1. МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
2. СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
3. імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
4. Факультет\_\_\_\_\_\_\_\_інформаційних технологій та електроніки\_\_\_\_\_\_\_
5. (повне найменування факультету)
6. Кафедра\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_електронних апаратів \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_
7. (повна назва кафедри)
8. ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
9. до дипломного проекту (роботи)
10. освітньо-кваліфікаційного рівня \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_магістр \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_
11. (бакалавр, спеціаліст, магістр)
12. спеціальності \_\_\_\_153 «Мікро- та наносистемна техніка»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_
13. (шифр і назва спеціальності)
14. на тему

**Дослідження принципів побудови і функціонування спінтронних наноелектронних пристроїв.**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Виконав: студент групи МНТ-18дм | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | Жевжик В. С. |
| Керівник | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | к.т.н., доц.  О. М. Іванов |
| Завідувач кафедри | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | к.т.н., проф.  Ю.Е. Паеранд |
| Рецензент | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | д.т.н., проф.  В. М. Смолій |

1. Сєвєродонецьк – 2020

**СХІДНОУКРАІНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Інститут, факультет, відділення **інформаційних технологій та електроніки**

Кафедра **електронних апаратів\_\_\_**

Освітньо-кваліфікаційний рівень \_**магістр** \_

Напрям підготовки **153 «Мікро- та наносистемна техніка»**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ЕА

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

«\_\_\_»\_\_\_\_\_\_2020 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ**

**Жевжику Владиславу Сергійовичу**

1. **Тема проекту: Дослідження принципів побудови і функціонування спінтронних наноелектронних пристроїв.**
2. **Керівник проекту:** к.т.н., доцент О.М. Іванов

(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 14.04.2020 р. № 60/15.14

1. **Строк подання студентом проекту \_\_**20.06.2020 р.**\_**
2. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки** (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Вступ
   2. Літературний огляд
   3. Фізичні особливості нанорозмірних структур
   4. Матеріали для спінтроніки
   5. Спінтронні прилади
   6. Охорона праці
   7. Висновки
3. **Консультанти розділів проекту**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
| Завдання видав | Завдання прийняв |
| Охорона праці | доц. Іванов О.М. |  |  |

6. Дата видачі завдання\_\_\_\_\_\_\_\_9.03.2020 року\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Календарний план**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №  з/п | Назва етапів дипломного  Проекту (роботи) | Строк виконання  етапів проекту  (роботи) | Примітка |
| 1 | Вступ | 11.03.20 |  |
| 2 | Літературний огляд | 24.03.20 |  |
| 3 | Фізичні особливості нанорозмірних структур | 7.04.20 |  |
| 4 | Матеріали для спінтроніки | 30.04.20 |  |
| 5 | Спінтронні прилади | 02.05.20 |  |
| 6 | Охорона праці | 25.05.20 |  |
| 7 | Висновки | 08.06.20 |  |
| 8 | Оформлення пояснювальної записки | 10.06.20 |  |

Студент\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Жевжик В. С.

Керівник проекту\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_Іванов О.М.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| формат | зона | Поз. | | Позначення | | | | Найменування | Кіл. | | Примітка | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | | Текстові документи |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
| А 4 |  | 1 | | ДПМ 153.5 ПЗ | | | | Пояснювальна записка | 1 | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | | Графічні документи |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
| А4 |  | 2 | | ДПМ 153.5 ГЧ | | | | Графічна частина | 18 | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | | . |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  |  |  | |  | | | |  |  | |  | | | |
|  | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | |  | |  |  | ДПМ 153.5. ВП | | | | | | | |
|  |  | |  | |  |  |
| ЗМН | лист | | № докум. | | підпис | Дата |
| Розроб. | | | Жевжик | |  |  | Дослідження принципів побудови і функціонування спінтронних наноелектронних пристроїв | | | Літ. | | | лист | листів |
| Перевір. | | | Іванов | |  |  |  |  |  | 4 | 76 |
| Рецензент | | | Смолій | |  |  | СНУ ім. В.Даля гр.МНТ-18ДМ | | | | |
| Н. контр | | |  | |  |  |
| Затв. | | | Паеранд | |  |  |

**РЕФЕРАТ**

Изм.

Лист

№ докум.

Подпись

Дата

Лист

5

ДПМ 153.5 ПЗ

Разраб.

Жевжик

Провер.

Іванов

Реценз.

Смолій

Н. Контр.

Утверд.

Паеранд

Дослідження принципів побудови і функционування спінтронних наноелектронних пристроїв

Лит.

Листов

76

СНУ ім. В.Даля   
гр.МНТ-18ДМ

Пояснювальна записка до дипломного проекту містить:

Сторінок − 76, рисунків − 21, таблиць − 3, джерел літератури − 19

**Об'єкт дослідження** − Облаштування спінтроніки. Фізичні принципи функціонування.

**Мета роботи −** Дослідження принципів побудови, функціонування і технології виготовлення спінтронних наноелектронних пристроїв. Розробка заходів по охороні праці і техніки безпеки при виробництві і експлуатації електронних приладів.

При виконанні цієї роботи були досліджені основні фізичні процеси, що лежать в основі функціонування спінтронних приладів і нанопристроїв на основі різних квантово-розмірних наноструктур. Досліджені можливі шляхи рішення проблем що стоять на шляху розвитку спінтроніки, як новому ступені розвитку сучасної електроніки. Розглянуті конструкції і принципи функціонування різних спінтронних приладів: нанотранзисторів, сенсорів, пристроїв, що запам'ятовують, пристроїв прочитування інформації. Розглянуті їх перспективні моделі, конструкції і основні характеристики. Розроблені заходи по техніці безпеки і рекомендації при роботі з електронними приладами.

**СПІНТРОНІКА, СПІН, ФЕРОМАГНЕТИК, ПАРАМЕГНЕТИК, СПІНОВИЙ ТРАНЗИСТОР, МАГНИТООПІР.**

**Зміст**

[Список умовних скорочень 7](#_Toc42762902)

[Вступ 8](#_Toc42762903)

[1 Літературний огляд 11](#_Toc42762904)

[1.1 Момент імпульсу і спин 11](#_Toc42762905)

[1.2 Магнітний резонанс 14](#_Toc42762906)

[2 Фізичні особливості нанорозмірних структур 19](#_Toc42762907)

[2.1 Квантове обмеження 19](#_Toc42762908)

[2.2 Тунелювання носіїв заряду 22](#_Toc42762909)

[2.3 Спінові ефекти 27](#_Toc42762910)

[3 Матеріали для спінтроніки 33](#_Toc42762911)

[3.1 Мультиферроіки 35](#_Toc42762912)

[3.2 Магнітні напівпровідники 38](#_Toc42762913)

[3.3 Спінелектроні шаруваті структури 39](#_Toc42762914)

[4 Спінтронні прилади 43](#_Toc42762915)

[5 Охорона праці 62](#_Toc42762916)

[5.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих виробничих   
факторів та негативних факторів, які виникають у надзвичайних випадках 62](#_Toc42762917)

[5.2 Заходи з безпеки життєдіяльності 64](#_Toc42762918)

[5.3 Розробка заходів з екології 69](#_Toc42762919)

[5.4 Утилізація 71](#_Toc42762920)

[Висновки 74](#_Toc42762921)

[Список літератури 75](#_Toc42762922)

# Список умовних скорочень

ДП – друкована плата;

EПР − електронний парамагнітний резонанс;

ЕРЕ – електронний радіо елемент;

МОЗП − магнітний оперативний запам’ятуючий пристрій;

МТТ – магнітний тунельний транзистор;

ОЗП – оперативний запам’ятуючий пристрій;

ПМ − парамагнетик;

ПОЕ – правила обслуговування електроустановок;

ГДК − гранично допустима концетрация;

СКТ – спін-клапанний транзистор;

ФМ − феромагнетик;

НІС − надвелика інтегральна схема;

ЯМР − ядерний магнітний резонанс.

# Вступ

Наноелектроніка є новою галуззю науки і техніки, що формується на основі останніх досягнень фізики твердого тіла, квантової електроніки, фізичної хімії і технології напівпровідникової електроніки. Дослідження в області наноелектроніки важливі для розробки нових принципів, а разом з ними і нового покоління надмініатюрних супершвидкодіючих систем обробки інформації.

Особливість наноелектронних приладів і пристроїв - прояв, разом з класичними явищами, квантових ефектів, які багато в чому є паразитними в роботі звичайного транзистора. Проте ж саме на основі цих ефектів в наноелектроніці створюються нові прилади і пристрої. Розглянемо деякі аспекти розвитку мікроелектроніки і зародження наноелектроніки.

У приладах і пристроях наноелектроніки використовуються граничні можливості електричних, магнітних, механічних і біологічних систем. Нині наноелектронні прилади і пристрої в основному асоціюються з інформаційними технологіями. Проте з часом нанопристрої відіграватимуть важливу роль в процесах перетворення енергії, організації захисту довкілля, в медичному обслуговуванні людей [1].

Технології перетворення речовини по стратегії «згори-вниз», а також відкриття в області синтезу і самосбірки нанорозмірних структур привели до ряду яскравих відкриттів. Саме вони змінили уявлення про можливість наноструктур, не пов'язаних з p - n- переходами. Серед таких відкриттів:

* створення вуглецевих нанотрубок, а потім графеноних монокристалів;
* застосування зондів скануючих тунельних мікроскопів і атомно-силових мікроскопів для атомного складання окремих наноелектронних пристроїв;
* використання спінів як носіїв інформаційних сигналів;
* створення транзисторів на гетероперехідах, резонансних тунельних діодів і оптоелектронних пристроїв з квантовими ямами;
* виявлення квантового ефекту кулонівської блокади і створення одноелектронних елементів, працюючих при кімнатній температурі;
* розробка хімічних методів синтезу нанокристалів і методів їх об'єднання у більші і впорядковані структури;
* використання у виробництві нанопристроїв, біомолекул і надмолекулярних структур;
* складання окремих молекулярних елементів у функціональне облаштування типу інтегральної схеми шляхом з'єднання мікро- і макрорівнів організації молекулярних електронних пристроїв.

Спінтроніка за визначенням це «електроніка на основі перенесення спіна». У її основу закладено поняття спіна електрона. Cогласно принципу квантування проекції спіна на вибрану ось, електрони розділяють на два типи носіїв струму : електрони із спіном вгору і електрони із спіном вниз (½ чи -½). По суті, в природі є вже готовий переносник двійкової інформації, що кодує у напрямі спіна або 1, або 0.

У наш час спінтроніка вивчає магнітні і магнітооптичні взаємодії в металевих і напівпровідникових наногетероструктурах, динаміку і когерентні властивості спінів в конденсованих середовищах, а також квантові магнітні явища в структурах нанометрового розміру. Разом з раніше відомими магнетиками у міру розвитку спінтроніки з'являються нові : магнітні напівпровідники, речовини, в яких можна контролювати магнітні, напівпровідникові і оптичні властивості.

Експериментальна техніка спінтроніки включає магнітооптичну спектроскопію з високим тимчасовим дозволом, мікромеханічну магнітометрію, атомну і магнітосилову скануючу мікроскопію субатомного дозволу, спектроскопію ядерного магнітного резонансу і багато що інше. Хімічні, літографічні і молекулярнокластерні технології дозволяють створювати для спінтроніки різноманітні наноструктури з необхідними магнітними властивостями. Спінтронна технологія має багато достоїнств. Одні з важливіших − швидкість і економічність. Спін електрона можна перемикати з одного стану в інший за багато менший година, ніж вимагається на переміщення заряду за схемою, і з меншими витратами енергії. Плюс до цього, при зміні спіна не змінюється кінетична енергія носія, а, отже, майже не виділяється тепло.

В сукупності усі ці особливості технології дозволяють створювати на базі спіна і спінових струмів (потоків електронних спінів однієї полярності) нові транзистори, осередки логіки і пам'яті, які замінять собою звичайні транзистори в інтегральних мікросхемах. А це, у свою чергу, дозволить дотримуватися тенденції до мініатюризації, яка спостерігається упродовж усієї мікроелектронної епохи.

У цій роботі проведено дослідження принципів побудови, функціонування і технології виготовлення спінтронних наноелектронних пристроїв.

# 1 Літературний огляд

## 1.1 Момент імпульсу і спин

При розгляді багатьох розділів наноелектроніки, зокрема, присвячених спінтрониці і квантовим комп'ютерам, необхідно використати поняття моменту імпульсу і спіну часток.

Сукупність операторів 𝑙=𝑙𝑥, 𝑙𝑦, 𝑙𝑧, визначенних співвідношенням (1.1), представляє оператор моменту імпульсу. Оператор квадрата модуля моменту імпульсу визначається наступним рівнянням: [1].

(1.1)

Оператори проекцій моменту імпульсу попарно не комутують, тобто вони не можуть одночасно мати певних значень. В той же час кожен з операторів проекцій моменту імпульсу комутує з оператором .

Внаслідок цього стану електрона в атомі характеризують повним моментом імпульсу 𝑙 і одній з його проекцій, які набувають дискретних значень, тобто *квантуються.* Дві інші проекції моменту імпульсу не мають певного значення в цих станах.

Квантова механіка дає формули квантування квадрата моменту імпульсу електрона і його проекції 𝑙𝑧 на деякий напрям 𝑧:

(1.2)

(1.3)

Тут *орбітальне квантове число* 𝑙 і *магнітне квантове число* *m* набувають цілочисельних значень:

(1.4)

Оператор моменту імпульсу 𝑙 пов'язаний з «круговим» (орбітальним) рухом частки. Якщо частка заряджена, то її «обертальний рух», тобто наявність моменту імпульсу, породжує аналог замкнутого струму з відповідним *магнітним моментом.* Окрім цього, ряд експериментів вказує на існування у часток не лише моменту імпульсу, але і додаткового власного моменту імпульсу, не залежного від орбітального руху. Цей момент імпульсу називається *спіном.* Спін це істотно квантова і одночасно релятивістська характеристика мікрочасток [2].

Послідовний теоретичний опис спіна часток може бути виконаний тільки у рамках релятивістської квантової механіки. Т. Дирак показав, що квадрат модуля відповідного механічного моменту (спіна) квантується, причому формула квантування спіна аналогічна вираженню (1.5) для орбітального моменту:

(1.5)

Проте значення спінового квантового числа 𝑠, визначуване з теорії Дирака, не обов'язково має бути цілим як орбітальне квантове число l. У елементарних частках, таких, як електрон, протон, нейтрон 𝑠 = 12. Це означає, що для таких часток можливі тільки дві різні проекції спінового моменту імпульсу на довільну ось (чи, як то кажуть, дві орієнтації спіна):

(1.6)

Повний момент імпульсу частки (електрона) складається із спіна і момента імпульса орбітального руху. Оператор повного моменту імпульсу є сумою відповідних операторів:

(1.7)

Власні значення оператора квадрата повного моменту імпульсу:

(1.8)

За правилом складання моментів в квантовій механіці за умови незалежності систем число 𝑗 пробігає наступний ряд значень:

(1.9)

Частки з масою спокою, відмінною від нуля, що мають момент імпульсу, мають також і магнітний момент. Відношення магнітного моменту 𝜇 до механічного 𝑙 називається гіромагнітним відношенням 𝛾. Для орбітального руху електрона:

(1.10)

де 𝑐 — швидкість світла у вакуумі, тобто маса спокою і модуля заряду електрона.

