

ТУНЕЛЬНО-РЕЗОНАНСНІ ДІОДИ І ПРИЛАДИ НА ЇХ ОСНОВІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Робота присвячена аналізу тунельно-резонансних діодів, які розглядаються як перспективні елементи в сучасній електроніці. У дослідженні детально описуються фізичні принципи роботи цих пристроїв, їх структура та основні характеристики. Особливий акцент зроблено на використанні тунельно-резонансних діодів у височастотних схемах, цифрових пристроях, а також у розробці нових типів сенсорів і вимірювальної апаратури. Проведено аналіз переваг і недоліків тунельно-резонансних діодів у порівнянні з традиційними напівпровідниковими пристроями.

Ключові слова: тунельно-резонансний діод, квантове тунелювання, діоди.

Abstract

The paper is devoted to the analysis of tunneling resonant diodes, which are considered as promising elements in modern electronics. The study describes in detail the physical principles of operation of these devices, their structure and main characteristics. Particular emphasis is placed on the use of tunneling resonant diodes in high-frequency circuits, digital devices, as well as in the development of new types of sensors and measuring equipment. The advantages and disadvantages of tunnel resonant diodes in comparison with traditional semiconductor devices are analyzed.

Keywords: tunneling resonant diode, quantum tunneling, diodes.

Вступ

Тунельно-резонансні діоди — це зміщені двобар'єрні структури з одним рівнем резонансної енергії, який дозволяє електронам тунелювати від емітера до колектора. Вони демонструють область негативного диференціального опору на своїй вольт-амперній характеристиці та можуть працювати при кімнатній температурі, на відміну від більшості мезоскопічних пристроїв. [1]

ТРД є важливими елементами сучасної електроніки завдяки своїм унікальним характеристикам, що дозволяють використовувати їх у широкому спектрі застосувань, від надшвидкісних транзисторів до квантових обчислень. Ці пристрої працюють на принципах квантової механіки, а саме на тунелюванні носіїв заряду через потенціальні бар'єри та резонансному підсиленні струму. Завдяки цим особливостям, ТРД дозволяють досягати високої швидкодії при низьких енергетичних затратах, що робить їх перспективними для використання в різних галузях науки та техніки, включаючи телекомунікації, обробку сигналів і сенсорні технології.

Аналіз

Тунельно-резонансні діоди є напівпровідниковими пристроями, що працюють на принципі квантового тунелювання електронів через потенціальні бар'єри. Завдяки явищу, передбаченому квантовою механікою, електрони здатні проходити крізь ці бар'єри навіть при меншій енергії, ніж висота бар'єру.

Одним із перших застосувань резонансних тунельних структур був резонансний тунельний діод (RTD), який є зміщеною подвійною бар'єрною структурою, яка має лише один резонансний енергетичний рівень, на якому можуть тунелювати електрони з лівого контакту (емітера). Основною характеристикою RTD є наявність області негативного диференціального опору, як показано на рисунку 1. Хоча електрони в емітерній області мають енергію між дном зони провідності та енергією

Фермі E_{F1} , резонансний рівень у ямі діє як фільтр, який дозволяє подальше поширення лише тих електронів з енергією E_{res} ; коли застосоване зміщення є достатньо високим, щоб рівень резонансної енергії впав нижче краю зони провідності в області лівого емітера, електрони не можуть тунелювати в правий контакт (колектор) з енергією Фермі E_{F2} , і очікується, що струм впаде. Тому ВАХ демонструє область негативного диференціального опору. Важливо відзначити, що RTD може працювати при кімнатній температурі, на відміну від більшості мезоскопічних пристроїв, які добре функціонують лише при низьких температурах.

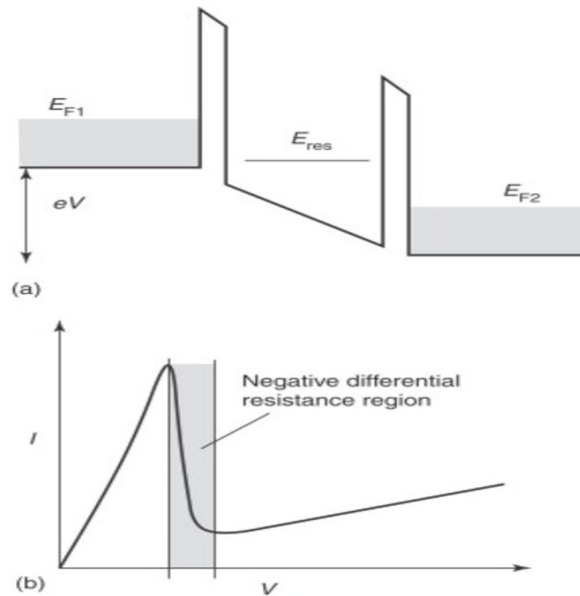


Рис 1. Схематичне зображення резонансного тунельного діода та (б) його ВАХ

Резонансно-тунельний діод (RTD) використовує переваги квантового тунелювання, але додає рівень складності через свою структуру. RTD складається з квантової ями, затиснутої між двома тонкими бар'єрами. Ця структура формує дискретні енергетичні рівні всередині ями завдяки квантовому обмеженню[2].

