

К.С. ЯЦУН

ВПЛИВ СТРУКТУРИ АКТИВНОЇ ОБЛАСТІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНОГО ДІОДУ НА КРИТИЧНІ ТОЧКИ ЙОГО ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Вступ та постановка завдання

Резонансно-тунельні діоди становлять великий інтерес для створення високошвидкісних приладів терагерцового діапазону та цифрових пристроїв з часом перемикачання близько 10^{-12} с і менше, за рахунок напівпровідникових нанорозмірних гетеро структур, які мають N-подібну вольт-амперну характеристику (ВАХ) з ділянкою негативного диференціального опору та малою інерційністю процесу тунелювання (тривалість процесу має порядок 10^{-13} с). Практичну реалізацію резонансно-тунельного діоду у 1963 році здійснив Л.В. Йогансен, який запропонував використовувати ефект резонансного тунелювання електронів у багатошарових тонкоплівкових структурах метал-діелектрик для створення електронних інтерферометрів, тонкоплівкових діодів, тріодів тощо [1].

Сучасна передова інформаційна технологія, в основному, пов'язана з електронним представленням та обробкою інформації недорогим, швидкісним, дуже компактним та високонадійним способом, саме тому пошуки та досягнення постійної мініатюризації та інтеграції електроніки є ключем до успіху комп'ютерної індустрії та комп'ютерних програм. Розширена мультимедійна інфраструктура та послуги в майбутньому вимагатимуть подальшого зменшення розміру мікросхеми. Щільність мікросхем, представлена технологією пам'яті, відповідає закону Мура і приблизно подвоюється кожні два роки протягом останніх трьох десятиліть. У той час як зменшення масштабу звичайних транзисторів має винятково швидку еволюцію, революційні концепції пристроїв активно досліджуються, особливо в двох суміжних областях, відомих як наноелектроніка та єдина електроніка [2].

Добре відомо, що коли розмір системи стає порівняним з довжиною хвилі електрона, домінуючими стають квантові ефекти. Це відбувається, коли транзистори зменшуються, а їх характерні розміри досягають нанометрового діапазону, що призводить до нових явищ і можливих нових пристроїв, заснованих на квантових тунельних механізмах. Щоб наноелектроніка стала реальністю, важливо, щоб нові пристрої та схеми були виготовлені з нанометровою точністю, а також необхідно вміти точно проектувати пристрої та схеми. Це призвело до максимізації дослідницьких зусиль і досягнень у трьох областях: нанофабрикація, квантове моделювання та інновації схем.

Постійні зусилля щодо квантового транспортного моделювання резонансно-тунельного діоду мотивуються необхідністю зрозуміти роботу пристрою та забезпечити первинний тест для розробки теоретичних інструментів для наноелектронних пристроїв. Не дивно, що це сильно відрізняється від традиційного моделювання пристроїв. Більше того, це дає цінні знання про квантові аспекти транспорту електронів у мезоскопічних системах. Досі залишається складним завданням точно передбачити вольт-амперні характеристики наноелектронних пристроїв, таких як РТД.

Серед численних наноелектронних пристроїв, запропонованих і продемонстрованих, РТД є, мабуть, найперспективнішим кандидатом для застосування цифрових схем завдяки своїй характеристиці негативного диференціального опору, простоті конструкції, відносній простоті виготовлення, високій швидкості, гнучкості та універсальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні два десятиліття дослідженню резонансних тунельних діодів приділяли велику увагу чимало як вітчизняних так і

зарубіжних вчених. Значних досягнень було досягнуто з точки зору фізики пристроїв РТД, моделювання, технології виготовлення, а також розробки схем і застосувань. РТД був широко вивчений, і було написано понад тисячу наукових робіт щодо різних аспектів цього пристрою. Проте, чи знайдуть РТД свій шлях до основної електроніки в майбутньому, залишається незрозумілим. Дослідження тривають і в деяких областях дуже активні.

Так, А.О. Семенов [3] розробив багаточастотний генератор квазіперіодичних коливань за методом Ван дер Поля на основі польової транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором.

О.В. Осадчук, В.С. Осадчук та Я.О. Осадчук [4] провели дослідження реактивних властивостей тунельно-резонансного діода. Авторами доведено, що резонансно-тунельні діоди можна використовувати як регульовані ємнісні та індуктивні елементи, причому їх добротність можна регулювати за рахунок від'ємного диференціального опору в інтервалах від 100 і більше.