Зручно ввести величину, яка називається *магнетон Бора*:

(1.11)

Тоді оператори магнітного моменту і орбітального моменту імпульсу електрона пов'язані простим співвідношенням:

(1.12)

Оператори власного магнітного моменту і спіна електрона пов'язані аналогічним співвідношенням:

 (1.13)

з тією лише різницею, що спінове гіромагнітне відношення удвічі більше орбітального.

Необхідно відмітити, що оскільки маса нуклона у 1840 разів більше маси електрона, то магнітний момент нуклона визначається *ядерним магнетоном* [2].

## 1.2 Магнітний резонанс

Існування магнітного моменту у електрона і ядра атома призводить до виникнення в певних умовах резонансних явищ. Явище магнітного резонансу слід розглядати у рамках квантової механіки. Проте можлива і його наочна інтерпретація з позицій класичної механіки.

Якщо на тіло (частку, що має момент імпульсу), що обертається, подіяти якою-небудь силою (непаралельній осі), то ось обертання почне зміщуватися в напрямі, перпендикулярному напряму діючої сили. Це явище називається *прецесією*.

На заряджену частку, що має момент імпульсу і магнітний момент, що відповідає йому, в постійному магнітному полі також діє сила, що викликає процесію осі обертання. Рух вектору магнітного моменту 𝜇 в цьому випадку визначається рівнянням:

(1.14)

де 𝛾 - гіромагнітне відношення, µ𝐵 - вектор магнітної індукції.

Для рішення цього рівняння доцільно ось спрямувати впродовж вектора постійного магнітного полю і представити в декартових координатах векторне рівняння , вважая, що , . В результаті отримуємо систему рівнянь:

(1.15)

(1.16)

(1.17)

Рішення цієї системи рівнянь дає де , а для виходить вираження Результуючий вектор проекції магнітного моменту на ось обертається в площині з кутовою швидкістю . Рівняння (1.17) показує, що проекція вектора магнітного моменту на ось постійна. Описана ситуація ілюструється рис. 1.1.

Виникаюче обертання вектору моменту імпульсу називається *ларморовскою процесією*, а частота - *ларморовскою частотою.* При прецессії кут між вектором магнітного моменту осью залишається постійним. Також постійна енергія магнітного моменту в полі , пропорційна скалярному твору векторів та .

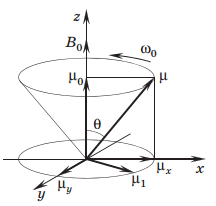


Рис. 1.1 − Ілюстрація рівняння (1.17), при якому проекція вектору магнітного моменту на ось 𝑧 постійна

Прикладемо тепер додаткове змінне синусоїдальне магнітне поле , спрямоване для визначеності уздовж осі 𝑥, як показано на рисунці 1.2.

Рух в цьому випадку буде дещо складніший. Для його аналізу представимо змінне синусоїдальне магнітне поле у вигляді суми двох магнітних полів, що рівномірно обертаються з частотою зміни поля у протилежних напрямах в площині 𝑥𝑦 [4].

Припустимо тепер, що частота змінного поля співпадає з ларморовскою частотою процессії вектора магнітного моменту в постійном полі . У цьому випадку в системі координат, що обертається разом з сектором магнітного моменту, одна з компонент поля , котра обертається в тому ж напрямі, що і вектор магнітного моменту , буде нерухомою. Цей компонент викличе додаткову процесію вектору магнітного моменту навколо осі, що обертається . Друга складова поля буде призводити до періодичних коливань вектору магнітного моменту, які в даному випадку не істотні.

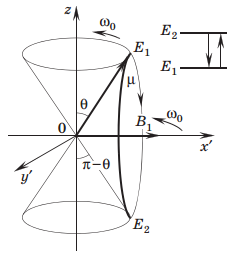


Рис. 1.2 − Ілюстрація рівняння (1.17), у разі додатка додаткове змінне синусоїдальне магнітне поле , спрямованого уздовж осі 𝑥

Зазвичай напруженість змінного магнітного поля значно менше напруженості постійного поля . Тому прецессія навколо осі, що обертається відбувається значно повільніше, ніж навколо осі. У лабораторній системі координат магнітний момент описує складну траєкторію по сферичній поверхні. У описаному випадку кут між напрямом вектору магнітного моменту та осью вже не постійний, а змінюється від значення до . Такий рух називається *нутацією*. Це явище носить резонансний характер. Для електрона воно називається *електронним парамагнітним резонансом* (ЕПР), а у разі ядерного магнітного моменту — *ядерним магнітним резонансом* (ЯМР).

Якщо розглядати це явище, грунтуючись на принципах квантової механіки, то безперервну зміну кута 𝜃 слід замінити дискретними скачками, які відповідають дискретним значенням проекції вектору магнітного моменту на ось *𝑧*.

Енергія взаємодії магнітного диполя з полем визначається в классичному випадку формулою . Для отримання оператора взаємодії слід замінити в цьому вираженні фізичні величини їх квантовими аналогами:

(1.18)

(1.19)

де – гіромагнітне співвідношення, – оператор проекції повного момента импульса.

Звідси видно, що значення енергії частки визначається вираженням:

(1.20)

де 𝑚 − сумарне магнітне квантове число, що приймає дискретний ряд значень.

Таким чином, енергетичні рівні 𝐸𝑚 є еквідистантними з різницею енергій між сусідніми рівнями.

(1.21)

Якщо на систему накладається додаткове змінне магнітне поле з частотою, близькою до частоти , можливі індуковані переходи між рівнями. Частота таких переходів співпадає з ларморовскою частотою [6].

Таким чином, з точки зору квантової механіки магнітний резонанс представляється таким чином. У відсутність магнітного поля енергія електрона, що має магнітний момент, не залежить від магнітного квантового числа 𝑚. Це очевидно, оскільки немає зовнішнього поля, немає виділеного напряму в просторі, і енергія електрона залежить тільки від квадрата моменту імпульсу (аналог класичного обертання). В цьому випадку енергія електрона визначається квантовим числом 𝑙. Говорять, що існує звиродніння рівня енергії по квантовому числу 𝑚. Включення зовнішнього магнітного поля призводить до того, що стану з різною проекцією моменту імпульсу починають розрізнятися по енергії. З одного рівня енергії, що характеризувався квантовим числом 𝑙, виходить 2𝑙+1 рівней енергії з різними числами 𝑚, тобто наявність магнітного поля знімає звиродніння енергетичного стану. Якщо додатково впливати на електрон зовнішнім змінним магнітним полем, то при рівності частоти діючого поля частоті переходу між рівнями має місце ЕПР, тобто відбувається вимушений перехід електрона.

# 2 Фізичні особливості нанорозмірних структур

## 2.1 Квантове обмеження

У нанорозмірній структурі вільний рух електрона обмежений, принаймні, в одному напрямі, а саме в напрямі (чи напрямах), в якому геометричний розмір цієї структури порівнянний з довжиною хвилі, що відповідає цьому електрону, тобто з довгої хвилі де Бройля (2.1):

, (2.1)

У напрямі, що обмежує вільний рух електрона в нанорозмірній структурі, потенційна енергія електрона може бути представлена у вигляді нескінченно глибокої прямокутної потенційної ями - тобто квантовим колодязем з нескінченно високими краями [6], як це показано на рис. 2.1.

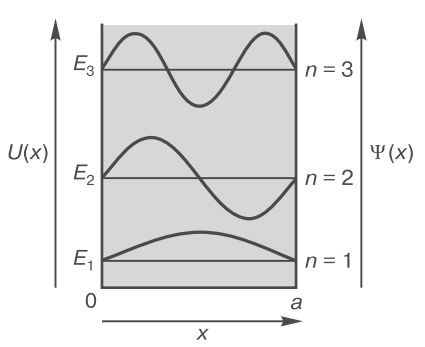


Рис. 2.1 − Хвилеві функції електрона в потенційній ямі

Нескінченно високий потенційний бар'єр робить неможливим знаходження електрона за межами області 0 <*х*< а. Таким чином, хвилева функція електрона повинна перетворюватися на нуль на межах потенційної ями, тобто при х = 0 і х = а. Такій умові відповідає лише обмежений набір хвилевих функцій. Це - стоячі хвилі з довжиною *λ* (2.2) визначуваною співвідношенням:

, (2.2)

Як наслідок, енергії дозволених енергетичних станів електрона в ямі теж опиняються дискретними. Спектр цих станів в ямі з нескінченною висотою стінок (потенційних бар'єрів, що обмежують яму) і шириною *a* має вигляд (2.3) :

, (2.3)

Ціле число *n* є квантовим числом, що означає квантовий стан. Таким чином, електрон, поміщений в обмежену область простору, може займати тільки дискретні енергетичні рівні. Найнижчий стан має енергію:

, (2.4)

Слід мати на увазі, що величина енергетичного проміжку між дозволеними станами електрона в квантовій ямі залежить від потенційного рельєфу стінок ями.

Задаючи певний потенційний рельєф стінок ями, можна набувати як потрібного для приладової реалізації значення мінімальної енергії, так і необхідні проміжки між дозволеними енергетичними станами електронів (дірок) в ямі.

Обмеження руху електронів (дірок) в низькорозмірній структурі, що приводить внаслідок їх квантово-хвилевої природи до кінцевого (ненульовому) мінімального значення їх енергії і до дискретності енергій дозволених станів, називають квантовим обмеженням [5].

У твердих тілах квантове обмеження може бути реалізоване в трьох просторових напрямах. Число напрямів, в яких ефект квантового обмеження відсутній, використовується як критерій для класифікації елементарних низькорозмірних структур за трьома групами: квантові плівки, квантові шнури і квантові точки (рис 2.2).

**Квантові плівки** є двовимірними (2D) структурами, в яких квантове обмеження діє тільки в одному напрямі, − перпендикулярно плівці. Носії заряду в таких структурах можуть вільно рухатися в площині *ху.* Їх енергія складається з дискретних значень, визначуваних ефектом квантового обмеження у напрямі z і безперервних складових в напрямах х та у.

Електрони в квантових плівках зазвичай називають двовимірним електронним газом.

**Квантові шнури** − це одновимірні (1D) структури. На відміну від квантових плівок, вони мають не один, а два нанометрові розміри, у напрямі яких і діє ефект квантового обмеження. Носії заряду можуть вільно рухатися тільки в одному напрямі − уздовж осі шнура.

**Квантові точки** − це нуль мірні (0D) структури, в яких рух носіїв заряду обмежений в усіх трьох напрямах.

Через схожості енергетичних характеристик атомів і квантових точок останні іноді називають «штучними» атомами. Квантові точки складаються з порівняно невеликого числа атомів. В цьому відношенні до них близькі атомні кластери і нанокристаліти (кристаліти нанометрових розмірів), де також має місце ефект квантового обмеження [1].

Розглянуті елементарні низькорозмірні структури в певному значенні є об'єктами, що ідеалізуються. Очевидно, що низькорозмірні структури, що представляють практичний інтерес, повинні розташовуватися на якій-небудь підкладці і мати контакт з іншими структурами і функціональними елементами. Більше того, приладові застосування вимагають комбінації декількох елементарних структур.

Для виготовлення низькорозмірних структур використовують два принципові підходи, які можна охарактеризувати як «геометричний» і «електронний». Геометричний підхід припускає залучення технологій, що забезпечують формування об'єктів з нанометровими розмірами. Для цього застосовуються спеціальні нанотехнологічні прийоми, які будуть описані в другому розділі.

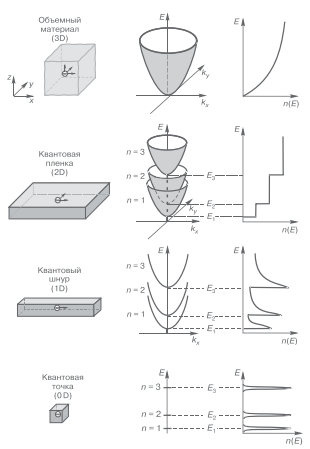


Рис. 2.2 − Низькорозмірні структури та їх енергетичні діаграми

## 2.2 Тунелювання носіїв заряду

Термін «тунелювання» означає перенесення частки через область, обмежену потенційним бар'єром, висота якого більше повної енергії цієї частки (чи проникнення частки в цю область). Такий ефект неможливий з точки зору класичної механіки, проте має місце для квантових часток, яким, як відомо, властивий корпускулярно-хвильовий дуалізм. Хвилеві властивості квантових часток приводять і до іншого, аномальному з точки зору класичної механіки, ефекту − надбар’єрному відображенню. Основні закономірності цих явищ розглянуті нижче [1].

Взаємодія квантових часток з різними потенційними бар'єрами ілюструє рис. 2.3.

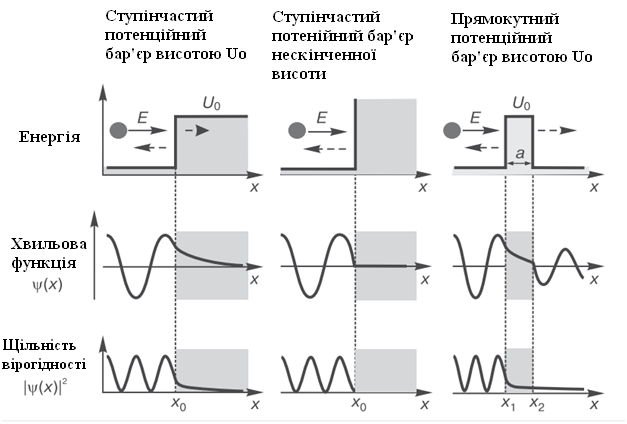


Рис. 2.3 − Взаємодія частки з потенційним бар'єром різної конфігурації

У квантової механіки рух частки в одновимірному потенційному полі описується рівнянням Шредингера (2.5):

, (2.5)

Якщо енергія квантової частки більше висоти ступінчастого бар'єру (*E>U0*), то в області перед потенційним бар'єром, де U=0, рішення рівняння Шредингера має наступний вигляд (2.6):

*,* (2.6)

При х→∞ хвильова функція над потенційним бар'єром частки має наступний вигляд (2.7):

, (2.7)

Коефіцієнт проходження частки через кордон потенційного панів' єру, визначуваний як відношення щільності потоку в минулій хвилі до щільності потоку в хвилі, що падає, рівний:

(2.8)

Для областей та рівняння Шредингера (2.5) можна записати в наступному вигляді:

(2.9)

Отримуємо

(2.10)

Рішеннями цих рівнянь є експоненціальні функції (2.11), які в загальному вигляді записуються таким чином:

, (2.11)

Вирази (2.11) при є суперпозицією плоских хвиль, що поширюються в позитивному (плюс в показнику експоненти) і негативному (мінус в показнику експоненти) напрямах осі x. Квадрат амплітуди хвилі пропорційний щільності потоку вірогідності (2.12):

(2.12)

Для потоку часток, що падає на бар'єр, припустимо, що 𝐴1 = 1. Для визначення інших коефіцієнтів треба скористатися умовами, що накладаються на хвилеву функцію, а саме функція і її похідна мають бути безперервні. Тому при 𝑥 = 0 повинні виконуватися граничні умови:

(2.13)

З урахуванням співвідношень (2.11) можна визначити A2 і В1. Що стосується В2, то цей коефіцієнт дорівнює нулю, оскільки в області x > 0 немає відбитих хвиль, що поширюються в негативному напрямі осі x. В результаті отримаємо систему рівнянь :

– з умови (2.11),

– з умови (2.11).

