



## Реферат

УДК 621.396

Шейко Є. О. Логічні радіо-імпульсні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. Магістерська кваліфікаційна робота. - Вінниця: ВНТУ, 2019. – 131 с. укр. мовою.

Бібліографій 64, ілюстрацій 42, таблиць 22.

У роботі наведено результати розроблення та дослідження логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором. Проведено аналіз функціональних пристроїв на основі резонансно-тунельного ефекту, таких як резонансно-тунельні діоди, модуляційно-леговані польові транзистори, біполярні транзистори на гетеропереходах, транзистори на гарячих електронах і транзистори з резонансним тунелюванням.

Розроблено та досліджено електричні схеми радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних діодів призначених для виконання логічних операцій XOR та XNOR. Отримано результати електричних розрахунків і комп'ютерного схемотехнічного моделювання радіо-імпульсних логічних пристроїв на основі резонансно-тунельних діодів.

Графічна частина складається з 6 плакатів із результатами дослідження.

Також у роботі розроблено розділи економічної частини, охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: логічний елемент, резонансно-тунельний ефект, резонансно-тунельний діод, математична модель.

## Abstract

Sheiko E.A Logical radio-pulse devices based on resonant-tunneled semiconductor structures with negative differential resistance. Master's thesis. - Vinnytsia: VNTU, 2019. - 131 p. ukr. language.

Bibliographies 64, illustrations 42, tables 22.

The paper presents the results of the development and research of logical radio-pulse devices based on resonant tunneling semiconductor structures with negative differential resistance. The analysis of functional devices based on the resonant tunneling effect, such as resonant tunneling diodes, modulation-doped field effect transistors, bipolar transistors on heterojunctions, transistors on hot electrons and transistors with resonant tunneling.

The electrical circuits of radio-pulse devices based on resonant tunneling diodes designed to perform logical operations XOR and XNOR were developed and investigated. The results of electrical calculations and computer circuit simulation of radio-pulse logic devices based on resonant tunneling diodes are obtained.

The graphic part consists of 6 posters with the results of the study.

The work also developed sections of the economic part, labor protection and safety in emergency situations.

Keywords: logical element, resonance-tunneling effect, resonance-tunneling diode, mathematical model.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 НАПІВПРОВІДНИКОВІ КВАНТОВІ НАНОСТРУКТУРИ.....	11
1.1 Перспективні напрямки розвитку функціональної мікроелектроніки .....	11
1.2 Структури із квантовим обмеженням за рахунок внутрішнього електричного поля.....	14
1.3 Структури із квантовим обмеженням за рахунок зовнішнього електричного поля .....	21
1.4 Квантові ями .....	23
2 ФУНКЦІОНАЛЬНІ НАНОЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНОГО ЕФЕКТУ .....	27
2.1 Модуляційно-леговані польові транзистори (MODFET).....	27
2.2 Біполярні транзистори на гетеропереходах.....	30
2.3 Транзистори на гарячих електронах.....	35
2.4 Транзистори з резонансним тунелюванням .....	39
2.5 Висновки до розділу .....	42
3 ЕЛЕКТРИЧНИЙ РОЗРАХУНОК НАНОЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ.....	44
3.1 Тунельно-резонансні структури в спіновій електроніці .....	44
3.2 Розрахунок електричних параметрів резонансно-тунельного діода .....	46
3.3 Розрахунок електричних параметрів і характеристик MODFET .....	47
3.4 Висновки до розділу .....	51
4 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГІЧНИХ РАДІО-ІМПУЛЬСНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНИХ ДІОДІВ .....	52
4.1 Тривходові радіо-імпульсні пристрої на основі резонансно-тунельних діодів для виконання логічних операцій XOR та XNOR .....	52
4.2 Розроблення тривходових логічних елементів XOR і XNOR на базі топології GTG .....	56
4.3 Комп'ютерне схемотехнічне моделювання радіо-імпульсних логічних пристроїв на основі резонансно-тунельних діодів .....	61

4.4 Розроблення схеми XOR на основі резонансно-тунельного транзистора з високою рухливістю електронів .....	64
4.5 Висновки до розділу .....	74
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	75
5.1 Аналіз комерційного потенціалу розробки (технологічний аудит розробки) логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором .....	75
5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи .....	82
5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором .....	89
5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності .....	91
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	94
6.1 Технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці .....	94
6.2 Промислова та пожежна безпека при проведенні дослідження.....	101
6.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи радіо-імпульсних пристроїв в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій .....	103
6.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи радіо-імпульсних пристроїв в умовах дії загрозливих чинників НС.....	108
6.5 Висновки до розділу .....	110
ВИСНОВКИ.....	111
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	113
Додаток А (обов’язковий). Технічне завдання.....	119
Додаток Б (обов’язковий). Результати аналізу перспективних напрямків розвитку функціональної мікроелектроніки .....	126
Додаток В (обов’язковий). Напівпровідникові структури із квантовим обмеженням за рахунок внутрішнього електричного поля та квантові ями. ....	127
Додаток Д (обов’язковий). Будова та принцип дії діодів із тунельно-резонансною напівпровідниковою структурою.....	128
Додаток Е (обов’язковий). Базові схеми радіо-імпульсних логічних пристроїв на основі резонансно-тунельних діодів. ....	129

Додаток Ж (обов'язковий). Розроблення тривходових логічних елементів XOR і XNOR на основі резонансно-тунельних діодів за топологією топології GTG.....	130
Додаток К (обов'язковий). Результати комп'ютерного схемотехнічного моделювання.....	131

## ВСТУП

### *Актуальність теми.*

Резонансно-тунельні діоди є одними з найбільш перспективних приладів твердотільної електроніки. Нині розроблено багато схем, що застосовують РТД, і деякі з таких схем мають комерційне застосування. Стабільне функціонування РТД спостерігалось на частотах понад 2,5 ТГц; також спостерігаються задовільні співвідношення пікового значення струму до долинного значення при кімнатній температурі. Такі властивості пристрою роблять його унікальним активним елементом для мікрохвильової електроніки. На жаль, на відміну від порівняно простої ідеї функціонування пристрою фізика функціонування РТД є дуже складною і залежить від багатьох факторів. Таким чином, поки що існує багато нерозв'язаних проблем з моделюванням характеристик РТД.

Актуальність даної теми полягає в тому, що на даний час проводиться велика кількість досліджень в області резонансного тунелювання електронів через тонкі напівпровідникові плівки та їх застосування в мікроелектроніці.

### *Аналіз останніх досліджень.*

Наявність потенційної ями дуже малих розмірів, сформованої в гетеропереходах структури AlGaAs-GaAs, може приводити до квантування рівнів енергії, що відповідають руху електронів у напрямку, перпендикулярному поверхні поділу, хоча рух електронів у площині, паралельній поверхні поділу, практично не відрізняється від руху вільних частинок. При цьому відзначалося, що рухливність електронів у цій площині може бути винятково високою, оскільки виникаючі в шарі AlGaAs електрони надходять у нелегований шар GaAs, де відсутнє розсіювання на примісних атомах і вони можуть рухатися паралельно поверхні поділу зовсім вільно під впливом електричного поля. Саме на цьому принципі з початку 1980-х г. почали створюватися польові транзистори з високою рухливістю носіїв (HEMT), які іноді називають польовими транзисторами з модульованим легуванням (MODFET), тому що в них використовуються модульовано-

леговані гетеропереходи, а їхня дія заснована на можливості регулювання руху електронів уздовж каналу впливом електричного поля [1-3].

Завдяки своїм характеристикам такі пристрої одержали також назву польових транзисторів з високою рухливістю електронів (HEMT). Для порівняння у [4] наведені також типові характеристики кремнієвих польових МОН-Транзисторів і польових транзисторів з бар'єром Шоттки на основі GaAs. Значення частот приведено для кімнатної температури (300 °К), хоча варто відзначити, що вони набагато вище при температурі близько 0 °К внаслідок росту рухливості при низьких температурах. У цей час уже існують модульовано-леговані польові транзистори з довжиною затвора близько 100 нм і робочою частотою при кімнатній температурі порядку декількох сотень гігагерць (ГГц) [5].

Використання квантових гетероструктур не обмежується польовими транзисторами, у яких транспорт електронів здійснюється лише паралельно поверхні квантової ями, а включає також транзистори, у яких транспорт відбувається перпендикулярно поверхні поділу гетероструктури. Робота таких транзисторів заснована на прикладанні різниці потенціалів до емітеру, бази й колектору, що нагадує механізм дії біполярних транзисторів. Максимальна робоча частота біполярних транзисторів обмежується часом прольоту носіїв заряду через базу. Як буде показано нижче, гетеропереходні біполярні транзистори (HBT) на основі переходів в AlGaAs - GaAs або Si - Ge дозволяють значно підвищити ряд важливих параметрів, таких, як гранична частота (частота відсікання),  $\beta$ -фактор, опір бази та ін. у порівнянні зі звичайними кремнієвими біполярними транзисторами [6,7].