У [5] автором здійснено розробку та продемонстровано застосування формалізованого підходу (на основі модифікованого методу перевалу та формалізму матриці розсіювання), для дослідження динамічних характеристик квантових систем.

Є. В. Малий [6] дослідив властивості дефектів структури у фосфіді галію та їхній вплив на параметри світло діодів. Автором зазначено, що для діодів, опромінених нейтронами, коефіцієнт пошкоджуваності носіїв струму є функцією температури вимірювання і проявляє тенденцію до зростання при охолодженні. Очевидно, що така поведінка k_n зумовлена температурною зміною положення рівня Фермі – зміщення E_F до середини E_g активізує вплив компенсації акцепторними центрами електропровідності п-області та донорними – р-області.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Huang, Keh-Ching [7], Ortega-Piwonka, Ignacio & Piro, Oreste & Figueiredo, José & Romeira, Bruno & Javaloyes, Julien [8], Halimatus Saadiah, Warsuzarina Mat Jubadi, Nabihah Ahmad and M. Hairol Jabbar [9], Khanna, Vinod [10], Jian Pind Sun, George J. Haddad, Pinaki Mazumder and Joel N. Schulman [11], Feiginov, Michael [12], Bhukya, Revathi & Hampika, Gorla & Guduri, Manisha [13], Awan, Jram Taj [14], Cimbri, Davide & Wasige, E. [15] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання модифікації активної галузі резонансно-тунельного діода залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Дослідити вплив структури активної області РТД на критичні точки його вольт-амперної характеристики (струми та напруги піку і долини ВАХ), та її температурну стабільність.

Викладення основного матеріалу дослідження. Основна конфігурація пристрою РТД являє собою структуру квантової ями з подвійним бар'єром нанометрових розмірів, що включає два контакти, як показано на рис. 1, де області I, II і VI, VII є сильно легованими контактами, виготовленими з напівпровідника з відносно малою забороненою зоною, наприклад, GaAs.

Ці шари містять емітер і колектор відповідно. Області III і V є квантовими бар'єрами, виготовленими з напівпровідника з відносно більшою забороненою зоною, наприклад, AlGaAs, і, зокрема, з позитивним зміщенням зони провідності відносно напівпровідника з меншою забороненою зоною. Область IV між двома бар'єрами – це квантова яма, знову зроблена з напівпровідника з меншою забороненою зоною. Іноді його також називають базою, незалежно від того, чи справді існує електричний контакт. Структура показана в термінах залежності енергії електронів від відстані під зміщенням, оскільки цікавить процес транспортування електронів, який, по суті, є рухом електронів у межах певної структури енергетичного діапазону під дією прикладених напруг зміщення. Оскільки характерні розміри структури квантової ями з подвійним бар'єром порівняні з довжинами хвиль електронів, хвильова природа електронів призводить до таких квантових явищ, як

інтерференція, тунелювання, квантування енергії тощо. В результаті в структурах квантової ями з подвійним бар'єром виникають резонансні явища тунелювання, які утворюють основу для роботи РТД.