Рішення цієї системи має вигляд:

(2.14)

Бачимо, що частки випробовують вираз навіть якщо їх енергія вища за потенційний бар'єр. Відношення відповідних потоків вірогідності, тобто коефіцієнт відображення 𝑅 і проходження 𝐷 будуть рівні:

(2.15)

Розглянемо наступний випадок . При цьому — уявна величина, яку зручно записати у вигляді , де . Тоді відбита хвиля запишеться в виді:

(2.16)

Відбиття приводе до зміненню фази хвилі, а коефіцієнт відбиття

(модуль комплексного числа дорівнює одиниці). При цьому частки все ж таки проникають в область , так як , але хвильова функція в цій області експоненціально затухає.

(2.17)

Уявний хвильовий вектор яĸ в цьому випадку представляє коефіцієнт загасання. Щільність вірогідності (2.16) того, що частиця знаходиться в точці *d,* дорівнює:

(2.18)

Проникнення часток в область забороненої енергії представляє специфічний квантовий ефект, що дістав назву тунельного ефекту.

В електроніці часто трапляється ситуація, коли електрон взаємодіє з бар'єром кінцевої протяжності (рис. 2.4).

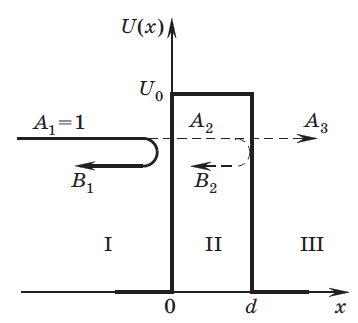


Рис. 2.4 − Взаємодія частки з потенційним бар'єром

Вірогідність проходження частки через потенційний бар'єр визначається його шириною (товщиною) *d* та высотою . Так, коефіцієнт проходження *D*, або коефіцієнт прозорості бар'єру, рівний відношенню , відповідно до формул (2.15, 2.16) записується у виді (2.19):

(2.19)

Таким чином, електрони можуть проходити через потенційні бар'єри, що перевищують їх енергію. Проте потік минулих часток експоненціально зменшується із зростанням товщини і висоти бар'єру, а також маси *m* часток. Тому істотна щільність струму може спостерігатися тільки у разі тонких потенційних бар'єрів малої енергетичної висоти.

Тунелювання електронів є досить загальним явищем для твердотілих структур. Одна з особливостей пов'язана з дискретною природою переносимого електронами заряду і виявляє себе в явищі, яке дістало назву «Одноелектронне тунелювання».

Інша особливість визначається дискретністю енергетичних станів носіїв заряду в напівпровідникових наноструктурах з квантовими колодязями, яка виникає через квантове обмеження. Тунельне перенесення носіїв заряду через потенційний бар'єр з певного рівня в емігруючу область на енергетично еквівалентний йому рівень в квантовому колодязі відбувається зі збереженням енергії і імпульсу електрона.

Такий збіг рівнів призводить до зростання тунельного струму (ефект резонансного тунелювання). Більш того, в наноструктурах, що містять магнітні і немагнітні матеріали, певна спінова поляризація електронів робить вплив на вірогідність їх тунелювання через потенційні бар'єри. Це явище лежить в основі функціонування ряду спінтронних приладів [5].

## 2.3 Спінові ефекти

Спін, будучи одним з фундаментальних характеристик електрона, призводить до появи нових особливостей транспорту носіїв заряду в наноструктурах. Спінові ефекти виникають, коли в матеріалі з'являється спіновий дисбаланс заселеності.

Такий дисбаланс зазвичай є присутнім у феромагнітних матеріалах, у яких щільність вакантних станів для електронів з різними спинами практично ідентична, проте ці стани істотно розрізняються по енергії, як схематично показано на рис. 2.5.

Енергетичне зрушення призводить до заповнення дозволених зон електронами з одним певним спіном і до появи у матеріалу власного магнітного моменту (намагніченості).

Заселеність енергетичних зон електронами з різним спіном визначає як спінову поляризацію інжектуючих з такого матеріалу електронів, так і особливості транспорту носіїв заряду через нього [2].

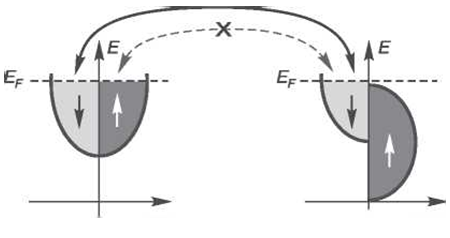


Рис.2.5 − Щільність станів електронів з різними спінами в немагнітному і феромагнітному матеріалі і обмін електронами між ними

Власну спінову поляризацію електронів в матеріалі визначається як відношення різниці концентрацій електронів з різними спінами (n↑ і n↓) до їх загальної концентрації (2.20):

, (2.20)

Електричний струм в твердотілих структурах, складених з матеріалів з різною спіновою поляризацією, залежить від спінової поляризації носіїв заряду і спінової поляризації областей, через які ці носії рухаються. Електрони, інжектовані з певним спіном, можуть зайняти в колекторі тільки вакантні місця з такою ж орієнтацією спіна.

Електрон, спочатку спін-полярізований в інжектуючому електроді, у міру руху змінює (через розсіяння) як свій імпульс, так і свій спін. Для практичних застосувань важливо знати, як довго електрон «пам'ятає» свою спінову орієнтацію. В якості характеристики «спінової пам'яті» використовують середню відстань, прохідну електроном до зміни свого спіна.

Найбільш яскравий прояв спінових ефектів варто чекати в матеріалах з найбільшою спіновою поляризацією електронів. Це стимулює пошук матеріалів з 100% спіновою поляризацією. На практиці ж доки використовуються матеріали з частковою спіновою поляризацією − метали і їх сплави, оксиди, магнітні напівпровідники [5].

Серед феромагнетиків найбільш високу спінову поляризацію носіїв заряду при кімнатній температурі мають сплави Хейслера. Вони утворюються металами, атоми яких в чистому стані мають лише часткове магнітне впорядкування, а в сплаві спіни усіх його атомів опиняються орієнтованими в одному напрямі, що забезпечує до 100% спінової поляризації електронів.

Параметри решіток таких сплавів варіюються в досить широких межах без зміни структури, що полегшує їх інтеграцію з напівпровідниковими матеріалами [2].

Разом з типовими феромагнетиками значні перспективи практичного використання мають напівпровідники, леговані високими концентраціями (до декількох атомних відсотків) магнітних домішок. Їх називають розбавленими магнітними напівпровідникам.

Початковими матеріалами є напівпровідникові з'єднання АIIIВV, кремній, германій, а в якості магнітної домішки найчастіше застосовують марганець. У таких матеріалах вдається отримати спінову поляризацію носіїв заряду аж до 80%, хоча температура Кюрі для більшості досліджених розбавлених магнітних напівпровідників близько 100 К.

Унікальні фізичні властивості розбавлених магнітних напівпровідників обумовлені взаємодією рухливих носіїв заряду з магнітними моментами частково заповнених домішками електронних оболонок атомів. Нині немає універсальної теорії, що пояснює природу феромагнетизму в різних розбавлених магнітних напівпровідниках [4].

Для приладових застосувань ідеальний розбавлений магнітний напівпровідник повинен мати не лише високу спінову поляризацію носіїв заряду, але і температуру Кюрі вище за кімнатну, а також допускати створення областей з *n –* і *p -* типом провідності.

Феромагнітні властивості відмічені в низькорозмірних структурах з оксидів ряду металів (ZnO, SnO2, In2O3, Al2O3, TiO2).

У спін-поляризованих матеріалах стану з переважаючим спіном контролюються намагніченістю цих матеріалів. Якщо намагніченість змінюється на протилежну, то переважаюча орієнтація спінів також міняється на протилежну.

При інжекції спін-поляризованих електронів в матеріал з відмінною від нуля намагніченістю, отже, і зі спіновою поляризацією, контрольованою зовнішнім магнітним полем, цей матеріал може поводитися як провідник або як ізолятор − залежно від напряму намагніченості і орієнтації спінів інжектованих електронів. При однаковому напрямі спінів електронів і електронів матеріалу забезпечується найвища провідність. [5].

Два основні ефекти, а саме − великий і тунельний магнетоопір, є наслідком особливостей транспорту носіїв заряду, контрольованого спіном електронів в нанорозмірних структурах.

Ці ефекти складають основу нового напряму в науці і техніці, яке дістало назву «***спінтроніка»*** Основне завдання спінтроніки − створення елементів електронної обробки інформації з використанням як носії інформації як заряду електрона, так і його спіна.

Можливість контролю і управління спіновими станами в твердих тілах представляє також значний інтерес для практичної реалізації ідей квантових обчислень, які обіцяють революційний прогрес в розвитку інформаційних систем [4].

Для визначення спіна електронів в твердотілих структурах запропоновано декілька підходів. При цьому використовуються характерні «відбитки» спіна на оптичних і електронних ефектах в об'ємних напівпровідниках і в нанорозмірних структурах. Проте практичне рішення цієї задачі наблизили тільки оптичні методики, засновані на аналізі міри кругової поляризації електролюмінесценції, ініційованої струмом спін-поляризованих електронів в гетероструктурах AlGaAs/GaAs/AlGaAs з квантовим колодязем GaAs.

Зонна структура напівпровідникового світлодіода і схема оптичних переходів в квантовому колодязі GaAs за наявності магнітного поля показані на рис. 2.6. Епітаксіальний шар слабо легованого магнітного напівпровідника ZnBeMnSe тут використовується як інжектуючий спіни контакт для світлодіода. Діод складається з квантового колодязя GaAs між бар'єрними шарами AlGaAs. У зовнішньому магнітному полі повністю поляризоване джерело електронів із спіном, спрямованим вниз, формується в зоні провідності ZnBeMnSe. При відповідному зовнішньому зміщенні ці носії електрично інжектуються через кордон розділу ZnBeMnSe/n - AlGаAs і потрапляють в квантовий колодязь i - GaAs. Там вони випробовують випромінювальну рекомбінацію з неполяризованими дірками, що поступають в колодязь з бар'єрної області p - AlGaAs, і випускають світло з певною круговою поляризацією.

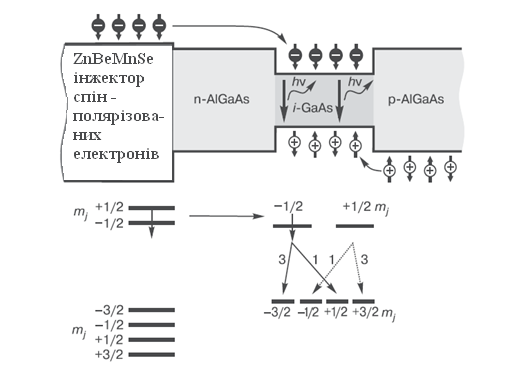


Рис.2.6 − Енергетичні стани електронів і дірок у світлодіоді поміщеному в магнітне поле

У GаAs зона провідності двократно вироджена по спіну (для кожного набору орбітальних квантових чисел є два стани з різними спінами), тоді як валентна зона цього напівпровідника вироджена по спіну чотирикратно(у ній є стани, що відносяться до так званих важких і легких дірок). У магнітному полі звиродніння по спіну в колодязі GаAs знімається, забезпечуючи тим самим вільні місця для електронів «спін-вверх» *(mj* = +1/2) і «спін-вниз»

*(mj* = (1/2) і важких *(mj* = +3/2 і *mj*(3/2) і легких (т/ = +1/2 і *mj =* (1/2) дірок з обома орієнтаціями спінів. Оскільки з інжектуючого контакту в колодязь поступають електрони переважно із спіном, спрямованим вниз, то в зоні провідності опиняються зайнятими тільки «спін-вниз» стани, тоді у валентній зоні усі діркові стани зайняті повністю.

Випромінювальна рекомбінація в колодязі визначається правилом відбору, яке вимагає, щоб при рекомбінації електрона і дірки зміна магнітного квантового числа *mj* дорівнювала +1. Для електронів із спіном вниз (*mj=* (1/2) можливі тільки два варіанти взаємодії: з важкою діркою (що припускає зміну *mj* від (1/2 до (3/2) і легкою діркою (від (1/2 до +1/2). Випромінювання, викликане рекомбінацією електронів з важкими і легкими дірками, має кругову поляризацію в протилежних напрямах. Матричний елемент, що визначає інтенсивність оптичних переходів, для важких дірок в три рази більше, ніж для легких. Тому міра оптичної поляризації *Popt* пов'язана із спіновою поляризацією електронів P співвідношенням:

Експериментально виміряна величина *Popt* = 50% говорить про 100%-ву ефективність спінової інжекції в колодязь.

Існують і інші (поки тільки теоретично обгрунтовані) пропозиції для спінового детектування рухливих носіїв заряду в твердих тілах. Наприклад було показано, що для цих цілей можна використати домішки з сильним спін-орбітальним розсіянням. Такі домішки асиметрично розсіюють електрони з різними напрямами спіна. Спін-залежний ефект Холу також розглядався як можливий інструмент для визначення спіна носіїв заряду. Вирішальне значення має практичне втілення цих ідей, у тому числі і розвиток нових ефективних підходів, заснованих на електричних вимірах.

# 3 Матеріали для спінтроніки

Наноматеріали умовно можна розділити на декілька категорій [5].

**Перша категорія** включає матеріали у вигляді твердих тіл, розміри яких в одному, двох або трьох просторових координатах не перевищують 100 nm. До таких матеріалів можна віднести нанорозмірні частки (нанопорошки), нанодроти і нановолокна, дуже тонкі плівки (завтовшки менше 100 nm), нанотрубки і тому подібне. Такі матеріали можуть містити від одного структурного елементу або кристаліту (для часток порошку) до декількох їх шарів (для плівки). У зв'язку з цим першу категорію можна класифікувати як наноматеріали з малим числом структурних елементів або наноматеріали у вигляді нановиробів.

**Друга категорія** включає матеріали у вигляді малорозмірних виробів з характеризуючим розміром в зразковому діапазоні 1 mkm … 1 mm. Звичайно це дроти, стрічки, фольга. Такі матеріали містять вже значне число структурних елементів і їх можна класифікувати як наноматеріалів з великим числом структурних елементів (кристалітів) або наноматеріали у вигляді мікровиробів.