Резонансний пік вольт-амперної характеристики RTD виникає, коли рівні енергії електронів у квантовій ямі вирівнюються з енергією вхідних електронів. Це вирівнювання відбувається при певній напрузі, що призводить до раптового збільшення струму — ознаки резонансного тунелювання[3].

Особливості резонансно-тунельних діодів;

- Відомі своєю надзвичайно високошвидкісною роботою, оскільки вони використовують певні резонансні стани енергії.
- Низьке енергоспоживання робить їх придатними для енергозберігаючих застосувань.
- Виявляють яскраво виражений негативний диференціальний опір, що надає їм унікальних властивостей для передової електроніки.

Результати дослідження

Тунельні діоди є захопливими електронними компонентами, здатними працювати на високих частотах при низькому енергоспоживанні. Це робить їх ідеальними для використання в телекомунікаціях, обчислювальних системах та сенсорах. Хоча вони існують уже протягом кількох десятиліть, розвиток технологій тунельних діодів триває, завдяки дослідженням у галузі нових матеріалів, конструкцій і методів виробництва.

Ми розглянули деякі перспективні інновації у сфері тунельних діодів, які можуть кардинально змінити електронну галузь:

1) Нові матеріали для тунельних діодів. Одним із найперспективніших напрямків є відкриття нових матеріалів з потужними квантово-механічними тунельними властивостями. Зокрема, двовимірні

матеріали, такі як графен, дихальогеніди перехідних металів і чорний фосфор, виявили себе як ефективні бази для тунельних діодів. Ці матеріали характеризуються унікальними властивостями, включаючи високу рухливість електронів і регульовану ширину забороненої зони. Це може суттєво покращити роботу діодів. Додатково, їх можна інтегрувати з іншими електронними складниками для створення складніших схем з розширеною функціональністю.

2) Наноструктурування тунельних діодів. Ще один підхід до покращення тунельних діодів полягає у їхньому наноструктуруванні. Завдяки створенню наноструктур з точним контролем розмірів можливо змінювати ймовірність тунелювання і підсилювати ефект квантового обмеження. Зокрема, нанодотяні діоди можуть демонструвати високі співвідношення стичкового струму при низьких струмах витоку, що робить їх ідеальними для високошвидкісних цифрових схем.

3) Інтеграція з іншими технологіями. Тунельні діоди можуть бути інтегровані з іншими технологіями для створення гібридних пристроїв із розширеними можливостями. Наприклад, поєднання їх з плазмонними структурами може привести до створення плазмонних тунельних діодів з посиленою реакцією на світлові та інші зовнішні подразники. Крім того, спілка з надпровідними матеріалами дозволяє створювати надпровідні тунельні переходи, здатні працювати при низьких температурах з високою когерентністю.

4) Підвищення надійності та технологічності. Наприкінці майбутні розробки у сфері тунельних діодів спрямовані на підвищення їхньої надійності та технологічної міцності. Вивчаються новітні методи виготовлення, такі як атомарне шарове осадження та молекулярно-променева епітаксія, які забезпечують високу якість і повторюваність діодів. Досліджуються шляхи зменшення впливу дефектів і домішок на їхню роботу за допомогою передових методик аналізу, таких як скануюча тунельна мікроскопія. Майбутнє в цій галузі пов'язане з дослідженнями нових матеріалів, нанотехнологій, інтеграції.

Висновки

Тунельно-резонансні діоди є сучасними напівпровідниковими приладами, що вирізняються своїми унікальними властивостями завдяки квантовомеханічному тунельному ефекту. Тунельні діоди, зважаючи на їх унікальні характеристики, як-от висока швидкість перемикавання, низьке енергоспоживання та здатність реалізовувати квантові ефекти, викликають значний інтерес у розробників квантових комп'ютерів. Ці пристрої широко застосовуються в різних секторах електроніки завдяки їхній нелінійній вольт-амперній характеристиці, від'ємному диференційному опору і великій швидкодії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Resonant Tunneling Diodes [Електронний ресурс] // ScienceDirect. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/resonant-tunneling-diodes>. – Дата звернення: 27.11.2024.
2. University Physics, 3rd Edition [Електронний ресурс] // VAIA. – Режим доступу: <https://www.vaia.com/en-us/textbooks/physics/university-physics-3-edition/>. – Дата звернення: 27.11.2024.
3. Tunneling Diodes: Bridging the Gap in Electronics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fastercapital.com/content/Tunneling-Diodes--Bridging-the-Gap-in-Electronics.html>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 27.11.2024.

Івасько Емма Віталіївна — студентка групи МНТ-22б, факультет фізес, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: emmaivasko@gmail.com

Пінаєв Богдан Олегович – старший викладач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Pinaev.bogdam@gmail.com

Ivasko Emma Vitaliivna — student of the group MNT-22b, Faculty of Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: emmaivasko@gmail.com

Pinaev Bohdan Olegovich – Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Pinaev.bogdam@gmail.com