Слід окремо зазначити ще один дуже цікавий квантовий ефект, резонансне тунелювання, який можна використовувати для створення нових типів транзисторів. Діоди з резонансним тунелюванням (RTD), що діють на основі цього ефекту, спрощено являють собою квантову яму, оточену двома потенційними бар'єрами, досить тонкими для того, щоб через них могло здійснюватися тунелювання електронів. Час прольоту електронів через таку гетероструктуру надзвичайно малий, внаслідок чого пристрої на основі RTD



мають виняткову швидкодiю й можуть працювати при частотах порядку 1 ТГц. Поєднуючи RTD з бiполярним або польовим транзистором, можна створити так званi транзистори з резонансним тунелюванням (RTT). У цих транзисторах структура з резонансним тунелюванням iнжектуює гарячi електрони (тобто електрони з високою кiнетичною енергiєю) в активну область транзистора, що дозволяє створювати так званi транзистори на гарячих електронах (HET) [8].

Зниження характерних розмiрiв приладiв у нанометровий дiапазон приводить до помiтного зменшення числа електронiв, що вiдповiдають проходженню електричного сигналу через прилад. Ця тенденцiя неминуче приводить до створення так званих одноелектронних транзисторiв (SET). Характеристики одноелектронних транзисторiв визначаються ефектом кулонiвської блокади, що проявляється в нульрозмiрних напiвпровiдникових структурах, типу квантових точок. Електронний струм через квантову точку в одноелектронному транзисторi, з'єднаному з выводами за допомогою тунельних переходiв, дозволяє контролювати потiк електронiв «поштучно» подачею сигналу на електрод, який у цьому випадку поводить ся подiбно вентилю (затвору) транзистора [9].

*Метою роботи* є розроблення та дослiдження логiчних радiо-iмпульсних пристроiв на основi резонансно-тунельних напiвпровiдникових структур iз вiд'ємним диференцiйним опором.

*Основним завданням* даної роботи є дослiдження можливостi використання тунельно-резонансних дiодiв, як логiчних елементiв напiвпровiдникової електронiки та розроблення радiо-iмпульсних логiчних пристроiв на iх основi.

*Задачами* дослiдження є:

- проведення аналізу використання резонансно-тунельних напiвпровiдникових структур iз вiд'ємним диференцiйним опором;
- розробка радiо-iмпульсних логiчних пристроiв на основi резонансно-тунельних напiвпровiдникових структур iз вiд'ємним диференцiйним опором;

- комп'ютерне схемотехнічне моделювання радіо-імпульсних логічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;

- розрахунок електричних параметрів радіо-імпульсних логічних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;

- проведення розрахунків економічної частини та розділу охорони праці.

*Об'єктом дослідження* даної роботи є фізичні явища та ефекти, що відбуваються в є тунельно-резонансних діодах, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

*Предметом дослідження* є часові та частотні параметри і характеристики сигналів тунельно-резонансних транзисторів, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

*Наукова новизна одержаних результатів* – отримав подальший розвиток застосування тунельно-резонансних транзисторів, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

*Практична новизна одержаних результатів* – полягає в отриманих нових результатах теоретичних і модельних досліджень логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором.

*Апробація результатів роботи.* Основні ідеї роботи доповідалися та обговорювалися на XLVIII регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, 9-10 березня 2019).

*Публікації.* За темою досліджень автором опубліковано 3 статті в збірнику праць міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (Вінниця, ВНТУ, 14-16 листопада 2019 р.) [10].

# 1 НАПІВПРОВІДНИКОВІ КВАНТОВІ НАНОСТРУКТУРИ

## 1.1 Перспективні напрямки розвитку функціональної мікроелектроніки

Виробництво транзисторів для НВІС в традиційному вигляді, тобто зі стоком, витоком і затвором, імовірно можливо лише до 2020-2025 рр. На той час розміри всіх елементів кремнієвого транзистора досягнутий атомарних розмірів і зменшувати їх далі буде просто неможливо.

2020 рік - це фактично кордон, коли закон Мура перестане діяти, а кремній втратить свою актуальність як основний матеріал мікроелектроніки (для НВІС).

Закон Мура - емпіричне спостереження, зроблене в 1965 році Гордоном Муром, Intel (через шість років після винаходу інтегральної схеми) - число транзисторів на кристалі буде подвоюватися кожні 24 місяці.

При аналізі графіка зростання продуктивності запам'ятовуючих мікросхем їм була виявлена закономірність (правило, закон): поява нових моделей мікросхем спостерігалася приблизно через однакові періоди часу (18-24 міс.). При цьому кількість транзисторів в них зростала щораз приблизно вдвічі. При збереженні цієї тенденції, потужність обчислювальних пристроїв за відносно короткий проміжок часу буде зростати експоненціально (рис. 1.1) та в Додатку Б (08-36.МКР.016.00.001 ПЛ).

У 2007 році Г. Мур заявив, що закон, очевидно, скоро перестане діяти через атомарну природу речовини і обмеження швидкості світла. На рис. 1.1 вертикальна вісь має логарифмічну шкалу, тобто крива відповідає експоненціальному закону - кількість транзисторів подвоюється приблизно кожні 2 роки.

До недавнього часу постійно зменшувалися розміри елементів транзисторів поки товщина шару оксиду кремнію ( $\text{SiO}_2$ ), що використовується в транзисторі в якості діелектрика, не була доведена практично до мінімуму - 1,2 нм, тобто всього 3-4 атомарних шару.



Від постійного зменшення геометричних розмірів транзисторів (Intel) перейшла також до зміни їх інших параметрів, включаючи конструкцію і матеріал:

- був створений новий матеріал на основі гафнію для подзатворного діелектрика;
- розробляється модель з так званим об'ємним, або тривимірним затвором, що дозволить збільшити робочий струм транзистора і одночасно знизити струми витоку;
- використання для виготовлення транзисторів інших матеріалів замість кремнію.

Наприклад: антимонід індію (InSb) має рухливість електронів в 50 разів вище, ніж в кремнії, що відразу ж дає колосальний вигаш за всіма параметрами пристрою.

- опрацьовується можливість використання нанотрубок і нанониток, які також досліджується в лабораторіях Intel.

Уже зараз і інші провідні фірми шукають принципово нові матеріали і технології для створення транзисторів майбутнього.

У числі перспективних напрямків досліджень розглядаються:

- молекулярний транзистор;
- спіновий транзистор;
- графеновий транзистор;
- квантовий транзистор на основі інтерференції хвиль;
- транзистор на квантових точках;
- транзистори на основі нанотрубок;
- ферроелектричний транзистор тощо.

Поки неможливо уявити, як саме виглядатимуть транзистори через 15-20 років, але досить імовірно: це будуть пристрої з молекулярними розмірами, абсолютно несхожі на існуючі нині CMOS-транзистори.

Створення нових транзисторів, на інших фізичних принципах в даний час знаходиться на стадії створення макетних зразків та лабораторних досліджень.

## 1.2 Структури із квантовим обмеженням за рахунок внутрішнього електричного поля

Обмеження руху електронів (дірок) у низькорозмірній структурі, що приводить (внаслідок їхньої квантово-хвильової природи) до ненульової мінімальної енергії й до дискретності енергії дозволених станів, називають квантовим обмеженням, реалізованим у трьох напрямках.

Донорні й акцепторні домішки в напівпровідниках, так само як і гетеропереходи, утворені різними напівпровідниками, індукують локальний перерозподіл зарядів. Виникле в результаті цього електричне поле використовують для створення потенційних бар'єрів, що обмежують рух електронів у нанорозмірних областях - "електронне" формування наноструктур. Серед структур із квантовим обмеженням, створюваним внутрішнім електричним полем найбільше поширення одержали такі структури:

- 1) квантові колодязі (ями),
- 2) модуляційно-леговані,
- 3) дельта-леговані.

Розглянемо їх по черзі.

### 1.2.1 Квантові ями

Структура, що складається з напівпровідників із різною шириною забороненою зоною  $\Delta E_g$ , у якій нанорозмірна область із матеріалу з меншою  $\Delta E_g$  перебуває між областями з матеріалу з більшою  $\Delta E_g$  поводить себе як квантова яма для рухливих носіїв заряду. Матеріал з меншою  $\Delta E_g$  утворює квантову яму, а сусідні області створюють потенційні бар'єри, які відіграють для цієї ями роль стінок. Розглянемо одиночний гетеропереход між двома напівпровідниками А і В, які мають різну ширину забороненої зони (рис. 1.2) та наведені в Додатку В (08-36.МКР.016.00.001 ПЛ).