**Третя категорія** включає масивні (чи інакше об'ємні) наноматеріалами з розмірами виробів з них в макродіапазоні (більше декількох mm). Такі матеріали складаються з дуже великого числа нанорозмірних елементів (кристалітів) і фактично є полікристалічними матеріалами з розміром зерна 1 ... 100 nm. У свою чергу третю категорію наноматеріалів можна розділити на два класи. У перший клас входять однофазні матеріали (у відповідність з термінологією мікроструктура однорідні матеріали), структура і/або хімічний склад яких змінюється за об'ємом матеріалу тільки на атомному рівні. Їх структура, як правило, знаходиться в змозі далекому від рівноваги. До таких матеріалів відносяться, наприклад, стекла, гелі, пересичені тверді розчини. До другого класу можна віднести мікроструктурні неоднорідні матеріали, які складаються з нанорозмірних елементів (кристалітів, блоків) з різною структурою і/або складом. Це багатофазні матеріали, наприклад, на основі складних металевих сплавів.

До **четвертої категорії** належать композиційні матеріали, що містять у своєму складі компоненти з наноматеріалів. При цьому компонентами можуть виступати наноматеріали, віднесені до першої категорії (композити з наночастками і/або нановолокнами, вироби зі зміненою іонною імплантацією поверхневим шаром або тонкою плівкою) і другої категорії (наприклад, композити зміцнені волокнами і/або частками з наноструктурою, матеріали з модифікованим наноструктурним поверхневим шаром або покриттям). Можна виділити також композиційні матеріали із складним використанням нанокомпонентів [2].

У наноелектрониці широко поширені структури, що складаються з двох або декількох потенційних ям, розділених проникними за рахунок тунельного переходу потенційними бар'єрами. На їх основі створюються тунельно-резонансні прилади.

При збільшенні числа послідовно розташованих квантових ям утворюється надрешітка. Слід зазначити, що довжини пробігу у електронів і дірок в напівпровідниках розрізняються, тому одна і та ж структура може бути надрешіткою для електронів і просто набором ям і бар'єрів для дірок. У такій структурі дірки також можуть переміщатися з однієї ями в іншу, але в цьому випадку їх рух не є когерентним, а представляє послідовність тунельних перескоків з однієї ями в іншу.

Якщо товщина ям, що чергується, і бар'єрів надрешітки настільки мала, що включає всього декілька кристалічних шарів, то такі надгратки називаються ультратонкими. Опис електронних станів в ультратонких структурах ускладнений тим, що для них не має строгого сенсу введення ефективної маси електрона [14].

Надрешітки, виготовлені з різних напівпровідників, називаються композиційними. Створення таких решіток зв'язане з труднощами у разі великої відмінності періодів (постійних) кристалічних решіток. Якщо постійні решітки розрізняються не більше ніж на 1%, вони називаються погодженими. У зворотному випадку виходять напружені надрешітки. При цьому зазвичай виникають численні дислокації, значно погіршуючі параметри переходу. Проте розвиток технології дозволяє нині створювати бездислокаціонні переходи і в напружених надрешітках. В цьому випадку виникає внутрішня напруга, яка розтягує шари одного напівпровідника і стискає шари іншого.

Надрешітки можна виготовити з одного напівпровідника, легуючи його шари послідовно донорами і акцепторами. Такі надрешітки називаються легованими. Прикладом може служити *n – i – p − i* − структура, що складається з по-різному легованих шарів арсеніду галію. Окрім перелічених вище структур існують надрешітки з плавною зміною складу в межах шару, що дозволяє реалізувати грати з різними потенційними профілями ями або бар'єру.

Великий інтерес представляють спінові грати, частину шарів в яких містять магнітні іони або домішки, наприклад CdTe/CdMnTe. Структури, що містять магнітні добавки, набувають нині настільки широкого поширення, що дослідження і створення приладів на їх основі складає предмет особливого розділу наноелектроніки, який називається спінтронікою [7].

## 3.1 Мультиферроіки

Мультиферроіки (multiferroics) є наноматеріалами, що характеризуються двома видами впорядкованості : магнітним (ferromagnetic) і сегнетоелектричним (ferroelectric). Відповідно ці матеріали об' єднують в собі властивості, характерні для кожного з класів окремо. До них відносяться спонтанна намагніченість, магнітострикція, спонтанна поляризація і п'єзоелектричний ефект. Також, мультиферроіки набули нових властивостей, пов'язаних зі взаємодією магнітної і електричної підсистем. До них відносяться індукована магнітним полем електрична поляризація та індукована електричним полем намагніченість, перемикання спонтанної поляризації магнітним полем магнитодіелектричний ефект, зміна діелектричною постійною під дією магнітного поля. На рис. 2.8 приведена системна класифікація речовин за їх фізичними параметрами.

Магнітоелектрики − речовини, у яких при приміщенні їх в електричне поле виникає магнітний момент, пропорційний значенню поля. Магнітоелектричний ефект − результат взаємодії двох підсистем іонного кристала. Заряджені іони утворюють електричну підсистему, а спінові магнітні моменти, що не компенсуються, формують магнітну підсистему. Магнітоелектричні матеріали прийнято ділити на два класи: гомогенні (однофазні) і композитні (двох- і багатофазні). Гомогенними називають речовини, хімічний склад і фізичні властивості яких в усьому об'ємі однакові або плавно міняються. У гомогенній системі з двох і більше хімічних компонентів кожен компонент розподілений в масі іншого у вигляді молекул, атомів, іонів. Складові частини гомогенної системи не можна відокремити один від одного механічним шляхом. До гомогенних матеріалів відносять LiCoPO4, TbPO4, BiFeO3, піроксени із загальною формулою AMSi2O6 (у цій формулі А і М — перехідні метали, наприклад, LiFeSi2O6, LiCrSi2O6).

До композитних матеріалів відносяться неоднорідні суцільні матеріали, що складаються з двох або більше за компоненти. У таких матеріалах структурно можна виділити матрицю, в яку вмонтовані «армуючи» елементи, що забезпечують необхідні механічні характеристики матеріалу. Наприклад, ферит вісмуту (BiFеO3) має надтонкі шари або доменні стінки.

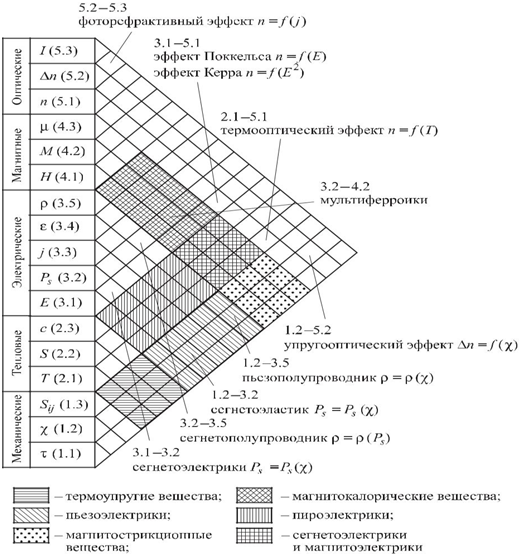


Рис. 3.1 − Системна класифікація речовин за їх фізичними властивостями;

τ − механічна напруга, X − деформація, Sij − пружні константи,

T − температура, S − ентропія, c − питома теплоємність, E − напруга електричного поля, Ps − поляризованість, j − щільність струму, ε − діелектрична проникність, ∆ρ − питомий опір,

H − напруженість магнітного поля, M − намагніченість, μ − магнітна проникність, n − показник заломлення, ∆n − двулучезаломлення,

I − інтенсивність світла.

## 3.2 Магнітні напівпровідники

Магнітними напівпровідниками називають речовини, в яких поєднуються напівпровідниковий тип електропровідництва з різними типами магнітного впорядкування. Електромагнітний спектр магнітних напівпровідників визначається двома підсистемами: 1) рухливі носії зарядів − електрони і дірки, рухливість яких в магнітних напівпровідниках невелика в порівнянні з відомими напівпровідниками; 2) локалізовані електрони атомів перехідних або рідкоземельних металів. Створення магнітних напівпровідників − актуальне завдання матеріалознавства в області спінтроніки. Зонна структура магнітного напівпровідника істотно складніша за двозонну структуру звичайних напівпровідників, металів і діелектриків. У магнітного напівпровідника є третя зона, яка утворюється d - і f - електронами атомів перехідних або рідкоземельних елементів. Феромагнітний напівпровідник повинен мати температуру Кюрі (температура, при якій феромагнетик втрачає свої властивості) вище за кімнатну температуру і допускати створення зон n - і p - типами провідності в одному монокристалі. Феромагнітні напівпровідники потрібні як джерела спінполяризованих електронів. В той же час їх можна інтегрувати в традиційні напівпровідникові пристрої. Певний інтерес дослідників викликають розбавлені магнітні напівпровідники, що є сплавами арсеніду галію з марганцем або іншим феромагнетиком. Найбільша температура Кюрі в магнітному твердому розчині GaMnAs з p - провідністю складає TК 110 К і ведеться пошук феромагнітних напівпровідників з більш високою температурою Кюрі, які могли б бути використані в якості спінових інжекторів при температурах порядку кімнатної і при слабкому (чи нульовому) зовнішньому магнітному полі.

## 3.3 Спінелектроні шаруваті структури

Нанотехнологічні процеси дозволяють синтезувати багато-компонентні матеріали. Наприклад, наноструктури можуть складатися з квантових шарів, що чергуються, або квантових точок. Такі структури мають унікальні фізичні властивості: спінзалежне розсіювання електронів провідності, непрямий обмінний зв'язок, поверхнева магнітна анізотропія. За певних умов феромагнітна структура може бути перетворена в антиферомагнетик з антипаралельним напрямом магнітних моментів. Для мультишарів Со-Cu такі магнітні фазові переходи відбуваються з періодом ~1,0 nm. З'ясувалося, що магнітна анізотропія виникає внаслідок порушення симетрії на межах розділу між феромагнітним і немагнітним матеріалами і появи напруги через невідповідність параметрів кристалічних решіток. Це дозволяє отримати шаруваті наноструктури шляхом зміни товщини шарів, а також підбором відповідних матеріалів.

У металевих багатошарових структурах виявлений ефект велетенського магнетоопіру (квантово-механічного явища, спостережуваного в тонких плівках, що складаються з феромагнітних і немагнітних шарів, що чергуються. У такій системі ефект проявляється в істотному зменшенні електричного опору залежно від взаємної орієнтації намагніченості сусідніх магнітних шарів. Ця взаємна орієнтація може бути змінена, наприклад, додатком зовнішнього магнітного поля. У основі ефекту лежить спінзалежне розсіяння електронів. У феромагнітних матеріалах є два типи електронів залежно від орієнтації їх спінів («спин управо» і «спін вліво»). Електрон зберігає напрям спіна на так званій довжині спінової релаксації ~10 nm. При спінзалежном поширенні електронів вона сильно розрізняється для напрямів спінів, паралельних і антипаралельних напрямам магнітних моментів атомів, на яких відбувається розсіяння. Електричний опір зразка залежить від багатьох чинників, серед яких в магнитоупорядкованих матеріалах важливу роль грає розсіяння на магнітній підрешітки кристала. Якщо орієнтація спіна не співпадає з магнітним моментом шару (антиферомагнітна конфігурація), то електрон не здатний проникнути в цей шар. Відповідно електроопір зростає. При додатку зовнішнього магнітного поля відбувається перехід у феромагнітну конфігурацію. При певному значенні зовнішнього магнітного поля електрони здатні перескочити в суміжні шари структури шарів. При цьому опір такої структури значно знижується (рис. 3.2). На основі шаруватих структур створюються спінові вентилі. Вони складаються з двох магнітних шарів NiFe і Co, розділених немагнітним шаром, наприклад, мідною плівкою. Особливість такої структури проявляється в тому, що намагніченість одного з шарів закріплена обмінною взаємодією з суміжним антиферомагнітним матеріалом, тоді як напрям намагніченості другого шару може змінюватися під дією зовнішнього магнітного поля. У такій шаруватій структурі феромагнітні шари дуже слабо пов'язані, і тому зміна конфігурації магнітних моментів від антипаралельної до паралельної відбувається в малих магнітних полях. У магнітному полі легко змінюється конфігурація магнітних моментів. Вони вибудовуються уздовж зовнішнього поля, антипараллельно нижньому шару. Виникає явище велетенського магнетоопіру.

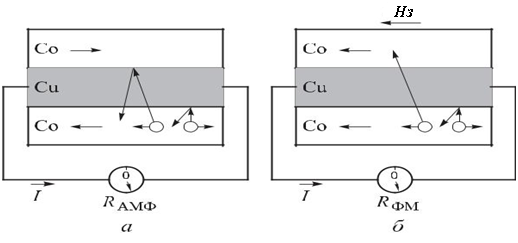


Рис. 3.2 − Схема спінового розсіяння в тришаровій плівці антифер-ромагнитною (а) і феромагнітною (б) конфігураціях: Нз − зовнішнє магнітне поле, I − струм, R − відповідний опір другого шару може змінюватися під дією зовнішнього магнітного поля.

Підбір матеріалу, його товщину дозволяє створювати наноструктури із заданими властивостями і забезпечити високу чутливість структур. На основі таких елементів створені считуючі магніторезистивні голівки в жорстких дисках з щільністю запису понад 100 Гбіт/дюйм. Ефект велетенського магнетоопіру проявляється в наступних матеріалах: FeCr, La0, 67Ca0,33MnO, Co10Cu90,(Y, Ca) MnO3, EuTe, EuSe [5].

У шаруватих структурах спостерігається магнітний тунельний перехід. Цей перехід формується в структурі, що полягає з двох шарів феромагнетика, розділених ізолятором. В якості ізолятора зазвичай застосовується оксид алюмінію Аl2O3, товщина якого не перевищує 2 nm. Проте електрон може просочуватися через цей шар ізолятора. Таке явище відоме як тунелювання. У феромагнітному матеріалі енергія електронів, що розрізняються орієнтацією спінів, різна, тому і вірогідність тунелювання електронів буде різною.

На використанні магнітного тунельного переходу засновано таке перспективне пристосування, як магнітний оперативний запам'ятуючий пристрій (МОЗП). Особливість МОЗП полягає в тому, що інформація зберігається не у вигляді електричних зарядів на обкладаннях конденсатора, як в динамічному ОЗП, і не у вигляді стану тригера, як в статичному ОЗП, а у вигляді намагніченості шару феромагнетика. В якості достоїнств такого типу пам'яті декларується дуже мале енергоспоживання, висока швидкодія, велетенська щільність зберігання інформації. Власне, підтримка стану намагніченості взагалі не вимагає витрат енергії, як це відбувається в жорстких дисках. Висока щільність зберігання обумовлюється невеликими розмірами елементарного осередку, для котрого не потрібно ні велику кількість транзисторів, як для статичного ОЗП, ні окремі схеми регенерації, як для динамічного ОЗП. Ефект магнітного тунельного переходу використовується в пам'яті МОЗП для считування інформації з магнітного осередку. В найближчій час можна буде створювати комп'ютери, вміст пам'яті яких не пропадатиме при відключенні електроживлення.

