

ТУНЕЛЬНИЙ ЕФЕКТ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В СУЧАСНІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглядаються фізичні принципи квантового тунелювання електронів, що використовуються в наноелектроніці. Проаналізовано математичну залежність ймовірності тунелювання від параметрів потенціального бар'єра, наведено класифікацію та приклади застосування явища в сучасних напівпровідникових приладах. Описано перспективи використання тунельного ефекту для подальшої мініатюризації обчислювальних систем та розвитку квантових технологій.

Ключові слова: тунельний ефект, квантове тунелювання, нанотехнології, тунельний транзистор, флеш-пам'ять, кубіт.

Abstract

The physical principles of quantum tunneling of electrons used in nanoelectronics are considered. The mathematical dependence of tunneling probability on the potential barrier parameters is analyzed, and the classification and examples of the phenomenon application in modern semiconductor devices are provided. The prospects of using the tunneling effect for further miniaturization of computing systems and the development of quantum technologies are described.

Keywords: tunnel effect, quantum tunneling, nanotechnology, tunnel field-effect transistor, flash memory, qubit.

Вступ

Прагнення до безперервної мініатюризації електронних компонентів та виконання закону Мура призвело до того, що геометричні розміри транзисторів у сучасних процесорах досягли нанометрового масштабу [1]. На такому рівні класична фізика перестає адекватно описувати процеси перенесення заряду, і на перший план виходять закони квантової механіки [2].

Одним із найважливіших явищ, що виникають під час масштабування наноелектроніки, є квантове тунелювання електронів. Тривалий час тунельний ефект розглядався виключно як деструктивний чинник, що викликає паразитичні витоки струму. Проте сьогодні інженери активно інтегрують це явище в архітектуру новітніх приладів [3].

Метою роботи є аналіз фізичної природи квантового тунелювання електронів, вивчення механізмів його корисного прикладного застосування та класифікація сучасних електронних компонентів, робота яких базується на цьому ефекті.

Основні теоретичні засади дослідження можна розділити на такі етапи:

1. Вивчення квантово-механічної природи мікрочастинок та хвильової функції електрона.
2. Визначення математичної залежності ймовірності тунелювання від ширини та висоти потенціального бар'єра.
3. Аналіз роботи напівпровідникових приладів, що використовують тунельний ефект (діоди, енергонезалежна пам'ять, транзистори TFET).
4. Оцінка перспектив впровадження квантового тунелювання у новітніх обчислювальних системах та кубітах.

Результати досліджень

У квантовій механіці мікрочастинок описуються за допомогою хвильової функції, квадрат модуля якої визначає щільність ймовірності знаходження частинки в певній точці простору [2]. Через хвильову природу електрон здатний долати потенціальні бар'єри, висота яких перевищує його повну кінетичну енергію, що є неможливим у класичній фізиці.

Математична залежність коефіцієнта прозорості прямокутного бар'єра (ймовірності тунелювання) T виражається формулою [5]:

$$T = T_0 \exp\left(-2d \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar}\right)$$

де:

- d — ширина потенціального бар'єра [м];
- m — ефективна маса електрона [кг];
- V_0 — висота бар'єра [Дж];
- E — енергія частинки [Дж];
- \hbar — зведена стала Планка [Дж·с].

Аналіз формули показує, що ймовірність тунелювання експоненціально зростає при зменшенні товщини бар'єра d , що наочно демонструє графік деформації енергетичних зон (рис. 1).