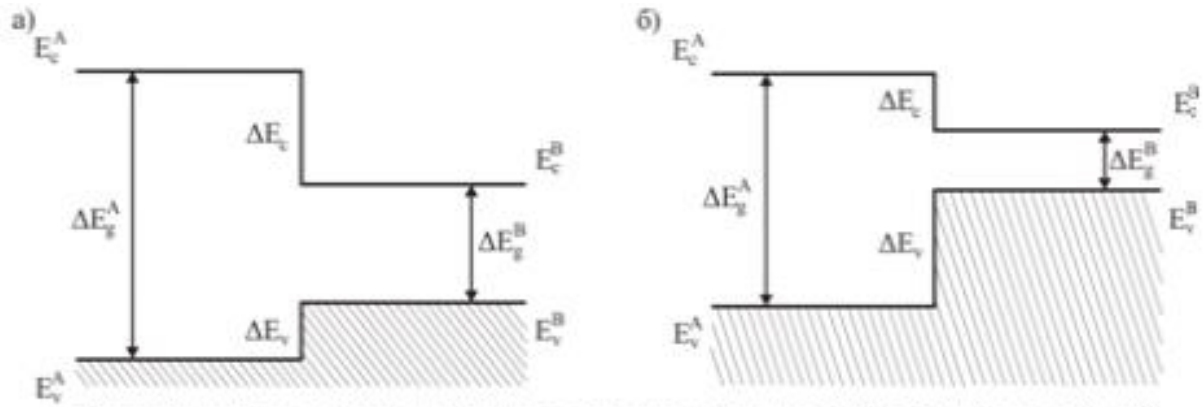


Рисунок 1.2 – Зонна діаграма 1 типу, коли розрив зони провідності  $\Delta E_c$  більше розриву валентної зони  $\Delta E_v$  (а) і навпаки (б)

В обох випадках заборонена зона матеріалу В розташовується усередині А, а рух електронів і дірок з В до А обмежений потенційними бар'єрами, висота яких дорівнює відповідно  $\Delta E_c$  і  $\Delta E_v$  [10].

У таких структурах електрони й дірки локалізуються в одній області простору - у шарі В (у квантових ямах).

Діаграми гетеропереходів 2-го типу представлені на рис. 1.2 (а,б – із забороненими зонами, що перекриваються, і в, г – із забороненими зонами, що не перекриваються) [10].

У першому випадку електрони й дірки локалізуються в різних областях (відповідно в шарі В і А (рис. 1.3, а) або А і В (рис. 1.3, б)). У другому випадку електрони валентної зони одного матеріалу будуть безперешкодно переходити в зону провідності іншого матеріалу (з А-шару до В-шар на рис. 1.3, в. і з В-шару до А-шару на рис. 1.3, г) та наведені в Додатку В (08-36.МКР.016.00.001 ПЛ).

Виникаюче в результаті цього електростатичне поле (дифузійне) спотворить зонну діаграму, а сам гетероперехід буде еквівалентний гетеропереходу метал-напівпровідник.

Квантова яма є одним з найбільш важливих елементів більшості наноелектронних і оптоелектронних приладів.

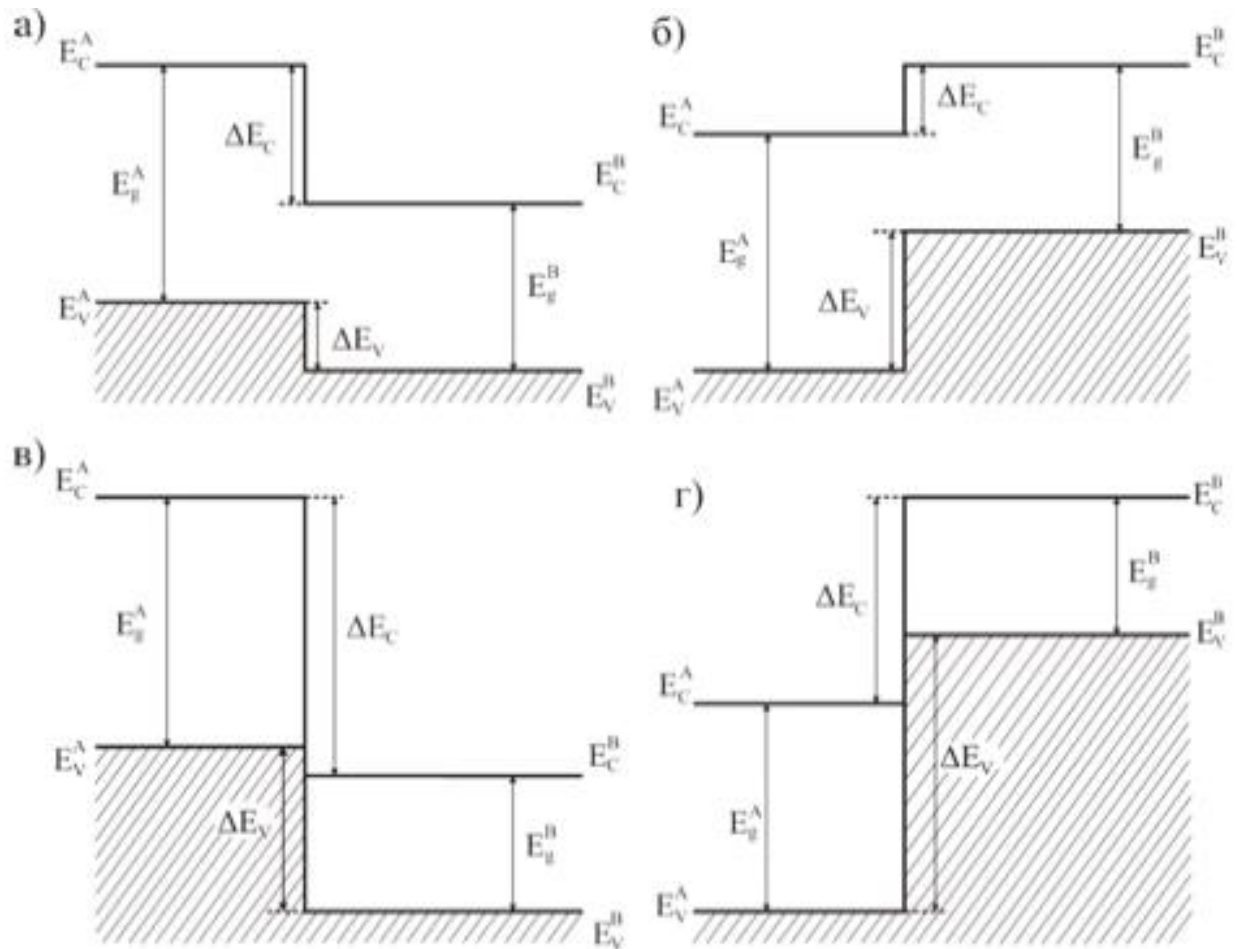


Рисунок 1.3 – Гетеропереходи другого типу: а,б – з перекриваючимися, в,г – з неперекриваючимися забороненими зонами ( $a, б - \Delta E_c > \Delta E_v$ ;  $в, г - \Delta E_c < \Delta E_v$ )

### 1.2.2 Модуляційно-леговані структури

Традиційний шлях створення в напівпровідниках областей з необхідним типом об'ємних носіїв заряду (електронів і дірок) передбачає легування цих областей донорними або акцепторними домішками. Коли електрони або дірки залишають домішкові атоми, вони залишають їх в іонізованому стані. При цьому в міру збільшення концентрації вільних носіїв заряду, які створюються, їхня рухливість знижується через посилення розсіювання носіїв заряду на іонізованих домішках за рахунок кулонівської взаємодії з ними. Тому необхідність досягнення великої концентрації вільних носіїв заряду вступає в протиріччя з можливістю забезпечення їхньої високої рухливості. Тим часом високочастотні напівпровідникові прилади вимагають великих концентрацій носіїв заряду із максимально можливою рухливістю .



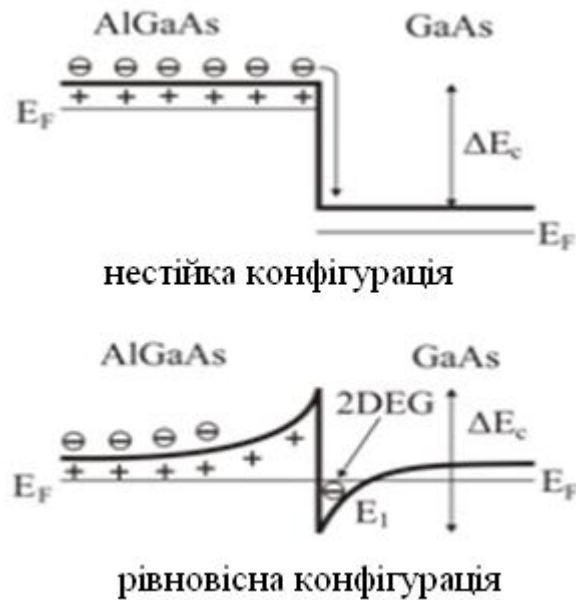


Рисунок 1.4 – Вигляд зони провідності в околі гетеропереходу, утвореного напівпровідником GaAs з малою шириною забороненої зони і напівпровідником AlGaAs з великою шириною забороненої зони

Ця проблема вирішується в модуляційно-легованих структурах, у яких область напівпровідника де генеруються носії заряду, і область де здійснюється їхнє перенесення, просторово розділені. Для цього використовуються гетероструктури, які утворені напівпровідниками з різною шириною забороненої зони [10].