Структури з магнітним тунельним переходом застосовуються в якості считуючих голівок в жорстких дисках, а також для створення елементарних елементів магніторезистивної оперативної пам'яті. Магнітний тунельний перехід може служити основою «спінового акумулятора», який «заряджається», завдяки дії потужного магнітного поля на наномагніти. Наномагніти перетворюють магнітну енергію безпосередньо в електроенергію, без хімічної реакції. Електричний струм, вироблюваний в цьому процесі, називають поляризованим струмом, що обертається.

# 4 Спінтронні прилади

Спінтроніка − науково-технічний напрям, пов'язаний з явищами, що виникають при спінзалежному транспорті, і з їх застосуванням для створення електронних приладів.

У спінтрониці спін електрона, як і його заряд, використовується для обробки інформації. Інтерес до спінтронних приладів викликаний тим, що вони можуть бути базовими логічними елементами квантових комп'ютерів. Спінові ефекти виникають в мікроелектронних і наноелектронних структурах при приміщенні їх в магнітному полі. Головною з них є зміна електричного опору матеріалу або структури під впливом магнітного поля. Магнетоопір характеризує спінові ефекти при тунелюванні, дифузійному і балістичному транспорті носіїв [6].

Спінтроніка вивчає магнітні і магнітооптичні взаємодії в металевих і напівпровідникових наногетероструктурах, динаміку і когерентні властивості спінів в конденсованих середовищах, а також квантові магнітні явища в структурах нанометрового розміру. Хімічні, літографічні і молекулярно-кластерні технології дозволяють створювати для спінтроніки наноструктури з необхідними магнітними властивостями. Наноструктури можуть складатися з квантових шарів, що чергуються, або квантових точок, в яких виникають такі явища, як спінзалежне розсіяння електронів провідності, непрямий обмінний зв'язок, поверхнева магнітна анізотропія [7].

Одним з основних завдань спінтроніки є інтеграція магнітних систем в напівпровідникову мікроелектроніку. Легке управління спінами електронів в напівпровідниках вже сьогодні дозволяє створювати два нові класи гібридних матеріалів: магнітні напівпровідники (гібридна структура феромагнетик/напівпровідник) і спін-електронні нанотранзистори. Розроблені спінтронні прилади засновані на ефектах велетенського магнитоопіру і спін-залежного тунелювання, закономірностях інжекції, перенесення і детектування спін-поляризованих носіїв заряду в напівпровідникових структурах. У цих пристроях зміна напряму намагни-ченности здійснюється за допомогою власного внутрішнього або зовнішнього магнітного поля. Приклади таких приладів розглянуті в цьому підрозділі. Їх головними практичними достоїнствами є працездатність при кімнатній і підвищених температурах і більш висока в порівнянні з напівпровідниковими аналогами радіаційна стійкість. Слід мати на увазі, що перелік можливих спінтронних приладів не обмежується тільки наведеними прикладами. Велика кількість запропонованих і теоретично обгрунтованих приладів все ще чекає експериментальної перевірки.

*Спіновий транзистор Джонсона.* Цей тип транзистора складається з двох феромагнітних шарів, розділених парамагнітним шаром, в яких проявляється ефект велетенського магнетоопіру (рис. 4.1). Такий пристрій був названий на честь його винахідника Джонсона. Якщо проводити паралелі з біполярним транзистором, то в транзисторі Джонсона парамагнетик (ПМ) є базою, а емітер і колектор виконані з феромагнетиків (ФМ).

При поданні на колектор напруги в області емітер−база відбувається накопичення електронів з орієнтацією спінів або вгору, або вниз. Струм колектора визначається напрямами векторів намагніченості колектора і емітера, тобто тим, паралельні вони або антипаралельні. Феромагнітний емітер грає роль поляризатора для спінів електронів, що накопичуються. При включенні зовнішнього магнітного поля змінюється орієнтація вектору магнітного моменту колектора або емітера на протилежну, тобто відбувається свого роду «перемикання» вказаного вектору. Основним недоліком структур, використовуваних в транзисторах типу Джонсона, є те, що вимірювані значення напруги дуже малі, оскільки усі контакти є не вентильними, а омічними (усі складові структури − метали) [5].

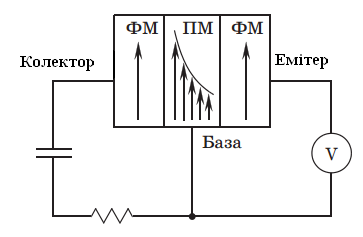


Рис. 4.1 − Спіновий транзистор Джонсона

Щоб усунути вказаний недолік були створені гібридні спін-електроні пристрої з використанням напівпровідників. Розроблені прилади дістали назву *спін-вентильних (спін-клапанних) транзисторів*, які є приладом з трьома виведеннями.

Схема такого транзистора і його енергетична діаграма зображені на рис. 4.2. Базова область є металевим багатошаровим спіновим вентилем між двома областями кремнію *n-* типу, які формують емітер і колектор.

У такій структурі «гарячий» електрон, щоб потрапити з емітера в колектор, повинен пройти через спін-вентильну базу. Пристрій спроектований як обмінна розв'язуюча спін-вентильна система, в якій два феромагнітні матеріали (а саме — NiFe і Со), що мають різні коерцитивні сили, розділені шаром з немагнітного матеріалу (Аu). Через різницю коерцитивних сил шари NiFe і Со дозволяють отримати чітко виражену паралельну і антипаралельну орієнтацію намагніченості в широкому інтервалі температур. Ці шари можна перемагнічувати окремо відповідним магнітним полем. На межах розділу між металевою базою і напівпровідниками формуються бар'єри Шотки. Для того, щоб отримати бажаний бар'єр високої якості з хорошим випрямляючим ефектом, на емітерній і колекторній стороні розміщені тонкі шари Рt і Аu відповідно. Вони перешкоджають безпосередньому контакту магнітних шарів з кремнієм. Оскільки контакт Si/Рt утворює високий бар'єр Шотки, він використовується як емітер. Колекторний діод Шотки формується так, щоб мати нижчий бар'єр в порівнянні з емітерним діодом. Наприклад, контакт Si/Аu, для якого бар'єр майже на 0,1 еВ нижче бар'єру для Si/Рt - контакта, дуже добре відповідає цій умові. Для виготовлення такого спін-вентильного транзистора застосовується спеціально розроблена методика, яка включає осадження металу на дві кремнієві пластини і їх подальше з'єднання в умовах ультрависокого вакууму.

У такій структурі гарячий електрон з емітера проходить через спін-вентильну базу і потрапляє в колектор. Колекторний перехід є зворотнозміщеним, а емітерний − прямозміщеним. При такій напрузі відбувається інжекція неполяризованих «гарячих» електронів з енергією вище за енергію рівня Ферми з напівпровідникового емітера в металеву базу (рис. 4.2, б).

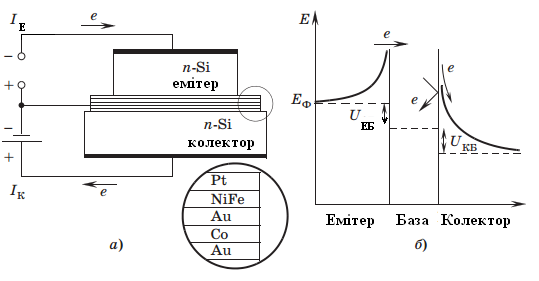


Рис. 4.2 − Схема спін-вентильного транзистора та його енергетична діаграма

При поданні напруги на емітер між емітером і базою встановлюється такий струм 𝐼*э*, при якому електрони інжектуються у базу перпендикулярно шарам спін-затвору. Струм колектора 𝐼*К* істотно залежить від розсіяння електронів у базі, яке являється спін-залежним і регулюються за допомогою зовнішнього 𝐻 − поля. Магнітний відгук спін-вентильного транзистора, званий магитострумом 𝐼*МТ*, визначається як зміна струму колектора 𝐼*К*, приведеного до мінімального значення:

де верхній індекс «п» відноситься до паралельного, а індекс «ап» − до антипаралельного стану спін-вентиля.

Характерною особливістю даного транзистора є те, що струм колектора 𝐼*К* і магнитострум 𝐼*МТ* як і струм емітера не залежать від значень напруги, що прикладається. В результаті струм колектора росте пропорційно струму емітера, залишаючись на декілька порядків нижче, ніж струм 𝐼*э*, тобто 𝐼э ≫ 𝐼*К*. Проте колекторний струм істотно залежить від магнітного стану спінового затвора у базі, тобто від величини магнітного поля (рис. 4.3). Магнітні шари мають паралельні напрями намагніченості для великих магнітних полів, і струм 𝐼*К* набуває великих значень [4].

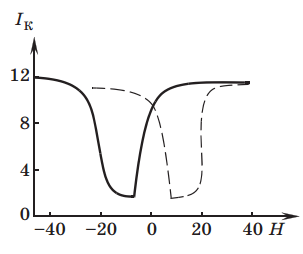
****

Рис. 4.3 − Залежність струму колектора від величини магнітного поля

Із-за різних значень полів перемикання в Со (штрихова крива) і в NiFe (суцільна крива) в них при зміні напряму магнітного поля на зворотне створюються поля, що мають протилежні напрями намагніченості. Через це опір бази росте. В результаті струм колектора різко падає. Важливою перевагою спін-вентильного транзистора є великий відносний магнітний ефект при кімнатній температурі при слабких магнітних полях напруженістю в декілька ерстед.

Дуже близько до спін-вентильному (спін-клапанному) транзистору (СКТ) за своїми властивостями і ознаками роботи стоїть магнітний тунельний транзистор (МТТ). Він відрізняється від СКТ головним чином тим, що в МТТ інжекція збуджених електронів у базу йде не через бар'єр Шотки, а через тунельний бар'єр між щупом і поверхнею бази.

Даний прилад подібний до звичайного транзистора, у якого диференціальна намагніченість і його електричні характеристики чутливі до величини і напряму зовнішнього магнітного поля [6].

Важливою перевагою спин-вентильного транзистора являється наявність порівняно великого магнітного ефекту навіть при кімнатній температурі і слабких магнітних полях (декілька ерстед). Незважаючи на низький коефіцієнт посилення по струму це робить такий транзистор унікальним спінтронним приладом з широкими перспективами для використання в магнітній пам'яті і датчиках магнітного поля, де коефіцієнт посилення по струму не такий важливий.

*Спін-польові транзистори.* Структура цих транзисторів подібна до звичайного польового транзистора, але області витоку і стоку створюються з феромагнетиків, а затвор − з напівпровідника (рис. 4.4). Принцип роботи такого транзистора ілюструє рисунок 4.4, де стрілки, орієнтовані по осі 𝑦, показують напрям ефективного магнітного поля 𝐵𝑦 у каналі.

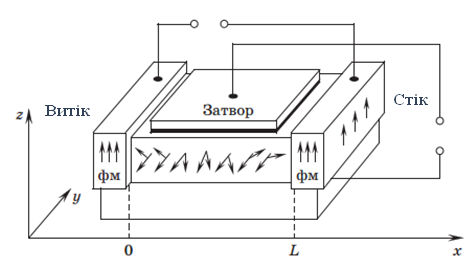


Рис. 4.4 − Принцип роботи спін-польового транзистора

Спін-поляризованні носії покидають витік зі спінами, паралельними намагніченості феррамагнетика (у напрямі 𝑧), переміщаються в напрямі 𝑥 з хвилевим вектором (𝑘𝑥, 0, 0) k, а їх спіни при цьому русі процесують, що ілюструється поворотом магнітних стрілок на рис 4.4. Основна ідея даного спінового транзистора полягає в тому, що поляризація спінів електрона у витоку вибрана перпендикулярною до вектору (0, 𝐵𝑦, 0), тобто електрони в витоковом контакті поляризовані в +𝑧 напрямі.

Таким чином, якщо величина напруженості магнітного поля досить велика, то спіни електронів в каналі змінюють орієнтацію на протилежну. В результаті опір каналу зростає і струм стоку зменшується. При зміні напруги на затворі відбувається зміна провідності каналу і струму стоку 𝐼𝑐.

У ідеальному випадку канал транзистора має бути виконаний у вигляді квантового шнура. Одновимірний канал має перевагу перед традиційним двовимірним, оскільки останній ніколи не «вимикається» повністю через те, що ефективність дії потенціалу затвора на спін електронів залежить від напряму руху цих електронів. У двовимірному каналі швидкість руху електронів має дві складові − вздовж і поперек каналу. Так, при повному виключенні потоку електронів з вектором швидкості тільки в одному напрямі не «вимикаються» електрони зі складовою вектору швидкості в перпендикулярному напрямі. В результаті транзистор з двовимірним каналом неминуче має кінцевий струм витоку у вимкненому стані. На відміну від нього транзистор з одновимірним каналом, в якому вектор швидкості електронів має тільки одну складову, а саме у напрямі руху електронів, може бути вимкнений повністю. Інша перевага одновимірного каналу пов'язана з істотним пригніченням в нім основних механізмів релаксації спінів електронів.

*Время-прольотний спіновий транзистор (transit time spin transistor*) став практичною реалізацією розглянутої вище ідеї управління кутом прецессії спіна електронів в провідному каналі. У нім створюється постійне магнітне поле в каналі, що проводить, з напівпровідникового матеріалу, а швидкість руху електронів управляється зовнішнім електричним потенціалом. У цих умовах модуляція швидкості руху електронів контролює прецессію спінів електронів, що рухаються в каналі. Хоча автори і назвали свою конструкцію «время-прольотний спіновий польовий транзистор», по пристрою і принципу дії основних елементів він ближче до традиційного *біполярного* транзистора [6].

Енергетична діаграма, що ілюструє пристрій і принцип роботи время-прольотного спінового транзистора показана на рис. 4.5. На відміну від традиційних транзисторів це чотирьохвивідний прилад.

Інжектор спін-поляризованних електронів сконструйований у вигляді тришарової тунельної структури немагнітний метал/ді-електрик/феромагнетик. При додатку напруги *Ve* між контактами 1 і 2 гарячі електрони (електрони з енергією декілька еВ) з обома орієнтаціями спінів інжектуються з немагнітного металу в намагнічену феромагнітну базу F1. Там електрони з неосновним спіном розсіюються, а з основним, співпадаючим з напрямом намагніченості бази спіном, проходять через неї і через бар'єр Шотки і потрапляють в напівпровідник. Так відбувається фільтрація по спіну гарячих електронів, що поступають в напівпровідник.