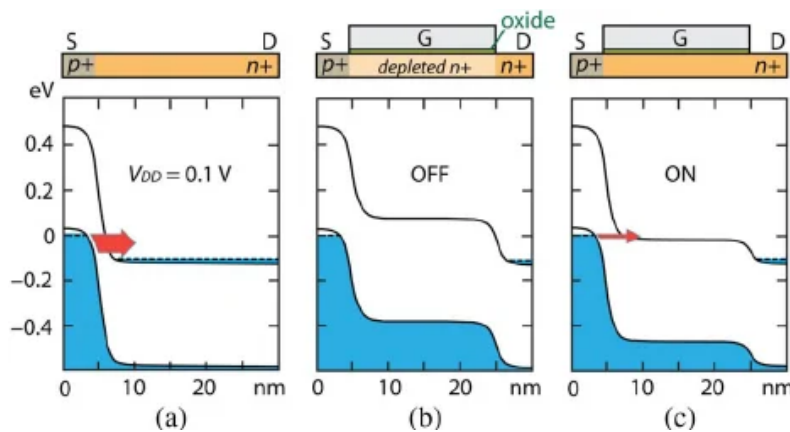


Рис. 1. Енергетична зонна діаграма та структура шарів для p-TFET транзистора: а) витік струму з боку витіку при низькій напрузі $V_{DD} = 0.1\text{В}$; б) закритий стан (OFF) із широким тунельним бар'єром; в) відкритий стан (ON) із різко звуженим бар'єром для міжзонного квантового тунелювання (Band-to-Band Tunneling) [4].

У сучасній мікро- та наноелектроніці цей фізичний принцип інтегровано в кілька ключових типів пристроїв:

- Тунельні діоди (діоди Есакі): завдяки надвисокому легуванню р-п переходу його ширина зменшується до кількох нанометрів [5]. Це створює умови для тунелювання «зона-зона» (band-to-band tunneling) та формування ділянки з негативним диференціальним опором на вольт-амперній характеристиці приладу.
- Енергонезалежна пам'ять (SSD та Flash): запис та стирання інформації в елементах пам'яті типу NAND базується на механізмі тунелювання Фаулера-Нордгейма [2]. Сильне електричне поле деформує потенціальний бар'єр діелектрика, дозволяючи електронам тунелювати на ізолюваний плаваючий затвор, де вони залишаються після вимкнення живлення.
- Тунельні польові транзистори (TFET): на відміну від класичних MOSFET-транзисторів, де струм керується тепловою емісією через бар'єр, у TFET перемикання відбувається за рахунок керованого квантового тунелювання [3]. Це дозволяє подолати класичну термодинамічну межу підпорогового нахилу (60 мВ/декаду) та знизити напругу живлення процесорів нижче 0.5 В [4].

Перспективи застосування

Подальший розвиток технології пов'язаний із переходом до двовимірних матеріалів (графен, дихалькогеніди перехідних металів) для створення атомарно тонких та стабільних тунельних бар'єрів [1, 6]. Одним важливим вектором є квантові обчислення. У надпровідних кубітах тунельний ефект реалізується через *джозефсонівські переходи* (тунелювання куперовських пар крізь тонкий ізолятор), що є базою для побудови комерційних квантових комп'ютерів [2].

Висновки

Успішна інтеграція квантово-механічних ефектів у напівпровідникові прилади дозволила трансформувати паразитарні витоки струму в корисний фізичний принцип роботи. Використання керованого тунелювання електронів у транзисторах нового покоління (TFET) та флеш-пам'яті забезпечує необхідну енергоефективність і щільність запису даних, вирішуючи проблему фізичних обмежень класичної схемотехніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Азаренков М. О., Неклюдов І. М., Воєvodін В. М. Вступ до наноматеріалознавства та нанотехнологій. — Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. — 312 с.
2. Борисенко В. С., Данилюк О. Л. Наноелектроніка : навч. посіб. — Київ : Вища школа, 2021. — 245 с.
3. Seabaugh A. C., Zhang Q. Low-Voltage Tunnel Field-Effect Transistors // Proceedings of the IEEE. — 2010. — Vol. 98, No. 12. — P. 2095–2110.
4. Ionescu A. M., Riel H. Tunnel field-effect transistors as energy-efficient electronic switches // Nature. — 2011. — Vol. 479. — P. 329–337.
5. Коваль І. П., Мельник П. В. Фізичні основи мікро- та наноелектроніки : підручник. — Київ : ВПЦ "Київський університет", 2022. — 410 с.
6. Lundstrom M. Fundamentals of Nanotransistors. Dynamic bucketing and quantum transport. — New Jersey : World Scientific Publishing, 2017. — 280 p.

Котовський Руслан Русланович – студент групи ІПІ-25Б, Факультет Інформаційних Технологій та Комп'ютерної Інженерії, Вінницький технічний національний університет, Вінниця, e-mail: kotruslan@outlook.com

Науковий керівник – **Мартинюк Володимир Валерійович**, доцент кафедри загальної фізики

Kotovskiy Ruslan - student of group ІPI-25B, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Scientific advisor – **Martyniuk Volodymyr Valeriyovych**, Associate Professor of the Department of General Physics, VNTU