У модульовано-легованій структурі донорна домішка вводиться до напівпровідника з більшою шириною забороненої зони  $\Delta E_g$  [11].

Розглянемо якісну картину виникнення електронної нанорозмірної ями на поверхні поділу AlGaAs-GaAs. Нехай у розглянутому гетеропереході AlGaAs-GaAs ліворуч розташовується арсенід галію, легований алюмінієм, а праворуч - майже бездомішковий матеріал GaAs. Така структура називається гетеропереходом з модульованим легуванням (рис. 2.4). Очевидно, що зони є плоскими, оскільки матеріал у цілому є електрично нейтральним, а легування носить однорідний характер.

Структура зберігає свою електричну нейтральність доти, поки електрони перебувають у своїх донорних атомах. Як тільки електрони залишають донорні

атоми (через теплову активацію при  $T > 0$  К), вони перетинають границю поділу й переходять у сусідню область із більш низькою потенційною енергією.

Там електрони втрачають свою енергію й виявляються захопленими в прикордонній області, тому що не можуть перебороти потенційний бар'єр і повернутися назад. Ці електрони виявляються просторово віддаленими від сильно легованої донорною домішкою області напівпровідника, звідки вони надійшли. Скотившись у потенційну яму, електрони індукують електростатичний потенціал, що (поряд із притяганням позитивно зарядженими іонами домішки) "притискає" їх до границі між матеріалами AlGaAs і GaAs. У результаті на границі гетеропереходу для електронів утвориться квантова яма із трикутним профілем розподілу потенціалу. Ширина квантової ями має порядок декількох нанометрів. У ньому енергетичні рівні для поперечного (уздовж осі  $y$ ) руху електронів виявляються квантованими, як і в прямокутних квантових ямах. Зайняті лише нижні енергетичні рівні. Однак електрони на цих рівнях можуть рухатися у двох інших напрямках ( $x$  і  $z$ ). Кожний такий рівень являє собою дно однієї із двовимірних підзон розмірного квантування. Так у слаболегованому вузькозонному напівпровіднику поблизу границі гетеропереходу утвориться двовимірний електронний газ (2 ДЕГ). Електрони в ньому заповнюють делокалізовані у двох напрямках стани.

Для формування 2 ДЕГ досить одного локалізованого в поперечному напрямку рівня. Модуляційне легування дає дві важливі переваги:

1) електрони виявляються віддаленими від донорних домішок, що послаблює їхнє розсіювання іонізованими домішками;

2) поблизу границі гетеропереходу утвориться двовимірний електронний газ. У зовнішнім електричному полі електрони в таких структурах рухаються дуже швидко через малість  $m^*$  в GaAs і відсутності розсіювання на домішках усередині квантових ям.

### 1.2.3 Дельта - леговані структури

Напівпровідникову структуру з істотно нерівномірним профілем

розподілу домішки, що характеризується локалізацією домішкових атомів у дуже тонкому внутрішньому шарі (в ідеалі – у межах одного моношару), називають дельта-легованою ( $\delta$ -легованою) структурою. Енергетична діаграма подана на рис. 1.5. Носії заряду в сильно легованій області зв'язані кулонівською взаємодією з домішковими атомами, які їх породжують, тому вони не йдуть далеко від області локалізації домішок. Електричне поле іонізованих домішкових атомів екранується полем вільних носіїв заряду. Для рухливих носіїв утвориться  $V$  - подібна квантова яма із просторовим розподілом потенціалу (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Енергетичні зони в дельта-легованій напівпровідниковій структурі

Енергетичні стани в ямі квантуються відповідно до ефекту квантового обмеження, що приводить до утворення двовимірних підзон, які заповнюються електронами аж до високих концентрацій.

Одним із прикладів  $\delta$ -легованих структур є структура, яка містить моноатомний шар кремнію, нанесений на монокристал GaAs і потім покритий епітаксіальним шаром GaAs. Донорні атоми Si, хоча й перерозподіляються внаслідок дифузії, залишаються в околі вихідного моноатомного шару. Область квантового обмеження для електронів становить  $\sim 10$  нм. Концентрація електронів у двовимірному ЕГ досягає високих значень ( $\sim 10^{14} \text{см}^{-2}$ ), але ціною зменшення рухливості.

Структури, що складаються з періодично розташованих  $\delta$ -легованих шарів з n-типом і p-типом провідності в металі із власною провідністю (і)

відомі як n-i-p-i структури. Коли концентрація донорів в n-шарі дорівнює концентрації акцепторів у р-шарі, вільні носії заряду не мають можливості рухатися в рівноважних умовах. Нерівновагі ж носії заряду, генеровані, наприклад, світлом, виявляються розділеними внутрішнім електричним полем. Їхній заряд змінює енергетичну зонну діаграму точно так само, як це відбувається у випадку рівноважних носіїв заряду. Такий же ефект досягається за рахунок додавання зовнішнього зсуву до n- і р-областям. Все це дає можливість ефективно управляти енергетичною діаграмою структури, що важливо для певних приладових застосувань.

#### 1.2.4 Балістичний транспорт носіїв заряду

Особливості транспорту носіїв заряду у ТТ визначаються процесами їхнього розсіювання при русі з однієї області в іншу. Електрон, зіштовхуючись із іншим електроном або розсіюючись на коливаннях решітки, дефектах, границі поділу змінює свій стан. Середня відстань, що електрон проходить між двома послідовними актами розсіювання, називають середньою довжиною вільного пробігу  $LL$ .

У макроскопічних розрахунках середня довжина вільного пробігу електронів  $LL$  набагато менше розміру цих систем  $L$  і транспорт здійснюється по дифузійному механізму. У наноструктурах умови для транспорту носіїв заряду істотно відрізняються. У них  $LL > L$  і перенос носіїв заряду відбувається без розсіювання. Такий перенос називають балістичним транспортом. У напівпровідниках  $LL > L$  і електрон пролітає від одного контакту до іншого практично без зіткнення з атомами кристалічних решіток. У металах  $LL$  не перевищує 10 нм ( $LL_M > L$ ) і перенос у них здійснюється по дифузійному механізму.

### 1.3 Структури із квантовим обмеженням за рахунок зовнішнього електричного поля

Електричний зсув напівпровідникових структур зовнішньою напругою, прикладеною через металевий затвор, широко використовується для керування потенційними бар'єрами на границях метал-напівпровідник і напівпровідник-діелектрик. Полярність на затворі дозволяє формувати в напівпровідниковій області, збагачені або збіднені носії заряду поблизу цих границь. Розмір таких областей істотно залежить від величини прикладеної напруги до затвору. Електрони або дірки можуть зазнавати в них квантове обмеження. Ці структури є електростатично індукованими нанорозмірними структурами.

#### 1.3.1 Структури метал-окисел-напівпровідник польових МОН транзисторів (MOS FET)

У сучасній технології взагалі (і в мікроелектроніці зокрема) величезне значення мають польові МОН транзистори (MOSFET). Транзистори цього типу утворені МОН структурою й двома  $p-n^+$  переходами, у яких напівпровідник  $n$ -типу сильно легований (рис. 1.5,а) і діє як джерело та як стік у польовому транзисторі. Затвором (керуючим електродом) такого транзистора виступає МОН-структура. Як напівпровідник звичайно використовується кремній  $p$ -типу, на якому термічним окислюванням вирощується тонкий шар підзатворного окислу.

На рис. 1.5,б показана енергетична діаграма МОН-структури на кремнії  $p$ -типу при досить сильному прямому (позитивному) зсуві.

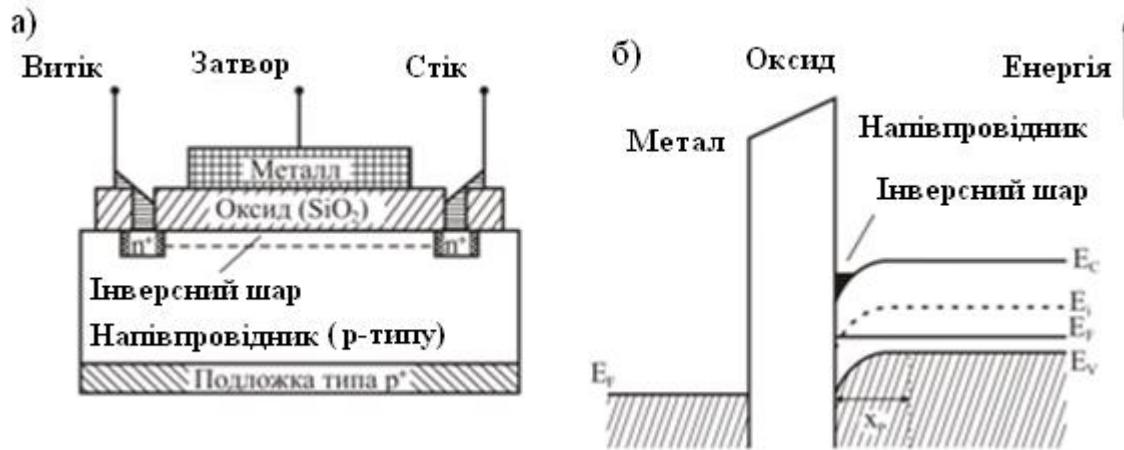


Рисунок 1.6 – Будова МОН транзистору: а) структура МОН транзистору; б) зонна діаграма МОН структури при досить сильному додатному зміщенні на вентилі

Принцип дії приладу полягає в наступному. Коли до затвора прикладається позитивний потенціал, електрони з  $n+$  області й електрони з обсягу  $p$ -кремнію притягаються й накопичуються в області границі  $\text{Si} - \text{SiO}_2$ . Такі електрони розташовуються в потенційної нанорозмірній ямі (майже трикутної форми) і утворюють так званий інверсний шар або канал. Така форма ями пояснюється наявністю просторового заряду іонізованих акцепторів у  $p$ -кремнії, що відповідають дірки, що "виштовхуються" електричним полем позитивно зарядженого затвора. У такій системі електрони в каналі здатні створювати струм при прикладанні потенціалу між джерелом і стоком, причому величина струму може модулюватися потенціалом затвора, оскільки кількість електронів в інверсному шарі залежить від напруженості електричного поля, прикладеного до оксиду. Саме внаслідок того, що поведінка таких приладів управляється електричним полем, вони одержали назву транзисторів з польовим ефектом або просто польових транзисторів.

### 1.3.2 Структури з розщепленим затвором

Електростатичний підхід використовують також для того, щоб "вирізати" квантові проволоки й точки із двовимірного електронного газу, який

утвориться, наприклад, при модуляційному й дельта - легуванні. Для цього використовують структури з розщепленим затвором (рис. 1.7). Металеві електроди затвора наносять на поверхню напівпровідника зі схованим шаром двовимірного електронного газу. При подачі на них зовнішнього від'ємного зсуву область напівпровідника, що знаходиться під ними, збіднюється електронами. Вільні електрони залишаються тільки у вузькій області, не підданій впливу електричного поля під затвором.

Збільшення зворотного зсуву на затворі приводить до розширення збідненої електронами області в околі розщеплених електродів, що дає можливість управляти геометрією індукованої низько-розмірної структури. Конструюючи розщеплені електроди відповідним чином, можна сформувати одномірні (смушковими електродами) або нуль-мірні (кільцевими електродами) структури. Найбільше ефективно це виходить у модуляційно-легованих зразках. Це пов'язано з тим, що для збіднення областей, які мають високу шарову концентрацію електронів ( $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ), необхідно прикладати напруги які більші напруги пробною бар'єру Шотткі на границі метал-напівпровідник.

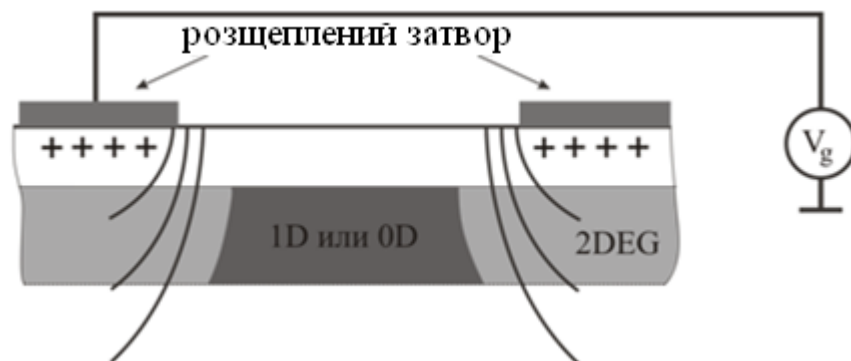


Рисунок 1.7 – Структура з розщепленим затвором, яка забезпечує формування одномірних і нуль-мірних елементів у прихованому шарі двовимірного електронного газу

## 1.4 Квантові ями

### 1.4.1 Модульовано-леговані квантові ями

Дуже часто, особливо в структурах із множинними квантовими ямами,

бажано було б мати справу із приблизно симетричними й прямокутними ямами, а не із трикутними ямами як у модульовано-легованих і дельта-легованих гетеропереходах. Приклад реалізації такої структури представлений на рис. 1.8 а, де показана симетрична квантова яма, утворена двома прилеглими один до одного (але протилежно спрямованими) гетеропереходами на основі розглянутої вище системи AlGaAs - GaAs. Напівпровідники із широкою забороненою зоною ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ) у цій структурі розташовуються на краях, а GaAs - у центральній частині. Припустимо, що відстань між двома поверхнями поділу стає досить малою. У такій ситуації утвориться практично прямокутна квантова яма (рис. 1.8. б) для дірок і для електронів, з однаковою висотою бар'єра на обох сторонах  $\Delta E_C$  і  $\Delta E_V$ .

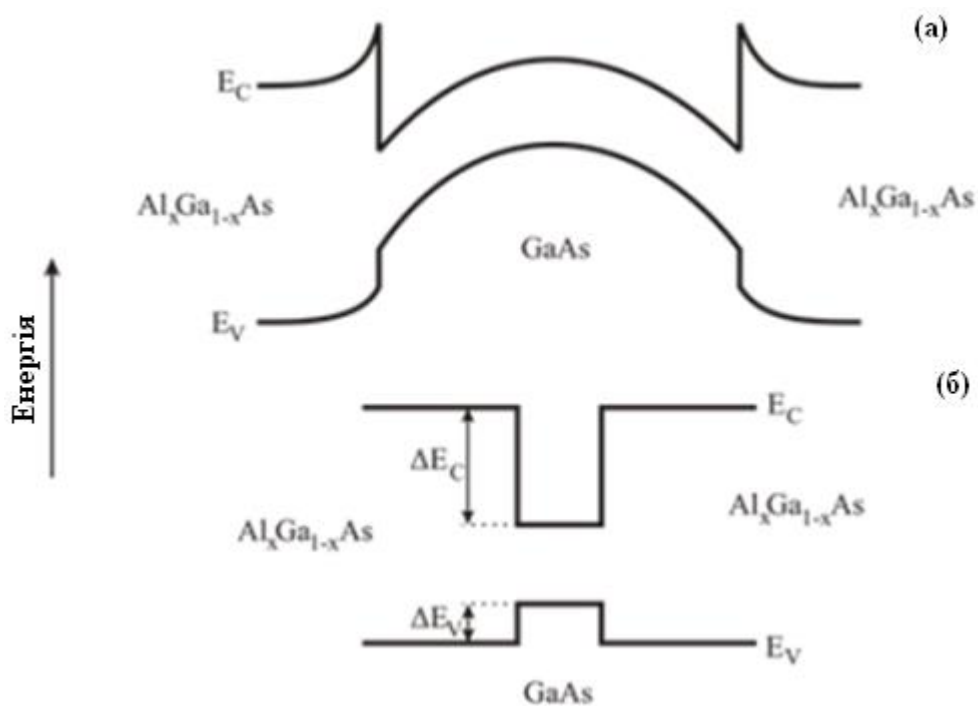


Рисунок 1.8 – Схематична зонна діаграма для квантової ями в модульовано-легованому матеріалі AlGaAs – GaAs - AlGaAs: (а) широка яма; (б) вузька яма

Особливо слід зазначити, що в такій ямі відсутній іонізовані донори, які розташовуються усередині бар'єрів AlGaAs, внаслідок чого електрони усередині ями (що виникають у прилягаючому донорному матеріалі AlGaAs) можуть рухатися в ямі GaAs або каналу з дуже високою рухливістю. Як і у випадку модульовано-легованих гетеропереходів, ця обставина може бути



використана для виготовлення високоякісних польових МОН - транзисторів при створенні відповідних контактів стоку й витoku.

Структури із квантових ям з високою або низькою рухливістю електронів можуть бути створені введенням у матеріали регульованих кількостей домішок. Наприклад, на основі подвійних квантових ям (з високою й низькою рухливістю електронів) можуть бути створені транзистори з модуляцією швидкості, у яких перемикання з одного стану в інший керується електричним полем, прикладеним поперечно до шарів напівпровідникових матеріалів, у результаті чого відбувається перерозподіл потоку носіїв заряду, а отже, і струму між ямами. Такі транзистори з модуляцією швидкості можуть працювати при дуже високих частотах.

#### 1.4.2 Множинні квантові ями

Сигнали, що надходять від окремої квантової ями, звичайно настільки слабкі, що їх важко використовувати для створення будь-яких твердотілих приладів, тому звичайно в реальних оптоелектронних приладах (наприклад, у фотодетекторах) застосовуються структури, сформовані із цілих наборів або масивів окремих квантових ям, які одержали загальну назву множинних квантових ям (MQW).