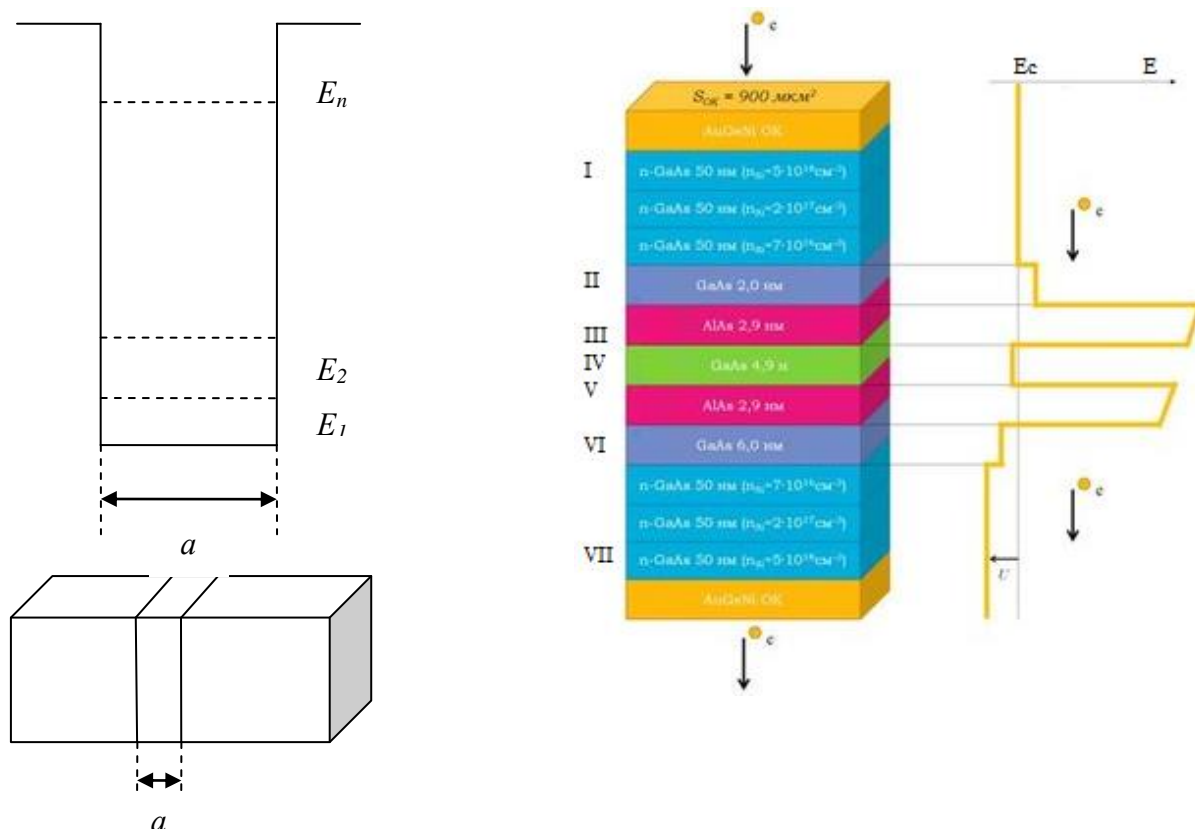


Рис. 1. Конфігурація резонансно-тунельного діода

Основна структура РТД, показана на рис. 1, може мати багато варіацій з точки зору профілю потенціалу (енергетичного), який визначається насамперед конкретною системою матеріалів, що використовуються.

Спектр електронів в області I, керований напругою зміщення, прикладеною до контактів РТД, що падає на структуру квантової ями з подвійним бар'єром, показану на рис. 1. Вважається, що електронний спектр розподілений по енергії відповідно до статистики Фермі–Дірака. Контакти зазвичай сильно леговані, щоб забезпечити низький омичний контакт і високу щільність струму. Використання розподілу Фермі передбачає, що електрони в області I перебувають у тепловій рівновазі через взаємодію між електронами та їх оточенням в області контакту I. Те саме припущення зроблено для області контакту VII.

Багаторазове відображення викликає деструктивні або конструктивні перешкоди залежно від довжини хвилі конкретного електрона. Для електронів із певною довжиною хвилі, що сприяє конструктивній інтерференції, ймовірність передачі, близька до одиниці, може бути знайдена при енергіях, що відповідають цим довжинам хвиль. Перший процес, це процес збігу резонансної енергії з основною. У процесі 2 електрон спочатку розсіюється на енергетичному рівні в шарі накопичення емітера, який є двовимірною потенційною ямою в області II. Потім він може поглинути фонон і послідовно тунелювати через резонансний рівень. Аналогічно, в процесі 3 електрон з початковою енергією може взаємодіяти з вібрацією решітки, випускаючи фонон, а потім тунелювати через E_0 . З іншого боку, електрони з достатньо високими енергіями (наприклад, E_4) можуть подолати бар'єри за допомогою термоелектронної емісії, на яку вказує процес 4. Падаючі електрони також мають кінцеву, але малу ймовірність тунелювання через нерезонансні діапазони енергій, що лежать між резонансами.

Фізичні процеси, які беруть участь у роботі РТД, насправді набагато складніші, ніж попередній простий опис, і особливо ускладнені взаємодією електрона з його середовищем. Перш за все, електрони обмінюються частинками та енергією з системою, яка застосовує напругу зміщення, що робить пристрій відкритим для зовнішнього середовища і дуже відрізняється від ізольованої квантової системи. Більше того, електрони в структурі РТД мають взаємодію з вібрацією решітки, домішками нерівності, шорсткості розділу і різномірності сплаву, а також взаємодії між собою. На хвильовій картині падаюча електронна хвиля розсіюється не тільки профілем потенціалу гетероструктури, але й потенціалами розсіювання, що виникають від цих розсіювачів. Ці процеси можуть суттєво вплинути на властивості пристрою, що робить точну фізичну модель РТД складною системою.