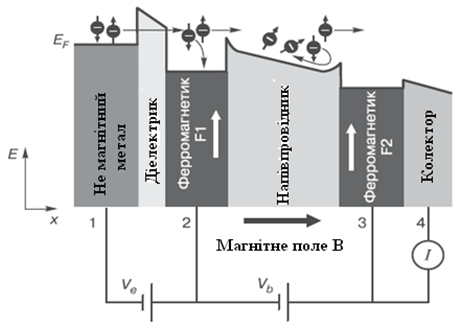


Рис. 4.5 − Основні функціональні елементи і енергетична діаграма время-прольотного транзистора.

На напівпровідник накладено зовнішнє магнітне поле, співпадаюче по напряму з напрямом руху електронів. Під дією напруги *Vb,* прикладеної між феромагнітними областями F1 і F2, відбувається прецессія спіна електронів, що рухаються, з ларморовской частотою. В результаті спін електронів, що приходять у базу F2, виявляється поверненим відносно первинній орієнтації на кут φ:

де *g −*  чинник електронів; μB *−* магнетон Бору*;* B *−* індукція магнітного поля*;* L *−* товщина шару напівпровідника; v *−* швидкість електронів в напівпровіднику.

У феромагнітному шарі F2 електрони йдуть далі в колектор, а інші розсіюються і залишаються в напівпровіднику. Минулі електрони утворюють струм *I* між електродами 3 і 4.

Кут φ визначається середньою швидкістю електронів (v) і їм легко управляти відповідною зміною напруги *Vb*. Відмітимо, що оскільки область напівпровідника має з обох боків бар'єри Шотки, напруга *Vb* сама по собі не забезпечує протікання струму *I*. Ця напруга лише модулює струм, визначуваний напругою *Ve*. Так реалізується транзисторна функція розглянутого спінового приладу. Слід мати на увазі, що кут повороту спіна в цій конструкції залежить від швидкості руху електронів, статистичний розкид якої призводить до зменшення ефективності модуляції вихідного струму і наявності кінцевого струму витоку у вимкненому стані приладу.

Експериментальна перевірка ідеї облаштування время-прольотного спінового транзистора показала, що при 37%-ої спінової поляризації інжектованих електронів глибина модуляції струму *I (*відношення струму у включеному стані до струму у вимкненому стані) може досягати 7. Перспективи поліпшення робочих характеристик таких транзисторів пов'язані зі збільшенням спінової поляризації інжектуємих електронів і з підвищенням ефективності їх детектування в колекторі.

*Магнітний тунельний транзистор (magnetic tunneling transistor*), як і представлений вище спін-вентильный транзистор, є варіантом біполярного транзистора з металевою базою. Працює він на гарячих електронах. Його структура і енергетична діаграма показані на рис. 4.6 [7].

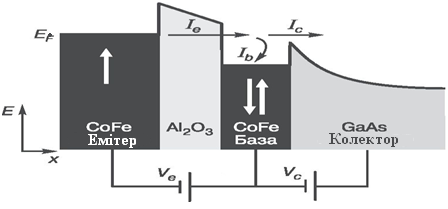


Рис.4.6 − Структура і енергетична діаграма магнітного тунельного транзистора.

Як емітер електронів використовується феромагнітний сплав CoFe, відокремлений від бази з того ж матеріалу діелектриком з Al203 тунельної товщини. Такий емітер забезпечує інжекцію у базу спін-поляризованних електронів з енергією в декілька електрон-вольт, тобто гарячих електронів. Геометричні розміри металевих областей емітера і бази вибрані так, щоб коерцитивна сила у базі була нижча коерцитивної сили в емітері. Для цього відношення довжини бази до її ширини (аспектне відношення) має бути менше, ніж у емітера, що забезпечує перемагнічування бази при меншої напруженності зовнішнього магнітного поля. Колектор з GaAs відокремлений від металевої бази бар'єром Шотки.

Напрям намагніченості бази, контрольований зовнішнім магнітним полем, при незмінному напрямі намагніченості емітера управляє співвідношенням між струмами бази і колектора. Паралельна однонапрямлена намагніченість обох областей викликає максимальний струм колектора і мінімальний струм бази. При протилежній намагніченості струм колектора мінімальний, а струм бази максимальний.

Слід зазначити, що сучасне розуміння спін-залежного транспорту гарячих електронів у феромагнітних тонкоплівкових структурах залишається все ще неповним. Для подальшої розробки спінтронних приладів первинним є глибше вивчення спін-залежних механізмів розсіяння гарячих електронів.

*Сенсори на основі гигантского магнитоопіру.*

Використання ефекту велетенського магнитосопіру в тонкоплівкових структурах дозволяє створювати на їх основі високочутливі сенсори магнітних полів. Уперше промисловий випуск таких сенсорів освоїла NVE Corporation (США) в 1995 р. Їх сенсори мають конфігурацію з протіканням струму в площині плівок.

Плівки сенсорної структури формують на основі заліза, нікелю, кобальту і міді (із зрозумілих причин їх точний склад не розголошується). Товщина плівок лежить в межах 1-2 nm. Одна з магнітних плівок початково намагнічується в певному напрямі або її намагніченість фіксується за рахунок антиферомагнітного зв'язування. Напрям намагніченості іншої магнітної плівки змінюється відповідно до зовнішнього магнітного поля, що детектується, що і забезпечує прояв ефекту велетенського магнитоопіру. Перевагою таких сенсорів є те, що вони реєструють магнітні поля, що поширюються уздовж площини плівкової структури, а не перпендикулярно площини сенсора, як в аналогах, працюючих на ефекті Холу. Структури з антиферомагнітним зв'язуванням мають також підвищену стійкість до екстремально високих магнітних полів, відновлюючи свою працездатність після їх зняття.

Типова характеристика сенсорного елементу приведена на рис. 4.7, *а.* Вона симетрична відносно напряму зовнішнього магнітного поля і на робочій ділянці лінійна в межах 98%. Робочий діапазон елементу тягнеться до 150 C° і 300 Гаус [7].

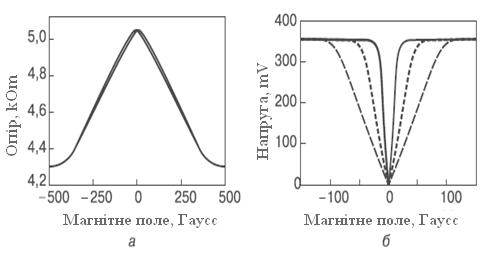


Рис.4.7 − Типова зміна опору сенсорного елементу (а) і вихідного сигналу мостових сенсорів від величини подовжнього магнітного поля.

Порівняно з сенсорами магнітного поля на ефекті Холу і на анізотропії магнитоопіру сенсори на ефекті велетенського магнитоопіру мають менші розміри, більш високу чутливість і температурну стабільність.

*Прочитуюча голівка на основі велетенського магнитоопіру.*

Цей прилад, що називається також спін-вентильною голівкою відтворення, був першим спінтронним приладом, який в промислових масштабах стали робити в IВМ починаючи з 1997 р.

Конструкція голівки і принцип її роботи ілюструються на рис. 4.8. Сенсорна частина голівки − спінової вентиль, працюючий на ефекті велетенського магнитоопіру, забезпечує підвищення її чутливості до магнітного поля більш ніж в два рази в порівнянні з класичними магніторезистивними структурами. Розміри області голівки, що прочитує магнітні біти, які записані на поверхні дисків або стрічок у вигляді магнітних областей (доменів) з різною орієнтацією намагніченості, зведені до мінімуму і складають 10 − 100 nm. Там, де головні частини двох протилежно намагнічених доменів магнітного носія інформації стикаються, доменні стінки містять полюси, що не компенсуються, які генерують магнітне поле. Це поле спрямоване перпендикулярно поверхні домена. Голівка «відчуває» зміни напряму магнітного поля на стінках домена [7].

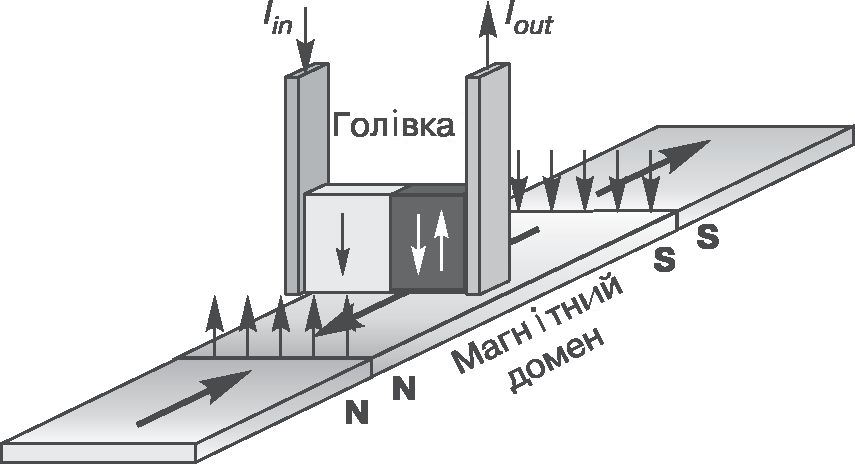


Рис.4.8 − Прочитуюча магнітна голівка на основі велетенського магнитоопіру над носієм інформації, що містить намагнічені області

Чутливий елемент голівки є типовим спіновим вентилем, що складається з двох шарів: одного − з легко змінюваною (що обертається) намагніченістю і іншого − з фіксованою (що важко обертається) намагніченістю. Коли голівка проходить над стінкою домена, напрям намагніченості змінюється тільки в шарі, що легко обертається. Вектор намагніченості м'якого шару реагує на витікаючі від носія інформації поля, вибудовуючись або вгору, або вниз. Пов'язане зі зміною напряму намагніченості зміна опору голівки реєструється струмом, що проходить через спін-вентильну структуру. Такі голівки дозволили досягти дуже високої щільності запису на жорстких носіях − від 10 до 100 Гбіт на квадратний сантиметр.

*Енергонезалежна пам'ять на основі велетенського магнитоопіру*.

Елементи пам'яті, що використовують ефект велетенського магнитоопіру, об'єднують в матриці, щоб отримати інтегральну мікросхему, що функціонує як енергонезалежна пам'ять. На їх основі створені інтегральні мікросхеми *магніторезистивної пам'яті з довільною вибіркою (magnetoresistance random access memory, MRAM).* Принцип роботи таких елементів ілюструє рис. 4.9. Ці елементи являються, по суті, спін-вентильними структурами, розташованими в певній послідовності і сполученими між собою доріжками, що проводять, які образують шини прочитування. Шина прочитування має опір, рівний сумі опорів складових її елементів. Струм протікає по шині прочитування, і підсилювачі у кінці ліній виявляють зміну загального опору. Магнітні поля, необхідні для маніпулювання намагніченістю елементів, забезпечуються додатковими, літографічно сформованими доріжками, що проводять, проходять над і під елементами. Перетини шини прочитування цими доріжками утворюють двокоординатну *(xy)* сіткову структуру, в кожному перетині якої знаходиться запам’ятуючий елемент на велетенському магнитоопірі. Доріжка, що проводить, проходить паралельно шині прочитування, при записі діє як словникова шина, а доріжка, що перетинає шину прочитування перпендикулярно їй, діє як записуюча бітова шина. Усі доріжки електрично ізольовані. Коли імпульси струму проходять через словникові і бітові шини, вони генерують магнітні поля, що управляють опором елементів на велетенському магнитоопірі [7].

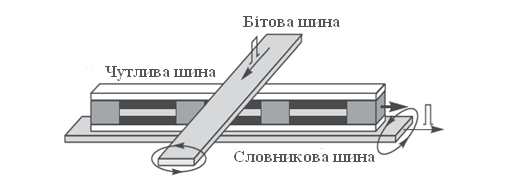


Рис.4.9 − Фрагмент пристрою, що запам'ятовує, з довільним порядком вибірки, побудованого із сполучених послідовно елементів на ефекті велетенського магнитоопіру

Типова схема адресації використовує імпульси в словниковій і бітовій шинах, що є напіввибіркою. Це означає, що поле, пов'язане з імпульсом в словниковій і бітовій шинах, в два рази менше поля, необхідного для перемагнічування елементу на велетенському магнитосоопірі. У кожній вузловій точці двокоординатної сітки два напівімпульси можуть генерувати сумарне поле, достатнє для перемагнічування магнитом’ягкого шару, а при більш високих рівнях струму − достатнє також для перемагнічування і магнитотвердого шару. Зазвичай один імпульс повертає вектор намагніченості шару на 90 градусів. За допомогою такої двокоординатної сітки будь-який елемент матриці може бути адресований з метою збереження або прочитування інформації.

Конкретні схеми збереження інформації і адресації можуть бути дуже різноманітні. Наприклад, одна з схем зберігає інформацію в магнитом’ягком шарі і використовує процедури «руйнування» і «відновлення» для прочитування. Альтернативою є схема, згідно якої індивідуальні елементи на велетенському магнитоопірі влаштовані так, що для збереження інформації в магнитотвердом шарі потрібно імпульси сильного струму. Імпульси слабкого струму використовуються потім для того, щоб «поворушити» магнитом’ягкий шар і «опитати» елемент, прочитуючи зміну опору без руйнування і відновлення інформації. Існує також багато інших варіантів на основі цих схем. Як правило, вони залежать від конкретних вимог до пам'яті.

Інтегральні мікросхеми пам'яті на ефекті велетенського магнитоопіру допускають найвищу щільність упаковки окремих елементів, що запам'ятовують, в сімействі мікросхем пам'яті з довільною вибіркою. Час запису і читання у них в 1,5−3 рази менше, ніж у мікросхем пам'яті, побудованої на інших фізичних принципах. Інформація в них при відключеному живленні може зберігатися нескінченно довго і зберігається навіть при радіаційних діях, критичних для працездатності напівпровідникових інтегральних мікросхем. Обмежуючими чинниками їх використання є порівняно великі струми, споживані від джерела живлення в робочому режимі, і уразливість інформації при дії сильних магнітних полів.

*Енергонезалежна пам'ять на основі спін-залежного туннелювання.*

До групи мікросхем магніторезистивної пам'яті з довільною вибіркою відносяться також і елементи енергонезалежної пам'яті, побудовані на основі тунельного магнитоопіру різних структур феромагнетик-діелектрик-феромагнетик.

Принцип побудови такого пристрою, що запам'ятовує, показаний на рис. 4.10. Пристрій, що запам'ятовує, з довільним порядком вибірки сформований з двох ортогональних (у площині) масивів паралельних феромагнітних доріжок, розділених тонким ізолюючим шаром. Кожен перетин доріжок діє як магнітний тунельний перехід. Коли вектори намагніченості двох протилежних феромагнітних областей орієнтуються зовнішнім магнітним полем в одному напрямі, тунельний опір виявляється нижче, ніж у разі, коли вони антипаралельни.

На практиці ортогональні масиви паралельних доріжок виконують з немагнітного матеріалу, що проводить, а їх перетин розділяють не діелектриком, а тунельною структурою ферромагнетик-діелектрик-ферромагнетик. Для практичного застосування в облаштуваннях пам'яті потрібна зміна опору, принаймні, на величину близько 30% [7].