Звичайно говорять про два різні типи таких структур (рис. 1.9). Якщо ями, що відповідають електронам і діркам, мають однакову просторову локалізацію тобто розташовуються в одній і тій самій області, як показано на рис. 1.9 а, то відповідні структури називають MQW типу I. У тому випадку, коли ці ями розташовуються по черзі (рис. 1.9, б), структури MQW відносять до типу II.

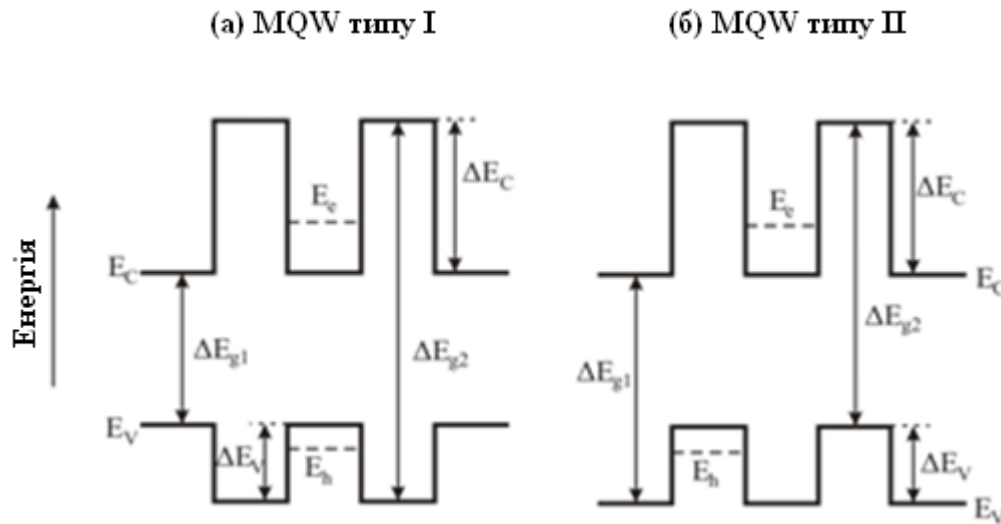


Рисунок 1.9 – Множинні квантові ями (MQW) типу I (а) і типу II (б)

У більшості випадків передбачається, що в MQW-структурах сусідні квантові ями не взаємодіють, оскільки бар'єри, що їх розділяють) є досить протяжними ( $\sim 10$  нм). Однак іноді, коли стінки бар'єрів стають досить тонкими, квантові ями виявляються зв'язаними одна з другою процесами тунельних переходів електронів з однієї в іншу. Можна показати, що при тунельному ефекті дискретні рівні енергії квантових ям перетворюються в енергетичні зони. Такі MQW-структури (їх прийнято називати надрешітками) являють дуже великий практичний інтерес, тому що їхні енергетичні спектри демонструють дуже багато цікавих особливостей.

В оптоелектроніці виготовляють і застосовують MQW-Структури, що містять 50 окремих квантових ям. Період такої структури (ширина ями+товщина бар'єру) становить близько 20 нм, у результаті чого повний розмір структури  $\sim 1$  мкм. Це значення звичайно й вважають межею товщини, оскільки будь-яке випромінювання буде поглинатися й не зможе досягати внутрішніх квантових ям.

## ВИСНОВКИ

У розділі наведена інформація про фізичні основи напівпровідникових квантових наноструктур. Це дає можливість отримати відомості про будову, принцип роботи, переваги та недоліки структур із квантовим обмеженням за рахунок внутрішнього та/або зовнішнього електричного поля.

Також розглянуто такі функціональні пристрої на основі резонансно-тунельного ефекту, зокрема різновиди: 1) Модуляційно-леговані польові транзистори; 2) Біполярні транзистори на гетеропереходах; 3) Транзистори на гарячих електронах; 4) Транзистори з резонансним тунелюванням.

Показано, що у теперішній час модуляційно-леговані польові транзистори домінують на ринку малошумячих приладів, тому що вони здатні працювати в дуже широкому діапазоні частот: від низьких частот до мікрохвильових близько 100 ГГц. У новітніх гетероструктурах систем AlGaAs-InGaAs-GaAs не тільки квантова локалізація електронів у ямах більш ефективна, ніж у гетеропереходах на основі AlGaAs-GaAs, але й електрони рухаються в шарі InGaAs з більше високою дрейфовою швидкістю насичення, ніж в GaAs. Крутість такого транзистора досягає значень 100 мС/мм, частота відсікання становить близько 100 ГГц, а рівень шумів становить лише 2 дБ.

У роботі вперше представлена нова схема затвора XOR з двома входами і нова схема затвора XOR з двома входами на основі узагальненого порогового затвора (GTG). Виконано моделювання для всієї комбінації входів і отримані результати. Конструкції RTD можуть запропонувати зниження кількості компонентів до 40% в порівнянні з еквівалентним сімейством логіки CMOS. Через порогову логіку стиль дизайну, який дозволяє підвищити низький рівень при паралельності обчислення множини вхідних сигналів перевага схем RTD зростає при порівнянні еквівалентних областей схеми. Основна причина полягає в тому, що конструкція порогової логіки виключає послідовне з'єднання транзисторів в XOR-подібних конфігураціях затворів. Через довгих послідовних з'єднань p-MOSFET в КМОН-пристроях значне збільшення площі споживання.

В результаті виконання роботи було показано, що:

1. Використання тунельно-резонансних структур, зокрема тунельно-резонансних діодів, є перспективним напрямком функціональної електроніки. Завдяки їх властивостям можна використовувати тунельно-резонансні структури в якості елементів з від'ємним диференціальним опором, електричних фільтрів і генераторів НВЧ електричних коливань.

2. Використання схем на тунельно-резонансних діодах дає можливість підвищити швидкодію пристроїв обробки інформації, де це є основним параметром, який завжди прагнуть зробити меншим.

3. Використання тунельно-резонансних діодів та транзисторів дає можливість розширити область використання напівпровідників, за рахунок використання тунельно-резонансної гетероструктури.

В економічній частині проведено розрахунок ефективності інвестицій та терміну окупності коштів, вкладених в наукову розробку логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором. Термін окупності інвестицій, що вкладені у реалізацію цього наукового проекту, складає 2,5 роки, а тому фінансування даної наукової розробки логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором є доцільним.

У розділі охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях були опрацьовані такі питання, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення товщини суцільного екрану для захисту від магнітної складової ЕМВ, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки при проведенні дослідження логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором, безпека у надзвичайних ситуаціях.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Осадчук В.С. Основи функціональної мікроелектроніки. Навчальний посібник / В.С. Осадчук. – В.: ВДТУ, 1998 – 245 с. Укр. Мовою
2. Осадчук В.С. Фізична наноелектроніка / Осадчук В.С., Осадчук О.В. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 146 с.
3. Осадчук В.С. Основи наноелектроніки / Осадчук В.С., Осадчук О.В. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 199 с.
4. Долманов И.Н. Полупроводниковые приборы с резонансным туннелированием электронов. Зарубежная радиоэлектроника / Долманов И.Н., Толстихин В.И., Еленский В.Г. - М.: Радио и связь. - №7, 1990. – С. 66-89.
5. [http://plasma.karelia.ru/pub/nano-kurs/NANO8\\_3tun.shtml](http://plasma.karelia.ru/pub/nano-kurs/NANO8_3tun.shtml)
6. <http://www.scientific.ru/journal/news/0803/n030803.html>
7. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. – М.: Высш. Шк., 1991. – 351 с.
8. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни “Твердотіла електроніка”.- Уклад. Ю.С.Кравченко – Вінниця: ВДТУ, 2001.
9. Петренко А.І. Моделювання резонансно-тунельного діоду / А.І. Петренко, Свірін П.В. // «Электроника и связь». Тематический выпуск «Проблемы электроники». Ч. 2. — 2005. — С. 116–119.
10. Иогансен Л.В. // ЖЭТФ. — 50, 709 (1966); 45, 207 (1963); 47, 270 (1964).
11. Тиходеев Ю.С. Электронная техника. Сер. 2 // Полупроводниковые приборы. — Вып. 1(73) / Тиходеев Ю.С. — 1973. — С. 3.
12. Brown E.R. Resonant Tunneling in High-Speed Double-Barrier Diodes / E.R. Brown. — Academic Press, 1992. — P. 469–498 (Hot Electrons in Semiconductor Nanostructures, Physics and Applications).
13. Chow D.H. Investigations of In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/AlAs Resonant Tunneling Diodes for High Speed Switching / D.H. Chow, J.N. Schulman, E. Ozbay, D.M. Bloom // Applied Physics Letters. — October, 5. — 1992. — Vol. 61, N 14. — P. 1685–1687.

14. Chevoir F. Calculation of Phonon-Assisted Tunneling and Valley Current in a Double-Barrier Diode / F. Chevoir, B. Vinter // *Applied Physics Letters*. — 1989. — Vol. 55, N 18. — P. 1859–1861.

15. Goldman V.J. Evidence of LO-Phonon Emission-Assisted Tunneling in Double-Barrier Heterostructures / V.J. Goldman, D.C. Tsui, J.E. Cunningham // *Physical Review B (Condensed Matter)* — 1987. — Vol. 36, N 4. — P. 7635–7637.

16. Mendez E.E. Resonant Tunneling Via X-Point States in AlAs–GaAs–AlAs Heterostructures / E.E. Mendez, W.I. Wang, C.E.T. Goncalves da Silva // *Applied Physics Letters*. — 1987. — Vol. 50, N 18. — P. 1263–1265.

17. Seabaugh A.C. Co-Integrated Resonant Tunneling and Heterojunction Bipolar Transistor Full Adder: International Electron Devices Meeting Technical Digest / A.C. Seabaugh, A.H. Taddiken, E.A. Beam III, J.N. Randall, Y.C. Kao, B. Newell. — Washington, DC, 1993 — P. 419–422.

18. Обухов И.А. Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах / Обухов И.А. — Севастополь: «Вебер», 2005. — 226 с.

19. Ye Q.Y. Resonant Tunneling Via Microcrystalline Silicon Quantum Confinement / Q.Y. Ye, R. Tsu, E.H. Nicollian // *Phys. Rev. B*. — 1991. — Vol. 44. — P. 1806.

20. Kamal Prakash Pandey, Rakesh Kumar Singh, Anil Kumar. Analysed Modulation Doped Fieled Effect Transister (MODFET) and Metal Oxide Semiconductor Modulation Doped Fieled Effect Transister ((MOS-MODFET)) using compound material silicon Germanium (SiGe) / *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 2, Issue 4, April 2013. — pp.1831-1834.

21. Mains R.K. Improved Boundary Conditions for the Time-Dependent Schrödinger Equation. / R.K. Mains, G.I. Haddad // *Journal of Applied Physics* — 1990. — Vol.1, N 67. — P. 591–593.

22. Yalabik M.C. Some Ad-Hoc Methods for Introducing Dissipation to the Schrödinger Equation: Proceedings of a NATO Advanced Workshop on Science and Engineering of One- and Zero-Dimensional Semiconductors, Cadiz, Spain, Mar. 29-Apr. 1 1989 / S. P. Beaumont, C. M. S. Torres, editors. — NATO Scientific Affairs

Division, 1989 — P. 83–89.

23. Tsu R. Tunneling in a Finite Superlattice. / R. Tsu, L. Esaki // *Applied Physics Letters*. — 1973. — Vol. 11, N 22. — P. 562–564.

24. Frensley W.R. Wigner-Function Model of a Resonant-Tunneling Semiconductor Device / W.R. Frensley // *Physical Review B*. — 1987. — Vol. 3, N 36. — P. 1570–1580.

25. Wigner E. On the Quantum Corrections for Thermodynamic Equilibrium / E. Wigner // *Physical Review* — 1932. — N 40. — P. 749–759.

26. Frensley W.R. Simulation of Resonant-Tunneling Heterostructure Devices / W.R. Frensley // *Journal of Vacuum Science and Technology B*. — 1985. — Vol. 4, N 3. — P. 1261–1266.

27. Kadanoff L.P. *Quantum Statistical Mechanics* / L.P. Kadanoff, G. Baym. — Benjamin/Cummings, Reading, MA, 1962.

28. Jauho P. Nonequilibrium Green Function Techniques Applied to Hot Electron Quantum Transport / P. Jauho // *Solid State Electronics* — 1989. — N 32(12) — P. 1265–1271.

29. Lake R. High-Bias Quantum Electron Transport / R. Lake, S. Datta // *Superlattices and Microstructures* — 1992. — N 11(1). — P. 83–87.

30. Frensley W.R. Boundary Conditions for Open Quantum Systems Driven Far from Equilibrium / W.R. Frensley // *Reviews of Modern Physics* — 1990. — N 62(3). — P. 745–791.

31. Jensen K.L. The Methodology of Simulating Particle Trajectories Through Tunneling Structures Using a Wigner Distribution Approach / K.L. Jensen, F.A. Buot // *IEEE Transactions on Electron Devices*. — 1991. — N 38(10). — P. 2337–2347.

32. Buot F.A. Lattice Weyl-Wigner Formulation of Exact Manybody Quantum-Transport Theory and Applications to Novel Solid-State Quantum-based Devices / F. A. Buot, K. L. Jensen // *Physical Review B*. — 1990. — N 42(15). — P. 9429–9457.

33. Baym G. *Lectures on Quantum Mechanics* / G. Baym. — Menlo Park, CA: Benjamin/Cummings, 1973.

34. Gardiner W. *Quantum Noise and Quantum Langevin Equations* / W. Gardiner // *IBM Journal of Research and Development*. — 1988. — N 32(1). — P.

127–136.

35. Gloesekotter P. Circuit and Application Aspects of Tunneling Devices in a MOBILE Configuration / P. Gloesekotter, C. Pacha, K.F. Gosser, W. Prost, S.O. Kim, H. van Husen, T. Reimann, F.J. Tegude // *International Journal of Circuit Theory and Applications*. — 2003. — Vol. 31, N.1.

36. Nikolic K. Relative Performance of Three Nanoscale Devices — CMOS, RTDs and QCAs — Against a Standard Computing Task / K Nikolic, D Berzon, M. Forshaw // *Nanotechnology*. — 2001. — N 12. — P. 38–43.

37. Свірін П. В. Підходи до фізичного моделювання резонансно-тунельних діодів / П. В. Свірін // *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. — 2008. — Т. 10, № 4. — С. 37-46.

38. Семенов А. О., Дячук Є. О., Мельник Я. В., Шейко Є. О. Радіотехнічні надвисокочастотні генераторні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», м. Вінниця, 14-16 листопада 2019 року. — Вінниця: ВНТУ, 2019. — С. 126-127.

39. Семенов А. О., Мельник Я. В., Дячук Є. О., Шейко Є. О. Оптико-електронні радіотехнічні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», м. Вінниця, 14-16 листопада 2019 року. — Вінниця: ВНТУ, 2019. — С. 128-129.

40. Семенов А. О., Шейко Є. О., Мельник Я. В., Дячук Є. О. Логічні радіо-імпульсні пристрої на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором. Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», м. Вінниця, 14-16 листопада 2019 року. — Вінниця: ВНТУ, 2019. — С. 130-131.

41. P. Mazumdar, S. Kulkarni, “Digital Circuit Applications of Resonant Tunneling Devices,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 4, Apr. 1998.



42. K. J. Chen, K. Maezawa and M. Yamamoto, "InP-B based High-Performance Monostable-Bistable Transition Logic Elements (MOBILE's) Using Integrated Multiple-Input Resonant-Tunneling Devices," *IEEE Electron Devices Letters*, Vol. 17, No. 3, March 1996.
43. K. J. Chen and G. Niu, "Logic Synthesis and Circuit Modeling of a Programmable Logic Gate Based on Controlled Quenching of Series-Connected Negative Differential Resistance Devices," *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 38, No. 2, Feb. 2003.
44. C. Pacha, U. Auer, C. Burwick, "Threshold Logic Circuit Design of Parallel Adders Using Resonant Tunneling Devices," *IEEE Transactions on (VLSI) Systems*, Vol. 8, No. 5, Oct. 2000.
45. M. J. Avedillo, J.M. Quintan, H. Pettenghi, "Multithreshold Threshold Logic Circuit Design Using Resonant Tunneling Devices," *Electronics Letters*, Vol. 39, No. 21, pp. 1502-1503, Oct. 2003.
46. M. J. Avedillo, J. M. Quintan, H. Pettenghi, "Increased Logic Functionality of Clocked Series-Connected RTDs," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 5, No. 5, Sept. 2006.
47. H. Pettenghi, M. J. Avedillo, J. M. Quintan, "Using Multi-Threshold Threshold Gates in RTD-Based Logic Design," *Elsevier, Microelectronics Journal*, Vol. 39, pp. 241-247, 2008.
48. K. S. Berezowski, "Compact Binary Logic Circuits Design Using Negative Differential Resistance Devices," *Electronics Letters*, Vol. 42, No. 16, 3rd August, 2006.
49. M. J. Avedillo, J. M. Quintana and H. Pettenghi, "Logic Models Supporting the Design of MOBILE-based RTD Circuits," *Proceedings of the 16th International Conference on Application-Specific Systems, Architecture and Processors (ASAP'05)*, 2005.
50. Mirhoseini S. M., Sharifi M.J., and Bahrepour D. New Three-Input XOR and XNOR Gates Based on MOBILE and Application to a Full Adder. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol 2, No. 5, November 2009. Pp. 234-238.

51. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
52. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
53. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
54. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
55. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвук та інфразвук.
56. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
57. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
58. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.
59. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
60. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
61. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
62. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
63. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
64. ДСанПіН 3.3.6-096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.

Додаток А  
(обов'язковий)  
ВНТУ

ПОГОДЖЕНО

“\_\_” \_\_\_\_\_ 2019 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри РТ ВНТУ,  
докт. техн. наук, професор  
О.В. Осадчук

“\_\_” \_\_\_\_\_ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи  
«Логічні радіо-імпульсні пристрої на основі резонансно-тунельних  
напівпровідникових структур із від'ємним диференціальним опором»  
08-36.МКР.016.00.000 ТЗ

Керівник роботи

д.т.н., проф., зав. кафедри РТ ВНТУ

\_\_\_\_\_ Осадчук О. В.

Виконавець: ст. гр. РТ-18м

\_\_\_\_\_ Шейко Є. О.

## 1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № 254 « 02 » 10 2019 р. та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: “ 02 ” вересня 2019 р.

Дата закінчення: “ 17 ” грудня 2019 р.

## 2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

*Метою роботи* є розроблення та дослідження логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором.

*Основною задачею* даної роботи є розроблення та дослідження можливості використання тунельно-резонансних діодів, як логічних елементів напівпровідникової електроніки.

*Задачами* дослідження є:

- розробка простих схем логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором;
- комп’ютерне схемотехнічне моделювання простих схем логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором;
- розрахунок електричних параметрів простих схем логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором;
- дослідження часових характеристик простих схем логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від’ємним диференційним опором;
- проведення розрахунків економічної частини та розділу охорони праці.

*Об'єктом дослідження* даної роботи є фізичні явища та ефекти, що відбуваються в є тунельно-резонансних діодах, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

*Предметом дослідження* є часові та частотні параметри і характеристики сигналів тунельно-резонансних транзисторів, як елементів функціональної електроніки, дія яких базується на тунельно-резонансному ефекті.

### 3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Джерела розробки:

1. Осадчук В.С. Основи функціональної мікроелектроніки. Навчальний посібник / В.С. Осадчук. – В.: ВДТУ, 1998 – 245 с. Укр. Мовою
2. Осадчук В.С. Фізична наноелектроніка / Осадчук В.С., Осадчук О.В. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 146 с.
3. Осадчук В.С. Основи наноелектроніки / Осадчук В.С., Осадчук О.В. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 199 с.
4. Долманов И.Н. Полупроводниковые приборы с резонансным тунелированием электронов. Зарубежная радиоэлектроника / Долманов И.Н., Толстихин В.И., Еленский В.Г. - М.: Радио и связь. - №7, 1990. – С. 66-89.
5. [http://plasma.karelia.ru/pub/nano-kurs/NANO8\\_3tun.shtml](http://plasma.karelia.ru/pub/nano-kurs/NANO8_3tun.shtml)
6. <http://www.scientific.ru/journal/news/0803/n030803.html>
7. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. – М.: Высш. Шк., 1991. – 351 с.
8. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни “Твердотіла електроніка”.- Уклад. Ю.С.Кравченко – Вінниця: ВДТУ, 2001.
9. Петренко А.І. Моделювання резонансно-тунельного діоду / А.І. Петренко, Свірін П.В. // «Электроника и связь». Тематический выпуск «Проблемы электроники». Ч. 2. — 2005. — С. 116–119.
10. Иогансен Л.В. // ЖЭТФ. — 50, 709 (1966); 45, 207 (1963); 47, 270 (1964).
11. Тиходеев Ю.С. Электронная техника. Сер. 2 // Полупроводниковые приборы. — Вып. 1(73) / Тиходеев Ю.С. — 1973. — С. 3.
12. Brown E.R. Resonant Tunneling in High-Speed Double-Barrier Diodes / E.R. Brown. — Academic Press, 1992. — P. 469–498 (Hot Electrons in Semiconductor Nanostructures, Physics and Applications).
13. Chow D.H. Investigations of In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/AlAs Resonant Tunneling Diodes for High Speed Switching / D.H. Chow, J.N. Schulman, E. Ozbay, D.M. Bloom // Applied Physics Letters. — October, 5. — 1992. — Vol. 61, N 14. — P. 1685–1687.

14. Козловський В. О., Лесько О. Й. Бізнес-планування: Навчальний посібник / В. О. Козловський, О. Й. Лесько [2-е вид., доп. та переробл.] – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, ВНТУ, 2008. – 241 с.

15. Козловський В. О. Інноваційний менеджмент : Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 210 с.

16. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

17. Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.

#### 4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки, студент групи РТ-18м Шейко Є. О.

#### 5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Здійснити аналіз тунельно-резонансного ефекту. Основна увага приділити фізичному механізму тунельно-резонансного ефекту, параметрам характеристикам тунельно-резонансних діодів. Розробити та дослідити нові функціональні пристрої на основі тунельно-резонансного ефекту.

Основними вимогами є:

– теоретично та модельно дослідити динамічні процеси в схемах логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;

Вихідні дані для розрахунку:

- діапазон частот генерації радіосигналів – 35..42 ГГц;
- коефіцієнт корисної дії 19,1%;
- струм живлення 12 мА при напрузі живлення 1,0 В;
- рівень напруги логічного нуля 0,101 В;
- рівень напруги логічної одиниці 0,707 В;
- рівень амплітуди напруги синхросигналів 0,75 В;
- час наростання переднього фронту імпульсів 160 пкс;
- час затримки 90 пкс;
- середня потужність 115 мкВт;
- максимальна потужність 665 мкВт.

## 6. ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	02.09.2019	15.09.2019	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі РТ
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	16.09.2019	22.09.2019	Проведений аналіз літературних джерел по даній тематиці. Підготовлений матеріал основних розділів	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	23.09.2019	02.10.2019	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження тем Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	03.10.2019	20.10.2019	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ Розділ 1- 2 Звіт по переддипломній практиці
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	21.10.2019	29.10.2019	Проведені розрахунки та дослідження	Розділ 3
6.	Розділ моделювання	30.10.2019	03.11.2019	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	04.11.2019	10.11.2019	Плакати. Структурні та електричні схеми	Графічна частина
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	11.11.2019	15.11.2019	Економічна частина	Розділ 4
9.	Охорона праці (ОП)	16.11.2019	22.11.2019	Частина БЖД	Розділ 5
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2019	27.11.2019	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11.	Нормоконтроль	28.11.2019	29.11.2019	Підпис нормоконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2019	06.12.2019	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13.	Захист МКР ЕК	09.12.2019	17.12.2019	Позитивний захист	Протокол ЕК

## 7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

У результаті виконання роботи будуть розроблені:

- електричні схеми логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- результати теоретичних досліджень параметрів і характеристик логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- результати розрахунків елементів логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- результати комп'ютерного моделювання параметрів і характеристик логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- економічна частина МКР, розділ охорони праці та цивільного захисту.

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі радіовимірювань:

- Вінницька філія державного концерну РРТ;
- ПАТ "Укртелеком".

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується підвищення точності та розширення функціональних можливостей обладнання радіотехнічних і телекомунікаційних систем із використанням радіотехнічних надвисокочастотних генераторних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором.

## 8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.



## 9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

## 10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- техніко-економічне обґрунтування розробки;
- електричні схеми логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- результати чисельних обрахунків і теоретичних досліджень логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- результати комп'ютерного моделювання параметрів і характеристик логічних радіо-імпульсних пристроїв на основі резонансно-тунельних напівпровідникових структур із від'ємним диференційним опором;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ.

## 11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б  
(обов'язковий)

ЛОГІЧНІ РАДІО-ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-  
ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ  
ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Результати аналізу перспективних напрямків розвитку функціональної  
мікроелектроніки

Додаток В  
(обов'язковий)

ЛОГІЧНІ РАДІО-ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-  
ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ  
ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Напівпровідникові структури із квантовим обмеженням за рахунок  
внутрішнього електричного поля

Додаток Д  
(обов'язковий)

ЛОГІЧНІ РАДІО-ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-  
ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ  
ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Будова та принцип дії діодів із тунельно-резонансною напівпровідниковою  
структурою

Додаток Е  
(обов'язковий)

ЛОГІЧНІ РАДІО-ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-  
ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ  
ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Радіо-імпульсні пристрої на основі резонансно-тунельних діодів для виконання  
логічних операцій XOR та XNOR

Додаток Ж  
(обов'язковий)

ЛОГІЧНІ РАДІО-ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-  
ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ  
ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Розроблення тривходових логічних елементів XOR і XNOR на основі  
резонансно-тунельних діодів за топологією топології GTG

Додаток К  
(обов'язковий)

ЛОГІЧНІ РАДІО-ІМПУЛЬСНІ ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ РЕЗОНАНСНО-  
ТУНЕЛЬНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ  
ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Результати комп'ютерного схемотехнічного моделювання