У рамках даного дослідження пропонується розглянути РТД з висотою бар'єра 0,3 – 0,4 еВ.

Щільність струму відповідає виразу:

$$j = \frac{e \times m^* \times k_B \times T}{2\pi^2 \times \hbar^3} \int_0^\infty D(E) \times \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_\Phi - E}{k_B T} \right) \right] dE - \frac{e \times m^* \times k_B \times T}{2\pi^2 \times \hbar^3} \int_0^\infty D(E) \times \ln \left[1 + \exp \left(\frac{E_\Phi - E - eV}{k_B T} \right) \right] dE, \quad (1)$$

де e – заряд;

m^* – ефективна маса;

k_B – коефіцієнт Больцмана;

T – температура;

$D(E)$ – коефіцієнт проходження;

E – енергія;

E_Φ – енергія рівня Фермі;

V – напруга, яка подається у структуру;

Енергію рівня Фермі отримаємо з рішення рівняння електронейтральності:

$$\frac{N_d}{1 + \beta^{-1} \exp \left(\frac{E_\Phi - E_d}{k_B T} \right)} = N_c F_{1/2} \left(\frac{E_\Phi}{k_B T} \right), \quad (2)$$

де β – фактор спінового виродження;

N_d – концентрація донорної домішки;

N_c – ефективна щільність станів у зоні провідності;

$F_{1/2}$ – інтеграл Фермі з індексом $1/2$;

E_d – енергія донорного рівня.

Залежність коефіцієнта проходження знаходимо шляхом вирішення рівняння Шредінгера у одно електронному наближенні без урахування ефектів розсіяння. Нехай двобар'єрна структура розміщена на відстані від 0 до L , тоді хвильова функція виходить з рівняння Шредінгера:

$$\psi'' + \frac{2m^*}{\hbar^2} (E - U(x))\psi = 0. \quad (3)$$

Зовнішні функції задаються рівняннями виду:

$$x \leq 0, \psi = e^{ikx} + r e^{-ikx}; \quad (4)$$

$$x \geq L, \psi = d e^{ik(x-L)}, \quad (5)$$

де r – амплітуда відбиття;

d – амплітуда проходження;

k – модуль хвильового вектора.

Граничні умови:

$$\psi(0) = 1 + r, \quad \psi(L) = d, \quad (6)$$

$$\psi'(0) = ik(1 - r), \quad \psi'(L) = ikd. \quad (7)$$

Коефіцієнти відбиття та проходження дорівнюють відповідно:

$$R = |r|^2, D = |d|^2. \quad (8)$$

Представимо амплітуду r та d через функції $\psi(0)$ та $\psi(L)$, тоді граничні умови матимуть вигляд:

$$\psi'(0) = ik\psi(0) = 2ik, \quad (9)$$

$$\psi'(L) - ik\psi(L) = 0. \quad (10)$$

Тоді коефіцієнти відбиття та проходження знаходимо як:

$$R = |r|^2 = |\psi(0) - 1|^2, \quad (11)$$

$$D = |d|^2 = |\psi(L)|^2. \quad (12)$$

Якщо припустити, що повна довжина структури дорівнює 1 тоді рівняння Шредінгера приймає вид:

$$\psi'' + (\varepsilon - U(x))\psi = 0, \quad (13)$$

де ε – енергія;
 $U(x)$ – потенціал.

Якщо здійснити розбиття ділянки від 0 до L на N областей довжиною a . Тоді $L = Na$; а $L = 1$, то $a = 1/N$.

Для будь-якої точки, що знаходиться в області рівняння Шредінгера у дискретному вигляді має вид:

$$\psi_{n+1} + \psi_{n-1} + \varepsilon_n \psi_n = 0, \quad (14)$$

$$\varepsilon_n = -2 + a^2(\varepsilon - V_n). \quad (15)$$

З першої граничної умови $\psi'(0) = ik\psi(0) = 2ik$ зробимо заміну похідної хвильової функції на її дискретний аналіз:

$$\psi'(0) \approx \frac{\psi_1 - \psi_{-1}}{2a}. \quad (16)$$

Тоді гранична умова та рівняння Шредінгера при $x = 0$ має вид:

$$\psi_1 - \psi_{-1} + 2ika\psi_0 = 4ika, \quad (17)$$

$$\psi_1 - \psi_{-1} + \varepsilon_0\psi_0 = 0. \quad (18)$$

Перш гранична умова дорівнює сумі наведених рівнянь поділеної на 2:

$$\psi_1 + \left(\frac{\varepsilon_0}{2} + ika\right)\psi_0 = 2ika. \quad (19)$$

Для другої граничної умови $x = N$ знаходимо:

$$\psi_{N+1} - \psi_{N-1} - 2ika\psi_N = 0, \quad (20)$$

$$\psi_{N+1} - \psi_{N-1} + \varepsilon_N\psi_N = 0, \quad (21)$$

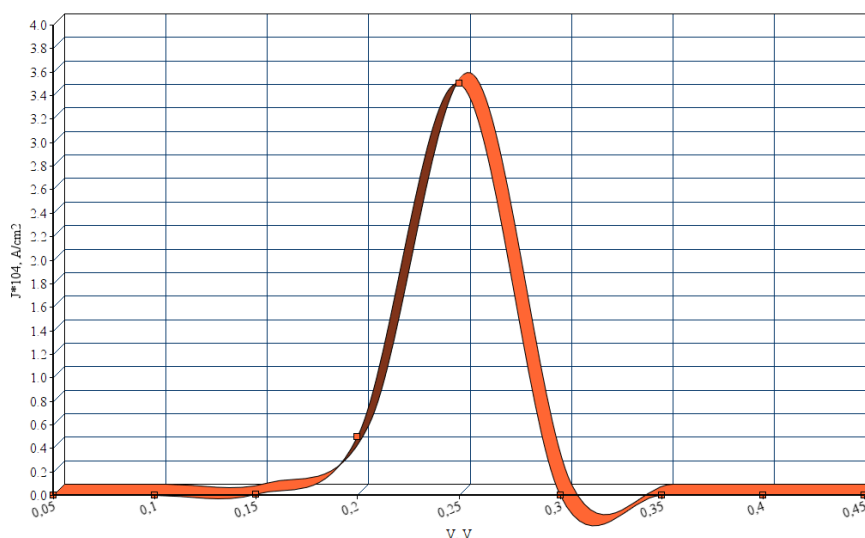
звідки

$$\psi_{N-1} + \left(\frac{\varepsilon_N}{2} + ika\right)\psi_N = 0. \quad (22)$$

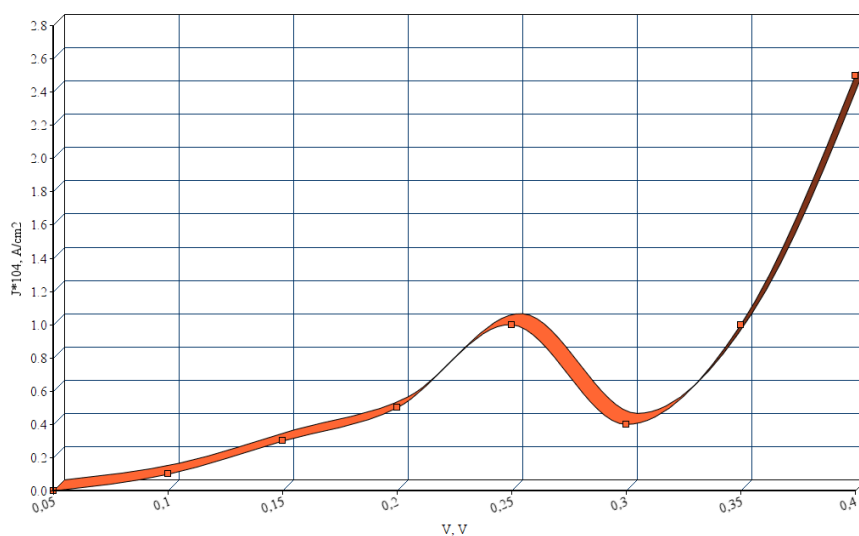
Розрахунок ВАХ резонансно-тунельного діода здійснюється при температурах у 100 та 300 К. На рис. 2 наведено ВАХ резонансно-тунельного діода з висотою бар'єра гетеропереходу 0,3 еВ та товщиною 6 нм. Дані значення обрані для моделювання так як саме на них виникає найбільш широкий та високий пік струму.

З аналізу ВАХ, наведених на рис. 2 випливає, що при температурі 300 К пік щільностей струму є максимальним та досягає до 10^8 А/м². Наведені ВАХ отримані без врахування ефектів розсіяння електронів. Однак варто відмітити, що головним впливовим фактором є резонансне тунелювання через другий рівень, для якого пік коефіцієнта проходження значно ширше та вище. Проте у легованому арсеніді галію факт розсіяння електронів може суттєво надавати вплив на значення коефіцієнта проходження та значення струму.

