$ , то коливання струму у варізонних  $GaP_yAs_{1-y} – GaAs$  діодах стають незгасаючими (Рис. 2, криві 4 – 5). Формою нестабільності заряду, яка з'являється в таких діодах, є домен. В домені передній край збіднений носіями заряду. Слід зазначити, що, коли  $y = 0,20 \dots 0,23$  перетворення шарів на домени відбувається поступово. При дуже значному градієнті енергетичної щільності в діоді з'являється статичний домен. В  $GaP_yAs_{1-y} – GaAs$  діоді статичний домен з'являється, якщо  $y > 0$ .

Для будь-якої частки  $y$  в  $GaP_yAs_{1-y} – GaAs$  діодах при збільшенні прикладеної до них напруги частота коливань струму зростає, а потужність коливань має максимум при деякій оптимальній напрузі. Оптимальна напруга зростає при збільшенні частки  $y$  в  $GaP_yAs_{1-y} – GaAs$ . Наприклад, при  $y = 0 \dots 0,4$  оптимальне напруга знаходиться поблизу 0,8 В, а при  $y = 0,40 \dots 0,42$  становить 2,0 В.

Збільшення GaP частки викликає зменшення енергетичної щільності між Г-долиною і L або X долинами в GaPAs. Якщо частка GaP збільшується локально поблизу катодного контакту, то зростає градієнт енергетичної щільності між долинами вздовж транзитної області. Виникає як неоднорідність концентрації електронів в бокових долинах у зв'язку з неоднорідністю енергетичної щільності, так і неоднорідність рухливості електронів. Поблизу катода концентрація електронів в бокових долинах стає великою, а в центрі транзитної області остається малою. Рухливість електронів навпаки. У катодного контакту мала, а в центрі транзитної зони велика. Локальне зменшення рухливості електронів біля катоду призводить до накопичення електронів в цій області і до росту напруженості електричного поля. Збільшення напруженості електричного поля, в свою чергу, стимулює збільшення кінетичної енергії електронів та їх розсіювання з Г-долини в бічні долини.

Нами отримані залежності середньої потужності і частоти коливань, які виникають в  $\text{GaP}_y\text{As}_{1-y} - \text{GaAs}$  діодах в залежності від значення частки  $y$ . Така залежність при оптимальній прикладеній до діода напрузі показана на вставці Рис. 3а.

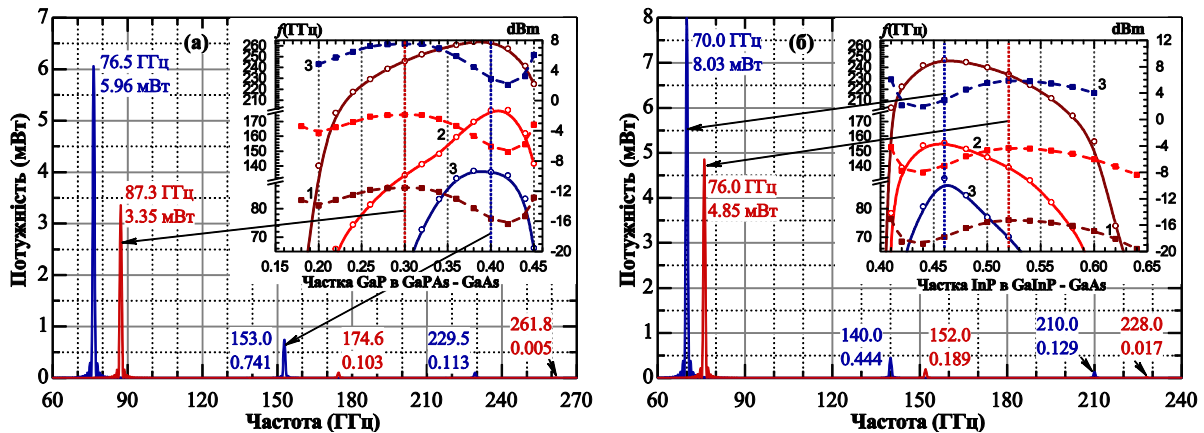


Рис.3. Спектр потужності коливань в діодах на основі варізонних  $\text{GaP}_{0.30}\text{As}_{0.70} - \text{GaAs}$  при  $U = 1,0 \text{ В}$  і  $\text{GaP}_{0.40}\text{As}_{0.60} - \text{GaAs}$  при  $U = 1,8 \text{ В}$  (а),  $\text{Ga}_{0.54}\text{In}_{0.46}\text{P} - \text{GaAs}$  при  $U = 2,2 \text{ В}$  і  $\text{Ga}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{P} - \text{GaAs}$  при  $U = 1,4 \text{ В}$  (б). На вставці показана залежність частоти (пунктирні лінії) і середньої потужності (суцільні лінії) коливань для фундаментальної (1), другої (2) і третьої (3) гармоніки від частки GaP в  $\text{GaPAs} - \text{GaAs}$  (а) і InP в  $\text{GaInP} - \text{GaAs}$  (б) діоді.