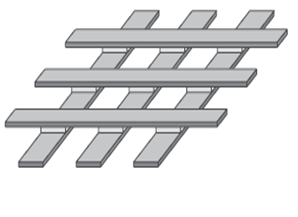


Рис. 4.10 − Принцип конструкції пристрою, що запам'ятовує, на основі тунельного магнитоопіру структур ферромагнетик-діелектрик-ферромагнетик.

Тому до кожного елементу приєднують чотирьохзондський вимірювальний пристрій (по двох з чотирьох зондів протікає струм, а два інших дозволяють провести незалежний вимір напруги). Виводи такого пристрою допускають його двояке використання, оскільки імпульсні струми, що протікає по верхній і нижній доріжкам (а не через тунельний перехід), можуть забезпечувати магнітні поля, необхідні для маніпулювання напрямом намагніченості у феромагнітних областях. Це схоже на схему адресації в пам'яті на велетенському магнитоопірі. Проте проблема полягає в тому, що така матриця багаторазово шунтується тунельними елементами, оскільки електричний струм на своєму шляху від живлячого дроту до виходу проходить через безліч елементів, а не тільки через ті з них, які знаходяться на перетинах доріжок. Вирішення цієї проблеми полягає в розміщенні діода на кожному перетині так, щоб струм міг проходити тільки в одному напрямі, усунувши тим самим альтернативні шляхи його протікання. Виготовлення таких діодів, інтегрованих з елементами, що запам'ятовують, на тунельних переходах, представляє складне технологічне завдання. Але її рішення дозволить створити пам'ять з надзвичайно високою щільністю компонування елементарних осередків.

Конструкція елементу енергонезалежної пам'яті на структурах ферромагнетик-діелектрик-напівпровідник показана на рис. 4.11. При використанні як напівпровідник кремнію такий елемент пам'яті легко інтегрується зі стандартними елементами КМОП інтегральних мікросхем. Крім того, значна довжина спінової релаксації в цьому матеріалі (до декількох сотень нанометрів при кімнатній температурі) не вимагає застосування унікальних нанотехнологічних підходів, а дозволяє використати стандартні процеси технології виготовлення кремнієвих інтегральних мікросхем з субмікронними розмірами елементів.

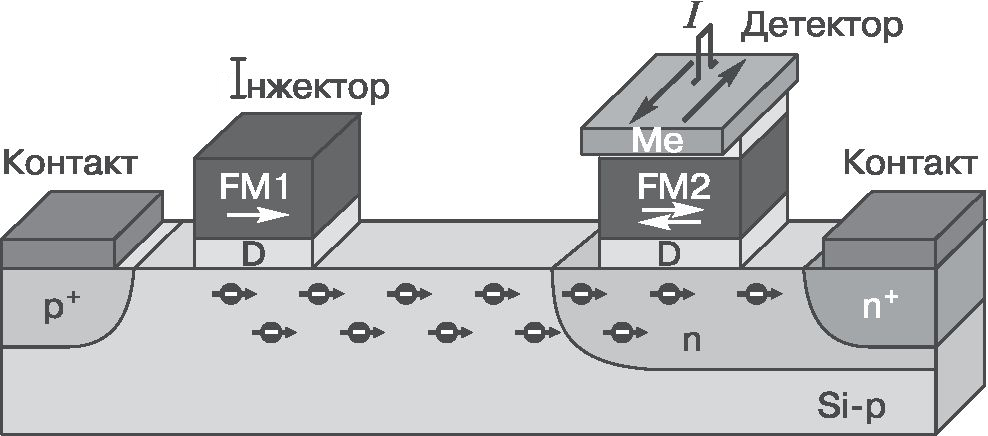


Рис. 4.11 − Принцип побудови елементу пам'яті на основі тунельного магнитоопіру структури ферромагнетик-діелектрик-напівпроводник

Інжектор і колектор такого елементу пам' яті виконані у вигляді магнітних тунельних переходів феромагнетик-діелектрик - кремній. Напрям намагніченості феромагнітного кулі FM1 в інжекторі задається при первинній ініціалізації елементу пам' яті і залишається незмінним в процесі її роботи. Феромагнітний куля FM2 колектора являється магнитом'ягким і напрям його намагніченості може мінятися поклад від напряму магнітного поля, що створюється імпульсом струму *I,* що пропускається через розташовану над ним шину запису. Діелектрик D має тунельну товщину і забезпечує тунельну інжекцію спін- поляризованних електронів в кремнієву підкладку. Інжектовані електрони в результаті дрейфу в електричному полі, що створюється між *р+* і *п+* контактами, потрапляють в область детектора, де придбають здатність тунелювати через діелектрик D у феромагну кулю FM2. Проте тунелюють в нього тільки електрони з орієнтацією спіна, співпадаючої з напрямом намагніченості цього кулі.

Опір осередку пам'яті залежить від відносної орієнтації намагніченості феромагнітних шарів FM1 і FM2. Його величина мінімальна, якщо шари намагнічені в однаковому напрямі і максимальна при антипаралельній намагніченості.

Струм в детекторі максимальний при збігу напрямів намагніченості в інжекторі і детекторі та близький до нуля, коли ці напрями протилежні, що відповідає двом логічним станам осередку.

В якості феромагнетиків, сумісних з кремнієвою технологією, запропоновано використати кобальт, нікель або сплави на їх основі − CoFe, CoFeB, NiFe, NiFeB, хоча пошук матеріалів з більш високою мірою спінової поляризації електронів триває. Серед діелектриків найкращі результати по ефективності інжекції отримані для MgO.

Основними достоїнствами магніторезистивної пам'яті є її незалежність, можливість перезапису інформації більше 1015 разів, радіаційна стійкість, час «читання-запис» менше 10 ns, час зберігання інформації більше 10 років.

# 5 Охорона праці

## 5.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів та негативних факторів, які виникають у надзвичайних випадках

Відповідно до ДСТУ 12.0.002.-80 "ССБТ. Терміни і визначення" до небезпечних виробничих факторів відносяться фактори, вплив якого на робітника у визначених умовах приводить до травми, а до шкідливих − фактори, що приводять до захворювання і зниження працездатності. Відповідно до цього ж ДСТУ установлюються параметри температури навколишнього повітря, відносної вологості, щільності і швидкості руху повітряного потоку на робочому місці.

Найбільш небезпечними виробничими факторами є шкідливі речовини. Відповідно до ДСТУ 12.1.007-76 "ССБТ. Шкідливі речовини, класифікація і загальні вимоги безпеки " по ступені впливу на організм шкідливі речовини підрозділяються на чотири класи небезпеки: надзвичайно небезпечні; високо-небезпечні; помірно небезпечні; мало-небезпечні. При такій організації виробництва відповідно до цього ж ДСТУ виникають наступні потенційні і шкідливі виробничі фактори:

- з-за того що підприємство насичене устаткуванням, що споживає електричний струм, то існує небезпека поразки людини електричним струмом;

- при роботі на фрезерному верстаті можливі нещасні випадки в результаті зіткнення з обертовою фрезою, передавальним механізмом (зубчастими колісьми, шківами й ін.) і іншими обертовими частинами верстата, а також влучення в робітника часток фрези, що відлітають, при її поломці. Можливі також поранення при влученні в робітника стружки, що відлітає, особливо при швидкісному фрезеруванні, при зіткненні рук робітника зі стружкою, при установці, знятті, транспортуванні деталей і пристосувань, при обробці деталей, при необережному користуванні ручним інструментом;

- при роботі на свердлильному верстаті може виникнути небезпека поранення робітника стружкою або осколками, що відлітають, оброблюваною деталлю при її слабкому закріпленні, при дотику до обертового свердла, патрону або шпинделю верстата;

- при ручній обробці деталей і зборці в основному можуть виникати механічні травми (забиті місця, порізи, уколи і т.п.);

- на стадії механічної обробки існує небезпека тривалого впливу на людину шуму і вібрації;

- виготовлення друкованих плат зв'язано з використанням шкідливих речовин ІV-І класу небезпеки. При постійній роботі з ними можуть виникати хімічні опіки, хронічні поразки шкіри, отруєння і т.д.;

- під час пайки індивідуальним електропаяльником, мають місце наступні шкідливі і небезпечні фактори:

1. запиленість і загазованість повітря робочої зони;
2. улучення розплавленого припою на шкірний покрив;
3. наявність елементів, що нагріваються, дотик до яких викликає опіки;
4. поразки електричним струмом;
5. електромагнітне випромінювання.

- при виконанні робіт з нанесення захисних покрить і пояснювальних написів, існує небезпека гострого отруєння, джерелом якого є розчинники і дрібні частки при розпиленні емалей.

Для виявлення порушення норм по охороні праці і запобігання травматизму важливе значення має єдиний для всіх галузей народного господарства порядок розслідування й обліку нещасних випадків на виробництві, "Положенням про розслідування й облік нещасних випадків на виробництві".

## 5.2 Заходи з безпеки життєдіяльності

При виконанні робіт виникає ряд факторів, що створюють небезпеку виникнення пожежі. Пожежа може виникнути при внесенні джерела запалювання в пальне середовище. Пальними компонентами у виробі є: ізоляція струмоведучих частин, плати, наявність пальних речовин у радіодеталях, а також у приміщеннях, де знаходиться прилад. Пальними компонентами є також будівельні конструкції для акустичної та естетичної обробки приміщень, перегородки, двері, підлога.

Таблиця 5.1 − Показники пожежної вибухонебезпечності матеріалів

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Матеріали  (де використовуються) | Показник небезпечності | Засоби гасіння |
| Каучук синтетичний (амортизатори обладнання) | Горюча речовина  займ. 315 0С  самозайм. 374 0С, виділяємі при горінні пари вибухонебезпечні. | Гасити розпиленою водою зі змочувачами, піною, порошком ПФ (фосфорно-амонійним) |
| Лак електроізоляційний (покриття ДП) | Горючий,  займ. 141 0С  самозайм. 370 0С | Гасити розпиленою водою зі змочувачами, піною, порошком ПФ |
| Полістирол удароміцний (корпуса ЕРЕ) | Горюча речовина  займ. 343 0С  самозайм. 486 0С | Гасити розпиленою водою зі змотувачами піною, порошком ПФ |
| Склотекстоліт (ДП) | Важкогорюча речовина | Гасити розпиленою водою зі змочувачами, піною, порошком ПФ |
| Деревина | Горючий матеріал, схильний до теплового самозаймання, займ. 255 0С  самозайм. 399 0С. Тління при самозайманні 480 0С | Охороняти від джерел нагріву з температурою вище 80 0С, гасити розпиленою водою зі змотувачами |
| Емалі, грунти (захисне та декоративне покриття) | Легкозаймиста речовини, пожежовибухонебезпечні | Гасити порошковими засобами, вуглекислотою |
| Продовження таблиці 5.1 | | |
| Матеріали  (де використовуються) | Показник небезпечності | Засоби гасіння |
| Олово (пайка ере) | Горюча речовина, t займ. 430 °С енергія запалення 80 МДж | Охороняти від джерел нагріву з температурою вище 80 0С, гасити розпиленою водою зі змотувачами |

Унаслідок наявності пожежонебезпечних матеріалів, відповідно до НАПБ.Б.03.002.2007 виробниче приміщення відноситься до категорії "В". Та згідно ПУЕ простірусередині приміщення відносно до пожеженебезпечної зони класу П-ІІа.

Пожежна безпека при експлуатації приладу відповідно до ГОСТ 12.1.004-91 "Пожежна безпека" забезпечується:

* системою запобігання пожежі;
* системою протипожежного захисту;
* організаційно-технічними заходами.

Пожежна безпека проектованого об'єкта забезпечується відповідно до систем запобігання пожеж і протипожежного захисту.

Протипожежний захист досягається застосуванням автоматичних систем пожежної сигналізації і застосуванням первинних засобів пожежогасіння.

Приміщення обладнається відповідно до ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Загальні положення» автоматичною пожежною сигналізацією з димовими сигналізаціями фотоелектричного типу ІДФ-М, призначеними для виявлення початкової стадії пожежі по появі диму в місці його розташування і видачі тривожного сигналу на станцію пожежної сигналізації. Причому відповідно до розрахункових даних і параметрами сигналізації ІДФ-М, на площу 9м2 необхідна одна сигналізація. Пожежні сигналізації мають наступні характеристики приведені в таблиці 5.2. [19]

Таблиця 5.2 - Характеристики пожежної сигналізації ІДФ-М

|  |  |
| --- | --- |
| Найменування параметра | Значення |
| Контрольована зона при висоті установки 4 m, m2 | 50-100 |
| Спрацьовування при зниженні оптичної щільності | на 10% |
| Інерційність спрацьовувань, s | 30 |
| Фонова освітленість у місці установки, лк | 500 |
| Припустима швидкість повітряного потоку,m/s | 6 |
| Напруга живлення постійного струму, V | 27 |
| Споживана потужність, W | 1,5 |
| Діаметр та висота, mm | 125 х 97 |
| Маса, kg | 0,6 |
| Строк праці, років | 6 |

Як первинні засоби пожежогасіння пропонується використовувати:

* ручний вогнегасник ОУ-5;
* повітряно-пінний вогнегасник ОВП-5;
* азбестова полотнина 1,5х2 m.

Як організаційно-технічні міри рекомендується проводити навчання робочого персоналу правилам пожежної безпеки.

Відповідно до ГОСТ 12.1.030-81, для захисту людей від поразки електричним струмом при дотику до металевих неструмоведучих частин, що можуть виявитися під напругою в результаті ушкодження ізоляції, передбачаються наступні заходи: захисне заземлення; занулення; захисне відключення; огороджувальні пристрої; попереджувальна сигналізація; запобіжні пристосування та інше.

Відповідно до ГОСТ 12.2.003-74 проектом прийнято, щоб небезпечні ділянки устаткування мали захисне заземлення.

Опір заземлювача знайдемо за формулою:

, (5.1)



де ***ρ*** *−* питомий опір грунту (узятий з довідкової літератури);

***l*** – довжина заземлювача (для труб 2 − 3 m, для стержнів до 10 m);

***d*** – діаметр заземлювача (для стержнів 0,01 − 0,03 m, для труб 0,03 − 0,05 m);

***t*** – відстань від середини забитого в грунт заземлювача до рівня землі (необхідно враховувати, що відстань від верхнього кінця заземлювача до поверхні землі має бути не менше 0,5 m).

Оскільки усе обладнання знаходиться у приміщенні відповідно у якості опору грунту обираємо бетон (40-1000 Om×m).

.



Опір смуги, що сполучає заземлювачі:

(5.2)



де ***L*** – довжина смуги, що сполучає заземлювачі (при контурному заземленні вона приблизно дорівнює периметру виробничого цеху), m;

***b*** – ширина смуги 0,03 − при прокладенні усередині будівлі і 0,05 – при прокладенні поза будівлею), m;

***t*** – глибина заземлення від рівня землі (не менше 0,5 m.),m.

.