Таким чином, згідно проведеного дослідження, видно, що зменшення висоти піку коефіцієнта проходження у 4,2 рази та збільшення його ширини у 2 рази, є наслідком впливу процесів розсіяння. Даний факт призводить до зниження рівня тунельного струму.



а)



б)

- а) температура 100 К
- б) температура 300 К

Рис. 2. ВАХ резонансно-тунельного діода

Висновки

У роботі досліджено вплив структури активної області резонансно-тунельного діоду на критичні точки його вольт-амперної характеристики. Доведено той факт, що тунельні ефекти у структурах активної області резонансно-тунельного діода зберігаються при надвисоких температурах, а показники піку щільності струму, такі як положення та форма, змінюються зі зміною конфігурації бар'єру резонансно-тунельного діода.

Список літератури:

1. Иогансен Л.В. О возможности резонансного прохождения электронов в кристаллах через системы барьеров // ЖЭТФ. 1963 Т. 45 № 2 С. 207–213.
2. Ховерко, Ю. М. Мікроелектронні сенсори на основі КНІ-структур з рекристалізованим шаром полікремнію [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.27.01 / Ховерко Юрій Миколайович; Національний ун-т "Львівська політехніка". – Л., 2003. – 168 с.
3. Семенов А. О. Методи і пристрої генерування та формування сигналів з регулярною й хаотичною динамікою для інфокомунікаційних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Вінницький національний технічний університет, Національний університет "Львівська політехніка" МОН України, Вінниця, 2019. 463 с.
4. Осадчук О. В. Дослідження реактивних властивостей тунельно-резонансного діода / О. В. Осадчук, В. С. Осадчук, Я. О. Осадчук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – № 4(1). – С. 160-167. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2020_4\(1\)_29](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2020_4(1)_29).
5. Динамічні закономірності резонансних квантових систем [Текст] : дис. ... канд. фіз.-мат. наук : 01.04.02 / Іванов Микита Анатолійович ; Дніпропетр. нац. ун-т. – Дніпропетровськ, 2015. – 115 с. : іл.
6. Малий Є.В. Властивості дефектів структури у фосфіді галію та їхній вплив на параметри світлодіодів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізикоматематичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.07 «Фізика твердого тіла» – Південноукраїнський національний педагогічний університет ім. К.Д. Ушинського, Одеса, 2019. 154 с.
7. Huang, Keh-Ching. (2021). Characterization of resonant tunneling diodes. ETD Collection for Purdue University.
8. Ortega-Piwonka, Ignacio & Piro, Oreste & Figueiredo, José & Romeira, Bruno & Javaloyes, Julien. (2021). Bursting and Excitability in Neuromorphic Resonant Tunneling Diodes. Physical Review Applied. 15. 10.1103/PhysRevApplied.15.034017.
9. Halimatus Saadiah, Warsuzarina Mat Jubadi, Nabihah Ahmad and M. Hairol Jabbar. Resonant Tunneling Diode Design for Oscillator Circuit. International Postgraduate Conference. Physics 2017, P. 1–8.
10. Khanna, Vinod. (2020). Resonant Tunneling Diodes. 10.1201/9781351204675-24.
11. Jian Pind Sun, George J. Haddad, Pinaki Mazumder and Joel N. Schulman. Resonant Tunneling Diodes: Models and Properties. Proceedings of The JEEE, vol. 86, N 4, April 1998, P. 641–661.
12. Feiginov, Michael. (2020). THz resonant-tunnelling diodes. 20. 10.1117/12.2559674.
13. Bhukya, Revathi & Hampika, Gorla & Guduri, Manisha. (2020). Resonant Tunneling Diodes: Working and Applications. 10.1007/978-981-15-5089-8_17.
14. Awan, Jram Taj. Optical and Transport of p-i-n GaAs-AlAs resonant tunneling diode. Jram Taj Awan – Sao Carlos: UFS Car, 2014, P. 85.
15. Cimbri, Davide & Wasige, E.. (2021). Terahertz Communications with Resonant Tunnelling Diodes. 10.1201/9781003001140-3.

Надійшла до редколегії 23.01.2022

Відомості про автора:

Яцун Кирило Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв (МЕЕПП), факультет електронної та біомедичної інженерії; Україна; e-mail: deadwoldi@gmail.com