Потужність коливань у варізонному  $\text{GaP}_y\text{As}_{1-y} - \text{GaAs}$  діоді максимальна при  $y = 0,38 \dots 0,4$ . Спектр потужності коливань у варізонному  $\text{GaP}_{0.40}\text{As}_{0.60} - \text{GaAs}$  діоді показана на Рис. 3а. Потужність фундаментальної моди таких коливань складає 5,96 мВт на частоті 76,5 ГГц, а потужність коливань третьої гармоніки 0,113 мВт на частоті 229,5 ГГц. Частота коливань струму у варізонних  $\text{GaP}_y\text{As}_{1-y} - \text{GaAs}$  діодах максимальна при  $y = 0,3$ . Спектр потужності коливань у варізонному  $\text{GaP}_{0.30}\text{As}_{0.70} - \text{GaAs}$  діоді також показано на Рис. 3а. Потужність фундаментальної моди таких коливань складає 3,35 мВт на частоті 87,3 ГГц, а потужність коливань третьої гармоніки 0,005 мВт на частоті 261,8 ГГц.

Тепер розглянемо процеси у варізонних  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{GaAs}$  діодах Ганна, які з точки зору їх властивостей і вихідних характеристик аналогічні  $\text{GaP}_y\text{As}_{1-y} - \text{GaAs}$  діодам. Зниження InP частки в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$  призводить до зменшення рухливості електронів і зменшення енергетичної щільності між  $\Gamma$  долиною і L та X бічними долинами в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$ . Тому зниження InP частки в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$  катоді  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{GaAs}$  приладу призводить до появи градієнтів енергетичної щільності і рухливості електронів в транзитній області. Це стає причиною появи рухливого об'ємного заряду і незгасаючих коливань струму при достатній зовнішній напрузі (Рис. 4). На Рис. 4 можна бачити, що зменшення InP частки призводить до падіння постійного струму в діоді. Якщо  $x = 0,62 \dots 1,0$ , у варізонних  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{GaAs}$  діодах виникають згасаючі автоколивання (Рис. 4, крива 1). Форма нестабільності заряду, яка з'являється в таких діодах, є збагачений шар. Зменшення частки  $x$  у варізонному  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{GaAs}$  діоді призводить діод в режим з дрейфом доменів і появи незгасаючих автоколивань струму (Рис. 4, криві 2 – 4). Потужність і частота коливань струму в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{GaAs}$  діодах залежать від складу  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$  і прикладеної до діода напруги. Ці залежності подібні залежностям у  $\text{GaP}_y\text{As}_{1-y} - \text{GaAs}$  діодах. А саме, частота коливань майже лінійно зростає зі збільшенням напруги, а потужність має максимум.

Оптимальна напруга зростає при зменшенні  $x$ . Наприклад, при  $x = 0,64$  оптимальна напруга складає 1,0 В, а при  $x = 0,41 \dots 0,44$  – 2,8 В. Слід зауважити, що оптимальна напруга  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{GaAs}$  діодів в 1,2 ... 1.4 рази більша, ніж в аналогічних  $\text{GaP}_y\text{As}_{1-y} - \text{GaAs}$  діодах.

Залежності середньої потужності і частоти коливань від частки  $x$  у  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{GaAs}$  діодах при оптимальній напрузі показано на вставці Рис. 3б. Потужність коливань в варізонному  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{GaAs}$  діоді максимальна при  $x = 0,46$ . Спектр потужності  $\text{Ga}_{0.54}\text{In}_{0.46}\text{P} - \text{GaAs}$  діода при  $U = 2,2 \text{ В}$  показано на Рис. 3б.

Потужність основної моди таких коливань складає 8,03 мВт на частоті 70,0 ГГц, а потужність третьої гармоніки 0,129 мВт на частоті 210,0 ГГц. При оптимальній напрузі потужність фундаментальної моди коливань у варізонному  $\text{Ga}_{0.54}\text{In}_{0.46}\text{P} - \text{GaAs}$  діоді виявилась в 1,34 рази більшою, ніж в  $\text{GaP}_{0.40}\text{As}_{0.60} - \text{GaAs}$  діоді.

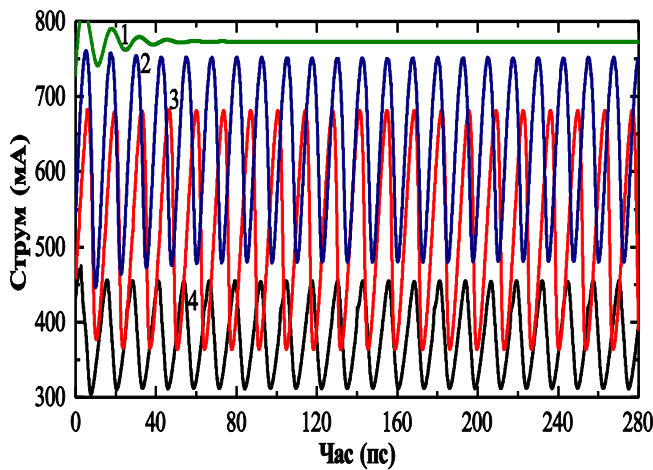


Рис.4. Коливання струму в  $Ga_{1-x}In_xP - GaAs$  діоді при  $x = 0,7$  і напрузі  $U = 1,0$  В (1),  $x = 0,52$  і  $U = 1,4$  В (2),  $x = 0,46$  і  $U = 2,2$  В (3) та  $x = 0,42$  і  $U = 2,8$  В (4).

Частота коливань у варізонному  $Ga_{1-x}In_xP - GaAs$  діоді максимальна, коли  $x = 0,52$ . Спектр потужності варізонного  $Ga_{0,48}In_{0,52}P - GaAs$  діода також показано на Рис. 36. Потужність основної моди таких коливань становить 4,85 мВт на частоті 76 ГГц. Слід зазначити, що варізонні  $GaP_yAs_{1-y} - GaAs$  і  $Ga_{1-x}In_xP - GaAs$  діоди можуть генерувати неперервні коливання, коли концентрація електронів в транзитній області нижча. Нижній край рівня легування пролітної області, при якій ще виникають неперервні коливання, знаходиться поблизу  $1,7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  якщо  $y = 0,25 \dots 0,40$  і  $x = 0,45 \dots 0,55$  при рівню легування катода  $4 \times 10^{16} \dots 10 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Якщо рівень легування катода вище, ніж  $10 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , то діод генерує згасаючі коливання струму. В цьому випадку для забезпечення неперервності коливань необхідно збільшувати концентрацію електронів в активній області

### GaPAs – InP і GaInP – InP діоди

Розглянемо процеси у варізонних діодах Ганна на основі InP. Транзитна область у GaInP – InP діоді складається із варізонного сплаву  $Ga_{1-x(z)}In_{x(z)}P$  і у GaPAs – InP діоді із варізонного  $GaP_{y(z)}As_{1-y(z)}$ . Такі діоди аналогічні з точки зору їх властивостей і вихідних характеристик діодам з варізонним сплавом на основі GaAs, які розглянуті в попередньому розділі. Механізм поліпшення умов виникнення коливань струму в порівнянні з діодами на основі однорідних за складом напівпровідників, таких як GaAs або InP залишається таким же. Збільшення частки GaP в GaPAs і GaInP зменшує в цих напівпровідниках рухливість електронів і енергетичну щільність між Г-долиною та L або X долинами. Відповідно, збільшення частки GaP в напівпровіднику, який розміщено в катодному контакті призводить до просторової неоднорідності названих величин. Наслідком чого є виникнення незгасаючих коливань струму в діоді. Перш за все збільшення частки GaP поблизу катода призводить до зменшення постійного струму в діоді так само, як в діодах з варізонним сплавом на основі GaAs (Рис. 5).

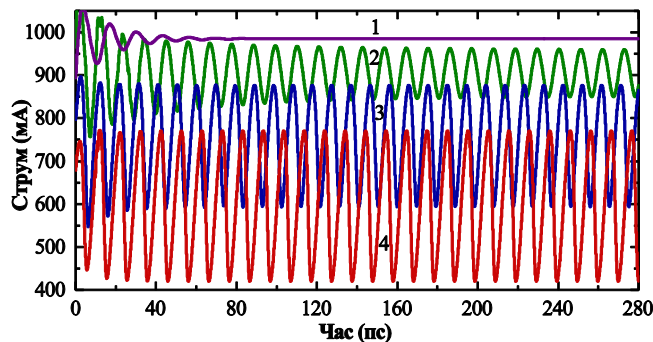


Рис.5. Коливання струму в  $GaP_yAs_{1-y} - InP$  діоді при  $y = 0,05$  і напрузі  $U = 0,8$  В (1),  $y = 0,16$  і  $U = 1,1$  В (2),  $y = 0,36$  і  $U = 1,5$  В (3) та  $y = 0,43$  і  $U = 2,0$  В (4).

Згасаючі коливання у  $GaP_yAs_{1-y} - InP$  діоді виникають, коли у фракція в  $GaP_yAs_{1-y}$  становить  $0 \dots 0,10$  (Рис. 5, крива 1). Збільшення у частки в  $GaP_yAs_{1-y}$  до  $0,15 \dots 0,20$  призводить до режиму з дрейфуючим доменом і неперервними коливаннями струму (Рис.5, криві 2 – 4). Режим з дрейфуючим доменом в  $GaP_yAs_{1-y} - InP$  діоді реалізується при меншій частки GaP, ніж в  $GaP_yAs_{1-y} - GaAs$  діоді. Статичний домен у  $GaP_yAs_{1-y} - InP$  діоді утворюється, коли  $y > 0,46$ .

Для будь-якої частки у у  $GaP_yAs_{1-y} - InP$  діоді частота коливань струму збільшується при рості прикладеної напрузі.

Оптимальна напруга по потужності зростає при рості частки у в  $GaP_yAs_{1-y} - InP$  напівпровіднику. Наприклад, при  $y = 0,14 \dots 0,20$ , оптимальна напруга приблизно складає 1,1 В, а при  $y = 0,45 - 2,1$  В.

Залежності середньої потужності і частоти коливань від частки у у  $GaP_yAs_{1-y} - InP$  діоді при оптимальній напрузі показані на вставці Рис. 6а. Максимальна потужність такого діоду досягається при  $y = 0,42 \dots 0,44$ . Спектр потужності коливань у  $GaP_{0,43}As_{0,57} - InP$  діоді при  $U = 2,0$  В показано на Рис. 6а.



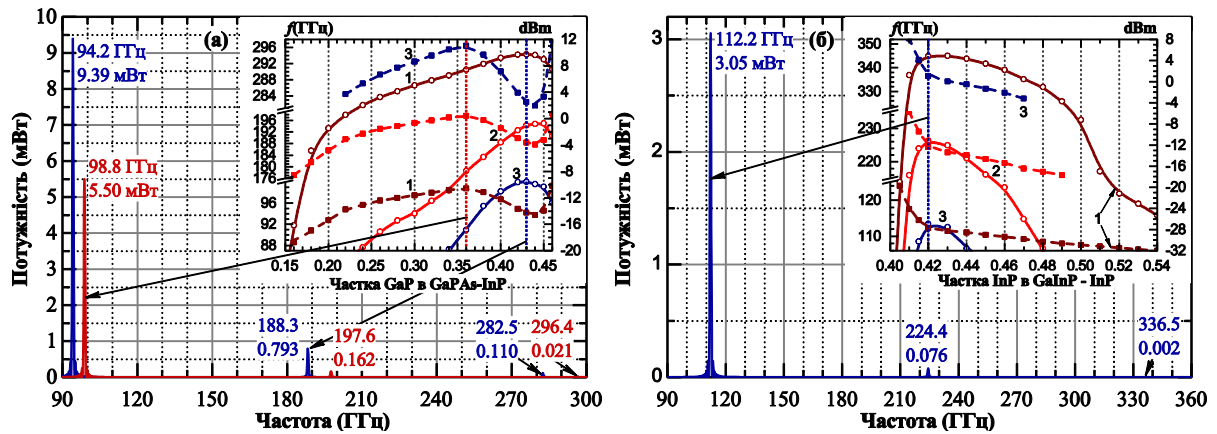


Рис.6. Спектр потужності коливань в  $\text{GaP}_{0,36}\text{As}_{0,64} - \text{InP}$  при  $U = 1,5$  і  $\text{GaP}_{0,43}\text{As}_{0,57} - \text{InP}$  при  $U = 2,0$  В (а) і  $\text{Ga}_{0,58}\text{In}_{0,42}\text{P} - \text{InP}$  при  $U = 1,25$  В (б). На вставці показана залежність частоти (пунктирні лінії) і середньої потужності (суцільні лінії) коливань для фундаментальної (1), другої (2) і третьої (3) гармоніки від частки GaP в  $\text{GaPAs} - \text{InP}$  (а) та InP в  $\text{GaInP} - \text{InP}$  (б).

Потужність основної моди таких коливань складає 9,39 мВт на частоті 94,2 ГГц, а потужність третьої гармоніки – 0,110 мВт на частоті 282,5 ГГц. Потужності і частоти коливань основної моди і вищих гармонік у варізонному  $\text{GaP}_{0,43}\text{As}_{0,57} - \text{InP}$  діоді більші, ніж в  $\text{GaP}_{0,40}\text{As}_{0,60} - \text{GaAs}$  і  $\text{Ga}_{0,54}\text{In}_{0,46}\text{P} - \text{GaAs}$ .

Частота коливань струму у  $\text{GaP}_y\text{As}_{1-y} - \text{InP}$  діоді максимальна, коли  $y = 0,36$ . Спектр потужності  $\text{GaP}_{0,36}\text{As}_{0,64} - \text{InP}$  діода також показано на Рис. 6а. Потужність основної моди таких коливань складає 5,50 мВт на частоті 98,8 ГГц, а потужність третьої гармоніки – 0,021 мВт на частоті 296,4 ГГц. Коливання струму у  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{InP}$  діоді показані на Рис. 7. Такий діод має неперервні коливання для вузького інтервалу частки InP в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$ . Режим з дрейфом домену і неперервні автоколивання реалізуються, коли частка  $x$  в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$  складає 0,41 ... 0,50 (Рис. 7, криві 2 – 4). Якщо частка  $x$  більше, ніж 0,52 або менше, ніж 0,41, то коливання струму у діоді загасають (Рис. 7, криві 1 і 5).

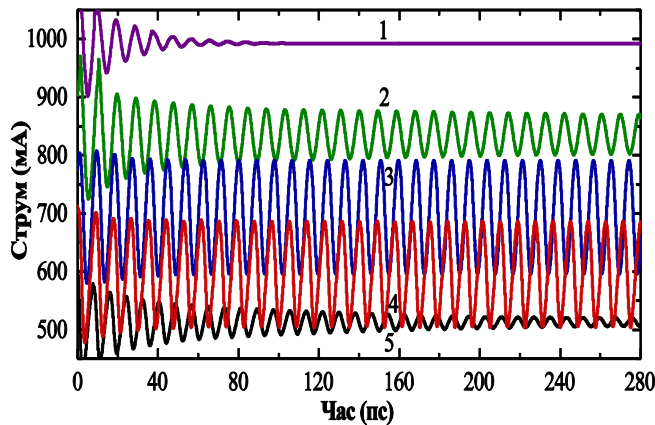


Рис.7. Коливання струму в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{InP}$  діоді при  $x = 0,60$  (1) і  $x = 0,50$  (2) та прикладеною напругою  $U = 0,9$  В,  $x = 0,44$  і  $U = 1,1$  В (3),  $x = 0,42$  і  $U = 1,25$  В (4) та  $x = 0,405$  і  $U = 1,4$  В (5).

Якщо частка  $x$  в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{InP}$  менша, ніж 0,42, то частота коливань зростає, але потужність коливань різко падає до нуля (вставка Рис. 6б і Рис.7, криві 4 і 5). Перевага  $\text{Ga}_{0,58}\text{In}_{0,42}\text{P} - \text{InP}$  діода над раніше розглянутими варіантами полягає в досягненні максимальної частоти, яка для основної моди складає 112,2 ГГц.

Також треба відмітити, що варізонні діоди Ганна на основі InP можуть генерувати неперервні коливання, якщо рівень легування транзитної зони є вищим, ніж  $1,7 \times 10^{16} \dots 2,0 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Для цієї концентрації електронів в транзитній зоні рівень легування катода повинен бути від  $4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  до  $10 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Потужність коливань у  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{InP}$  діоді досягає свого максимуму при  $x = 0,42 \dots 0,43$  (вставка Рис. 6б). Оптимальна напруга складає 1,25 В. Це приблизно в 2 рази менше, ніж в попередніх варіантах діода. Якщо частка  $x > 0,48$ , то оптимальна напруга, як і в раніше розглянутих діодах, становить 0,9 В. Потужність коливань у  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{InP}$  діоді в 2 ... 3 рази менша, ніж у раніше розглянутих діодах. Спектр потужності коливань у  $\text{Ga}_{0,58}\text{In}_{0,42}\text{P} - \text{InP}$  діоді при прикладеної напрузі 1,25 В, показано на Рис. 6б. Потужність основної моди таких коливань складає 3,05 мВт на частоті 112,2 ГГц, а потужність третьої гармоніки – 0,002 мВт на частоті 344,2 ГГц. Відмінною особливістю  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P} - \text{InP}$  діода є відсутність оптимальної частки InP для отримання коливань струму з найвищою частотою.

### GaPAs – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As і GaInP – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діоди

Розглянемо процеси у варізонних діодах Ганна на основі Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As. В GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As і Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діодах, активна зона складається з варізованого сплаву Ga<sub>1-x(z)</sub>In<sub>x(z)</sub>P<sub>y(z)</sub>As<sub>1-y(z)</sub>. Ефект впливу GaPAs і GaInP сполук в катоді на процеси у варізонних діодах Ганна на основі Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As схожий на його вплив у варізонних діодах Ганна на основі GaAs та InP.

Режим з дрейфом домену і неперервні коливання струму у варізонних діодах на основі Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As відбувається тоді, коли частка у в GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> дорівнює 0,20 ... 0,46 (Рис. 8, криві 2 – 4) і частка х в Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P становить 0,40 ... 0,64 (Рис. 9, криві 3 – 4). Згасаючі коливання виникають у варізонних діодах на основі Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As, коли частка у в GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> і частка х в Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P приймають всі інші значення.

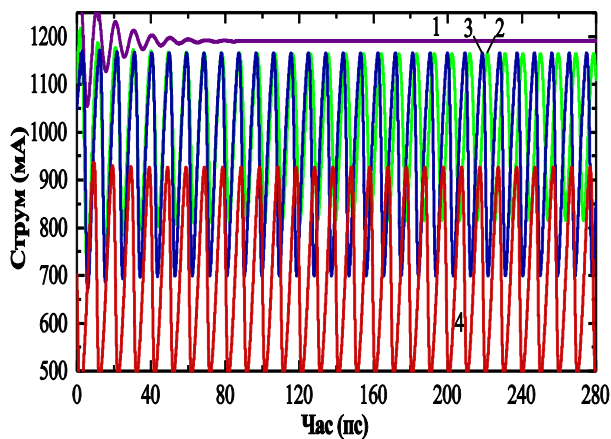


Рис.8. Коливання струму у GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діоді при  $y = 0,10$  і  $U = 1,0$  В (1),  $y = 0,22$  і  $U = 1,35$  В (2),  $y = 0,32$  і  $U = 1,8$  В (3) та  $y = 0,44$  при  $U = 2,8$  В (4).

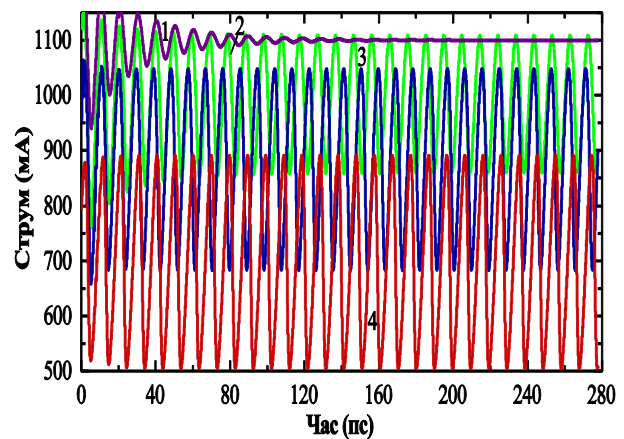


Рис.9. Коливання струму в Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P–Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діоді при  $x = 0,72$  і  $U = 1,5$  В (1),  $x = 0,62$  і  $U = 1,5$  В (2),  $x = 0,52$  і  $U = 1,8$  В (3) та  $x = 0,42$  і  $U = 2,9$  В (4).

Частота коливань струму у таких варізонних діодах збільшується для будь-яких  $y$  і  $x$  в GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> і Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P при збільшенні прикладеної напруги. Оптимальна напруга за потужністю збільшується при рості фракційної частки GaP в GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> і Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P. Наприклад, оптимальна напруга для GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діода при  $y = 0,12$  дорівнює 0,95 В, а при  $y = 0,44$  – 2,8 В. Оптимальна напруга для Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діода при  $x = 0,6$  ... 0,7 складає 1,5 В, а при  $x = 0,42$  – 2,9 В. Залежності частоти і потужності коливань при оптимальній напрузі від частки фракцій  $y$  і  $x$  в GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> і Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P представлені на вставках Рис. 10а і 10б.

Потужність коливань у варізонному GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діоді максимальна, коли частка  $y = 0,44$  ... 0,45 (вставка Рис. 10а). Спектр потужності GaP<sub>0,44</sub>As<sub>0,56</sub> – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діода представлена на Рис. 10а. Потужність основної моди таких коливань 19,11 мВт на частоті 95,1 ГГц і потужність третьої гармоніки 0,288 мВт на частоті 285,3 ГГц.

Потужність коливань у варізонному Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діоді максимальна, коли частка  $x = 0,41$  ... 0,42 (вставка Рис. 10б). Спектр потужності Ga<sub>0,58</sub>In<sub>0,42</sub>P – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діода представлена на Рис. 10б. Потужність основної моди таких коливань складає 19,36 мВт на частоті 98,1 ГГц і потужність третьої гармоніки 0,184 мВт на частоті 294,3 ГГц. Тобто, потужності таких Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діодів майже однакові.

Частота коливань струму в GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діоді максимальна, якщо  $y = 0,32$ . Спектр потужності GaP<sub>0,32</sub>As<sub>0,68</sub> – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діода показано на Рис. 10а. Потужність основної моди таких коливань складає 10,31 мВт на частоті 102,2 ГГц і потужність третьої гармоніки 0,054 мВт на частоті 306,6 ГГц. Частота коливань струму у Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діоді максимальна, якщо  $x = 0,52$ . Спектр потужності Ga<sub>0,48</sub>In<sub>0,52</sub>P – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діода показано на Рис. 10б. Потужність основної моди таких коливань складає 8,64 мВт на частоті 101,5 ГГц і потужність третьої гармоніки 0,018 мВт на частоті 304,5 ГГц.

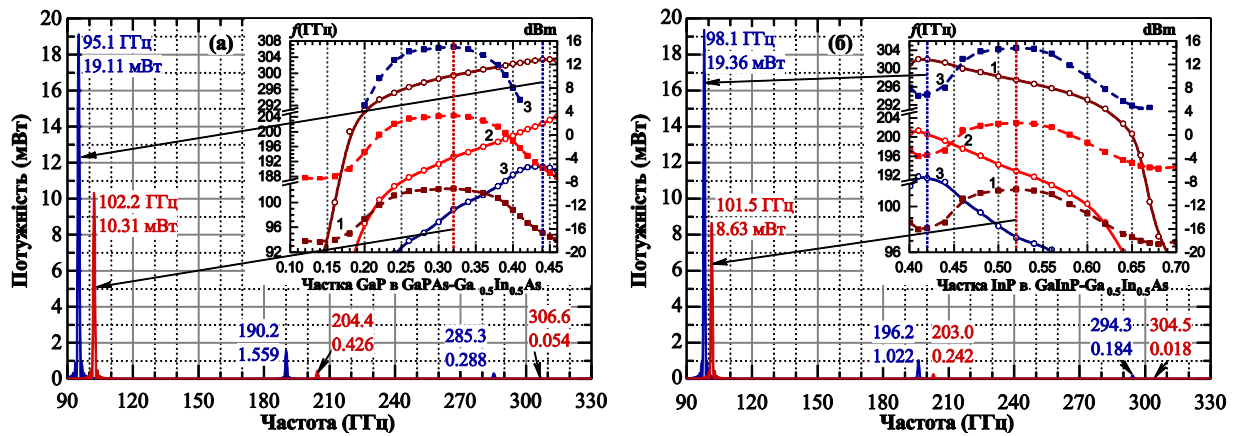


Рис.10. Спектр потужності коливань в діоді на основі варізонного  $\text{GaP}_{0,32}\text{As}_{0,68} - \text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  при  $U = 1,8$  В (а),  $\text{GaP}_{0,44}\text{As}_{0,56} - \text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  при  $U = 2,8$  В (а),  $\text{Ga}_{0,58}\text{In}_{0,42}\text{P} - \text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  при  $U = 2,9$  В (б) і  $\text{Ga}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{P} - \text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  при  $U = 1,8$  В (б). На вставці показана залежність частоти (пунктирні лінії) і середньої потужності (суцільні лінії) коливань для фундаментальної (1), другої (2) і третьої (3) гармоніки від частки GaP в  $\text{GaPAs} - \text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  (а) і InP в  $\text{GaInP} - \text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  (б).

Варізонні діоди Ганна на основі  $\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  можуть генерувати неперервні коливання, якщо рівень легування транзитної зони є вищим, ніж  $1,7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  для  $\text{GaP}_{0,44}\text{As}_{0,56} - \text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  діода і ніж  $2,0 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  для  $\text{Ga}_{0,58}\text{In}_{0,42}\text{P} - \text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  діода. Рівень легування катода повинен бути  $4 \dots 10 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

## ВИСНОВКИ

Таким чином, діоди Ганна на основі варізонного  $\text{GaInPAs}$  з довжиною транзитної зони  $1,0 \text{ мкм}$  і з концентрацією іонізованих донорів в ній  $9 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  можуть генерувати неперервні коливання струму. Проведений аналіз результатів моделювання варізонних діодів Ганна на основі  $\text{GaAs}$ ,  $\text{InP}$  і  $\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$  (матеріал анода), показує, що фізичні процеси, що відбуваються в таких діодах, ідентичні. Якщо збільшувати фракційну частку  $y$  в  $\text{GaP}_y\text{As}_{1-y}$  або зменшувати частку  $x$  в  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$ , то в напівпровіднику біля катодного контакту зменшуються рухливість електронів та енергетичний зазор між  $\Gamma$ - і бічними долинами зони провідності. Це стає причиною поліпшення умов для виникнення рухливого домену в шарі варізонного напівпровідника, наслідком чого є неперервні коливаннями струму. Основною умовою існування ефекту є така зміна складу напівпровідникової сполуки з координатою  $y(z)$  і  $x(z)$ , щоб уздовж активної зони приладу енергетична щільність між  $\Gamma$  долиною і найближчою до неї по енергії бічною долиною  $\Delta(z)$  збільшувалася. Частота коливань струму залежить від складу варізонного напівпровідника і прикладеної до приладу напруги і складає для основної гармоніки від 70 до 112 ГГц (Табл. 1).

Таблиця 1. Середня потужність гармонік для оптимальних складів  $\text{GaInPAs}$  варізонних діодів Ганна

Сполука	$\text{GaP}_y\text{As}_{1-y}$							$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{P}$						
	y	U	$f_1$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_0$	x	U	$f_1$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_0$
		В	ГГц	мВт					В	ГГц	мВт			
GaAs	0,3	1,0	87,3	3,3	0,10	0,005	58	0,5	1,4	76,	4,8	0,1	0,017	735
	0			5			4	2		0	5	9		
	0,4	1,8	76,5	5,9	0,74	0,113	82	0,4	2,2	70,	8,0	0,4	0,129	1006
	0			6			1	6		0	3	4		
InP	0,3	1,5	98,8	5,5	0,16	0,021	86	0,4	1,2		3,0	0,0	0,002	1096
	6			0			9	2	5	112	5	8		
	0,4	2,0	94,2	9,3	0,79	0,110	121							
	3			9			3							
$\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{As}$	0,3	1,8	102	10,	0,43	0,054	131	0,5	1,8	102	8,6	0,2	0,018	1309
	2			3			2	2		4	5			
	0,4	2,8	95,1	19,	1,56	0,288	206	0,4	2,9	98,	19,	1,0	0,184	2075
	4			1			7	2		1	4	2		

Склад напівпровідникової сполуки в катоді варізонного діода в значній мірі визначає процеси, що відбуваються в діоді і його вихідні характеристики. Склад напівпровідникової сполуки в аноді, на відміну від складу катода, не визначає процеси в діоді, але впливає на максимальну амплітуду і частоту коливання струму. Зміна складу напівпровідникової сполуки уздовж активної зони приладу дозволяє збільшити потужність коливань в діоді Ганна у порівнянні з однорідними напівпровідниками.

Максимальна потужність коливань у варізонних діодах Ганна на основі трьох різних напівпровідників GaAs, InP і Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As досягається приблизно при однаковому складі напівпровідникової сполуки в GaP<sub>y</sub>As<sub>1-y</sub> або Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P катоді, при якому енергетична щільність між долинами Δ на катоді дорівнює тепловій енергії електронів (Табл. 1). Потужність коливань в діодах Ганна з Ga<sub>1-x(z)</sub>In<sub>x(z)</sub>P<sub>y(z)</sub>As<sub>1-y(z)</sub> варізонною сполукою в активній зоні приладу виявилась більшою, ніж в діодах, у яких в активній зоні був варізонний Ga<sub>1-x(z)</sub>In<sub>x(z)</sub>P або GaP<sub>y(z)</sub>As<sub>1-y(z)</sub>. Варізонні діоди на основі Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As мають більшу потужність коливань, ніж варізонні діоди на основі GaAs або InP. Найвищу середню потужність коливань 19,36 мВт на частоті основної гармоніки в 102 ГГц має Ga<sub>0,58</sub>In<sub>0,42</sub>P – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діод (Табл. 1). Найвищу частоту основної гармоніки має Ga<sub>0,58</sub>In<sub>0,42</sub>P – InP діод. Такий діод має потужність 3,05 мВт на частоті 112,2 ГГц.

Колівання, що виникають в досліджених варізонних діодах, містять вищі гармоніки в терагерцевому діапазоні. Варізонний GaP<sub>0,32</sub>As<sub>0,68</sub> – Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As діод має потужність коливань третьої гармоніки 0,054 мВт на частоті 306,6 ГГц і Ga<sub>0,48</sub>In<sub>0,52</sub>P – InP діод – 0,002 мВт на частоті 336,5 ГГц (Табл. 1).

Діоди Ганна на основі варізонної сполуки GaInPAs можуть ефективно генерувати неперервні автоколивання при більш низькій концентрації електронів в активній зоні. Нижній край рівня легування знаходиться поблизу  $2,0 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , якщо рівень легування катода становить від  $4 \times 10^{16}$  до  $10 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Частота і потужність автоколивань у варізонних діодах Ганни залежать від складу напівпровідникової сполуки як в катоді, так і в аноді. Як правило, коливання більш високої потужності відбувається при більш низькій частоті. Відповідно, для практичного застосування виникає необхідність пошуку компромісу між очікуваною потужністю і частотою коливань.

Таким чином, наше дослідження показало можливість ефективної генерації коливань струму, в тому числі в терагерцевому діапазоні, за допомогою діода Ганна на основі варізонного напівпровідника Ga<sub>1-x(z)</sub>In<sub>x(z)</sub>P<sub>y(z)</sub>As<sub>1-y(z)</sub> на відміну від діодів на основі однорідних напівпровідників GaAs, InP і Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As. Результати дослідження можуть бути корисними при розробці високошвидкісних приладів і подальших наукових досліджень.

#### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

#### Authors' ORCID ID

I. P. Storozhenko  <https://orcid.org/0000-0002-7344-242X>

Yu. V. Arkusha  <https://orcid.org/0000-0002-6483-4341>

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Haiou Li et al, IEEE Electron Device Letters, **32**, 1224, (2011)
2. Safumi Suzuki et al, Applied Physics Letters, **97**, 242102, (2010)
3. V. G. Bozhkov, Radiophysics and Quantum Electronics, **6**, pp. 631, (2003)
4. R. J. Trew, IEEE Transactions on electron devices, **52**, 638, (2005)
5. H. Eisele et al, in Proceedings of the 15th International Symposium on Space Terahertz, pp. 336 – 400, (2004)
6. H. Eisele and R. Kamoua, IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, **52**, 2371, (2004)
7. S. Garcia et al, Journal of Applied Physics, **115**, 44510-1, (2014)
8. R. B. Beall et al, Electron Letters, **25**, 871, (1989)
9. O. V. Botsula, E. D. Prokhorov and I. P. Storozhenko, Telecommunications and Radio Engineering, **68**, 385, (2009)
10. N. R. Couch et al, Solid-State Electronics, **32**, 1685, (1989)
11. Ata Khalid et al, Journal of Applied Physics, **115**, 114502, (2014)
12. I. P. Storozhenko, Telecommunications and Engineering, **67**, 881 (2008)
13. John Kevin Twynam, Gunn diode having a graded aluminum gallium arsenide active layer and Gunn oscillators U.S. patent US6111265A, (2000)
14. A. Forster et al, Applied Physics A: Materials Science & Processing, **87**, 545, (2007)

15. M. A. Harry et al, Semiconductor Science and Technology, **14**, L19, (1999)
16. Mohamed Ismaeel et al, Semiconductor Science and Technology , **30**, 012001, (2015)
17. I. P. Storozhenko, Yu. V. Arkusha and E. D. Prokhorov, Telecommunications and Engineering, **67**, 739, (2008)
18. K. Tomizawa, Y. Awano and N. Hashizume, Electronics Letters, **18**, 1067, (1982)
19. M-R. Friscourt, P-A. Rolland and M. Pernisek, IEEE Electron Device Letters, **6**, 497, (1985)
20. I. P. Storozhenko and M. V. Kaydash, Journal of Nano- and Electronic Physics, **10**, 04014, (2018)
21. O. V. Botsula, K. H. Prykhodko and V. A. Zozulia, Journal of Nano- and Electronic Physics, **11**, 01006, (2019)
22. I. P. Storozhenko, Telecommunications and Radio Engineering, **75**, 1101, (2016)
23. V. Gruzinskis, E. Starikov and P. Shiktorov, Lithuanian Journal of Physics, **54**, 7, (2014)
24. Y. Shiau et al, Journal of the Physical Society of Japan **72**, 801, (2003)
25. O. V. Botsula and E. D. Prokhorov, Telecommunication and Radio Engineering, **5**, 90, (1998)
26. E. D. Prokhorov, O. V. Botsula and O. A. Klimenko, Telecommunications and Radio Engineering, **71**, 1045, (2012)
27. I. Storozhenko, M. Kaydash and O. Yaroshenko, in Proceedings of the Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, pp. 168 – 72, (2018)