Необхідна кількість заземлювачів:

(5.3)



де 4 – припустимий загальний опір;

2 – коефіцієнт сезонності;

***ηЗ*** – коефіцієнт екранування заземлювача ( *ηз*= 0,2 ÷ 0,9).

.



Для перевірки чи вірно проведений розрахунок перевіримо нерівність:

(5.4)



де ***RЗ*** – опір заземлювача (стрижня, труби, і т.п.), Om

***RП*** – опір смуги, що сполучає заземлювачі, Om;

***n*** – кількість заземлювачів;

***ηЗ*** і ***ηП*** *−*коефіцієнти екранування заземлювача та смуги, що сполучає заземлювачі (***ηз***= 0,2 ÷ 0,9; ***ηП*** = 0,1 ÷ 0,7);

***RЗ*** – загальний опір заземлюючого пристрою.

.



Отримане значення опору заземлюючого пристрою RЗП = Om менше гранично припустимого значення *RЗПдоп*= 4 Om. Отже, розрахована система заземлення задовольняє відповідним вимогам ПОЕ (правила облаштування електроустановок). Роботу з витравлювачем (при травленні ДП) слід проводити в спецодязі (халат, фартух поліетиленовий, бавовняні й гумові рукавички) і захисних окулярах. Робочі місця повинні бути обладнані витяжною вентиляцією. Робоче місце пайки повинно бути обладнане місцевою витяжною вентиляцією, що забезпечує концентрацію свинцю в робочій зоні не більше гранично припустимої − 0,01 mg/m3.



При виготовленні друкованих плат у запобіганні травм і профзахворювань робота зі шкідливими речовинами здійснюється з використанням фільтруючих засобів індивідуального захисту органів дихання, до яких відносяться універсальні респіратори і протигази. Для захисту рук як засоби індивідуального захисту застосовуються рукавиці і рукавички з різних матеріалів, а також захисні мазі, пасти і т.д. Для захисту очей застосовуються окуляри.

У виробничому приміщенні на організм і його працездатність впливають мікрокліматичні фактори. Мікроклімат виробничих приміщень визначається сполученням температури, вологості і швидкості руху повітря, а також температури навколишнього середовища.

Відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 категорії робіт при виготовленні блоку відносяться до 1-ої категорії – фізична робота легкої ваги. До цієї категорії відносяться роботи, здійснені сидячи і що не потребують фізичної напруги або пов'язані з ходьбою і супроводжуються деяким фізичним напруженням. Згідно з цим критерієм на виробничих ділянках необхідно підтримувати мікроклімат з параметрами, зазначеними в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 − Оптимальні норми температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Період року | Категорія робіт | Температура | Відносна вологість, % | Швидкість руху повітря, m/s, |
| Холодний та перехідний | Легка | 23-25 | 40-60 | 0,1 |
| Теплий | 22-24 | 40-60 | 0,1 |

## 5.3 Розробка заходів з екології

Основним напрямком, що забезпечує чистоту зовнішнього середовища, повинна бути організація технічних процесів, що виключає викид в атмосферу газів, парів, пилу. Для цього передбачають: герметизацію устаткування; установлення контрольних клапанів; очищення газових викидів.

З заходів щодо боротьби з пилом можна запропонувати наступні: заміна сухих матеріалів, що порошать, вологими, пастоподібними; заміна порошків таблетками або гранулами; герметизація апаратури.

Природоохоронна робота проводиться спеціалізованими службами: санітарно-гігієнічною, промислово-санітарною лабораторією, лабораторією стічних вод і газових викидів, ділянкою очисних споруд, цехом з переробки твердих відходів і їх захоронення, цехом нейтралізації та очищення стічних вод та ін, кількість яких залежить від розміру та специфіки підприємства. З ділянок виробництва найбільшу забруднювальну здатність має ділянка з виробництва ДП. У промстоки виробництво ДП викидає розчини фосфатів (три натрій фосфат), натрієву соду, сірчану, соляну, азотну кислоти, хлорну мідь, хлористий паладій, гідроокис натрію, трихлоретилен, хлорне залізо, персульфат амонію, хлорну мідь, і ряд інших токсичних речовин.

Для очищення повітря, що викидається в атмосферу встановлюються газо-пилеуловлювальні установки, а для очищення стічних вод, що надходять у загальноміську каналізацію − очисні споруди (станції нейтралізації). Призначення очисних споруд і газо-пилеуловлювальних споруд − довести до необхідної чистоти воду і повітря, щоб наявність шкідливих речовин у них не перевищувала ГДК. Для звільнення від пилу і парів відносно невеликих газових потоків з дрібнодисперсним пилом використовуються тканинні фільтри. Вони виконуються у вигляді рукавів з закритими "манжетами" або мішків, всередину яких подається очищений газ. Їх ефективність сягає 90% навіть у випадку фільтрації частинок діаметром 0,5 mkm.

Для очищення повітря від органічних розчинників широко застосовуються адсорбер типу А-1 і А-6, в яких сорбентом є поліакрілонітрільне полотно, модифіковане активованим вугіллям АГ-3. Для очищення повітря від парів кислот застосовуються фільтри типу УІФ-2. Для локальної очистки промстоків застосовуються різні установки. Установка очищення промстоків ОПВ-У застосовується для очищення стічних вод від хрому та іонів важких металів. Установка УР-1 призначена для регенерації розчину, використовуваного при травлення міді. Після локальної очистки доочищення стічних вод здійснюється на очисних спорудах.

Скидання виробничих стічних вод у міську каналізацію повинне скорочуватися також за рахунок застосування раціональних ТП, впровадження безстічної технології, повного або часткового водообігу, повторного використання стічних вод. У даному розділі був зроблений аналіз шкідливих виробничих факторів, запропоновані заходи для техніки безпеки, по виробничій санітарії і гігієні праці. Також були запропоновані заходи з пожежної безпеки й безпеки життєдіяльності. Був проведений розрахунок захисного заземлення та вентиляції, в якому були підібрані найбільш сприятливі параметри, для забезпечення сприятливих умов праці. Також вибір матеріалів та обладнання, на якому буде виготовлятися пристрій, проводився з врахуванням вищевказаних шкідливих та небезпечних факторів. Особливості утилізації друкованих плат і продуктів виробництва електроніки. В останні роки обсяг електронних виробів, що вичерпали робочий ресурс, неухильно зростає. Це викликає занепокоєння спільноти екологів в різних країнах світу. Переробляють переважно ті елементи, які містять сплави дорогоцінних металів.

Друковані плати та інші відходи електроніки відрізняються складним багатокомпонентним складом і мають відмінності в щільності, електропровідності і магнітних властивостях. З цієї причини утилізація комп'ютерної техніки з виділенням максимальної кількості корисних речовин представляє певну складність.

## 5.4 Утилізація

Хочемо ми того чи ні, людство перебуває в постійній залежності від процесу модернізації та заміни електронної техніки. Виробництво офісного обладнання, комп'ютерів і мобільних пристроїв з кожним роком стрімко збільшується. Проте є у прогресу і неприваблива сторона - застарілу і вийшла з ладу апаратуру необхідно кудись дівати - виникає поняття «електронне сміття», і про його обсягах можна тільки здогадуватися.

Будь техніка стрімко застаріває, їй на зміну приходять нові, більш потужні, більш сучасні. Людство, хоче воно цього чи ні, втягнуто в постійний процес модернізації та заміни електронної техніки. Ми радіємо новим моделям персональної техніки з новими можливостями. Поступово виникає проблема: а що робити зі старою технікою, морально застарілою або з тих чи інших причин, що вийшла з ладу, яка захаращує підсобні приміщення і склади. На відміну від органічних відходів, техногенний сміття неможливо утилізувати, використовуючи природні процеси регенерації. Більше того, враховуючи присутність у багатьох компонентах важких металів і отруйних речовин, спалювати його подібно побутовим відходам теж не можна. Переробка застарілої електроніки вимагає значних зусиль і являє собою чималу проблему. Ігнорувати її неможливо, бо вона несе серйозну загрозу для екології.

Екологи б'ють на сполох, загрожують санкціями провідним виробникам електроніки, якщо ті не вживуть заходів з утилізації персональної та іншої техніки. Навіть за приблизними оцінками з 1991 р в Україну було завезено понад 10 млн одиниць персональної й оргтехніки загальною масою понад 400 тис. т і ще близько 20 млн мобільних телефонів (близько 2400 т). Причому у сучасної електроніки є своя специфіка − вона в набагато більшому ступені складається з неліквідних матеріалів. Так, один комп'ютер класу 286 або 386 в комплекті з ЕПТ-монітором орієнтовно містить від 10 до 20 kg скла, 3 kg АБС-пластика, приблизно стільки ж чорних металів, по 200 g міді й алюмінію, всього 1 g срібла і не більше 10 mg золота. Тобто в основному мова йде про матеріали, вторинне використання яких неможливо, і тому вартість переробки значно перевищує вартість одержуваних металів.

Окрему проблему утилізації представляють кінескопи моніторів - через вміст отруйних речовин їх не можна навіть розібрати - як і ядерні відходи, їх слід тільки ховати в спеціальних могильниках. Розвинені країни задихаються від електронного сміття, оскільки одних тільки неробочих кінескопів і моніторів в них накопичилося понад 100 млн. Те ж саме відноситься і до батарей харчування й акумуляторам, що містять такі метали, як свинець, кадмій, цинк і нікель. І це приблизні дані. Точного підрахунку ніхто не проводить.

Стурбованість громадськості проблемами екології, а також нові, жорсткіші закони щодо захисту навколишнього середовища змушують великих виробників обладнання створювати мережі по збору вийшла з обігу техніки і заводи з її утилізації. Крім того, в конструкції обладнання максимально збільшується частка матеріалів, придатних для переробки. Розміри мережі з утилізації "електронного брухту" залежать від регіону та місцевого законодавства. Так, наприклад, у Західній Європі, де екологічні закони дуже суворі, компанія Hewlett-Packard створила досить значну інфраструктуру зі збору та переробки застарілих комп'ютерів та оргтехніки. Всього в Європі продукцію НР переробляють 30 заводів, один з яких знаходиться в Росії. Справедливості заради потрібно відзначити, що ці заводи не є власністю НР. Вони належать партнерським компаніям амеріканского вендора, які беруть участь в програмі утилізації списаної техніки.

Вся оргтехніка включає до свого складу як органічні складові (пластик різних видів, матеріали на основі полівінілхлориду, фенолформальдегіда), так і майже повний набір металів.

Всі ці компоненти не є небезпечними в процесі експлуатації виробу. Однак ситуація докорінно змінюється, коли виріб потрапляє на звалище. Такі метали, як свинець, сурма, ртуть, кадмій, миш'як входять до складу електронних компонентів переходять під впливом зовнішніх умов у органічні і розчинні сполуки і стають найсильнішими отрутами. Утилізація пластиків, що містять ароматичні вуглеводні, органічні хлорпохідні з'єднання є нагальною проблемою екології. Тому вся оргтехніка повинна утилізуватися.

Завдяки комплексній системі утилізації оргтехніки зводяться до мінімуму неперероблювальні відходи, а основні матеріали (пластмаси, кольорові і чорні метали) і цінні компоненти (рідкісні метали, люмінофор, ферити і ін.) повертаються у виробництво. Дорогоцінні метали, що містяться в електронних компонентах оргтехніки, концентруються і після переробки на афінажних заводах здаються в держфонд.

# Висновки

При виконанні цієї роботи були досліджені основні фізичні процеси, що лежать в основі функціонування спінтронних приладів і нанопристроїв на основі різних квантово-розмірних наноструктур. Досліджені можливі шляхи рішення проблем що стоять на шляху розвитку спінтроніки, як новому ступені розвитку сучасної електроніки. Розглянуті конструкції і принципи функціонування різних спінтронних приладів: нанотранзисторів, сенсорів, запам’ятуючих пристроїв, пристроїв прочитування інформації. Розглянуті їх перспективні моделі, конструкції і основні характеристики. Проведений аналіз умов праці, небезпечних і шкідливих виробничих чинників, а також розроблені заходи по техніці безпеки і рекомендації при роботі з електронними приладами. Проведений розрахунок захисного заземлення технологічного електроустаткування.

# Список літератури

1. Борисенко В. Е., Воробьева А. И., Уткина Е. А. Наноэлектроника. — БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.

2. Усанов Д. А., Скрипаль А В. Физика полупроводников. Явления переноса в структурах с туннельнотонкими полупроводниковыми слоями. — Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1996.

3. Шишкин Г. Г., Шишкин А. Г. Электроника. — М.: Дрофа, 2009.

4. Ч. Пул — мл., Оуэнс Ф. Нанотехнологии,изд. 3. — М.: Техносфера, 2007. 376 с.

5. Наумова О. В., Антонова И. В., Попов В. П. и др. Нанотранзисторы кремний-на-изоляторе: перспективы и проблемы реализации // Физика и техника полупроводников. — 2003. — Т. 37. Вып. 10. — С. 1253—1259.

6. Мултановский В. В., Василевский В.С. Курс теоретической физики. Квантовая механика. М.: Дрофа, 2007.

7. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Основы наноэлектроники. — М.: Университетская книга. Логос, 2006.

8. Борисенко В. Е., Воробьева А. И., Уткина Е. А. Наноэлектроника. — БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.

9. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике / Ю.А. Чаплыгин. — М.: Техносфера, 2005. — 448 с.

10. Щука А.А. Электроника : учеб. пособие / А.А. Щука: под ред. Проф. А.С. Сигова. — СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 800 с.

11. Нано - и микросистемная техника. От исследований к разработкам. / Сб. статей под ред. П. П. Мальцева*.* — М.: Техносфера, 2005.

12. Prinz G.A. Spin-polarized transport. [PhysicsToday](https://ru.wikipedia.org/wiki/Physics_Today), 1995. Vol.48..№ 4. P.353.

13. Рязанов *В. В.* Джозефсоновский π-контакт сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник как элемент квантового бита. УФН, 1999. Т.169. № 8. С.920.

14. Иванов В.А., Аминов Т.Г., Новоторцев В.М., Калинников В.Т. Спинтроника и спинтронные материалы. Изв. АН (Сер.хим.), 2004, № 11, С.2255-2303.

15. Maekawa S*.* (Ed) Concepts in Spin Electronics, 2006.

16. Дементий Л.В., Юсина А.Л. Охрана труда: рекомендации по выполнению раздела в дипломном проекте бакалавра для студентов технических специальностей.

17. Методичные указания к самостоятельной работе по дисциплинам «Основы охраны труда», «БЖД и охрана труда», «Охрана труда в отрасли» по теме: «Законодательство об охране труда» (часть вторая) (для студентов всех специальностей) / Сост. М.А. Касьянов, В.О. Медяник, В.И. Сало, О.М. Гунченко, В.А. Малов – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2008. – 50 с

18. Научно-методичный комплекс дисциплины «Основы охраны труда» (НМКДКД). (Эл. вид.). Луганск. ВНУ им. В. Даля, кафедра «ОП та БЖД», 2006г.

19. ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования».