

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ЛОКАЛІЗАЦІЯ ЗАРЯДОВИХ ПАКЕТІВ У
БАГАТОШАРОВИХ НАНОСТРУКТУРАХ
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання
групи МНПм – 23 – 1

Лугай І.Д.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 176 Мікро та наносистемна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма

«Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент О.Г. Пащенко
(посада, ініціали, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

І.М. Бондаренко
(ініціали, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 176 Мікро та наносистемна техніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Лутай Івану Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Локалізація зарядових пакетів у багатошарових наноструктурах. затверджена наказом по університету від 10.12.2024 р. № 1291 Ст _____
 2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _09_01_2025р.
 3. Вихідні дані до роботи: Локалізація електронів у наноструктурах.
 4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
 - 4.1 Опрацювати поняття зарядових пакетів
 - 4.3 Проаналізувати будову багатошарових структур
 - 4.3 Дослідити компоненти наноструктур
 - 4.4 Аналіз отриманих даних
- _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	12.12.2024	
2	Аналітичний огляд джерел	15.12.2024	
3	Систематизація джерел, обробка та постановка завдання для розрахунку	18.12.2024	
4	Вибір і досліджування структур компонентів	18.12.2024	
5	Дослідження елементів ПЗЗ на КРС	26.12.2024	
6	Оформлення пояснювальної записки	03.01.2025	
7	Підготовка презентації	04.01.2025	
8	Рецензування, нормоконтроль,	09.01.2025	

Дата видачі завдання 10 12 2024р.

Здобувач _____ І.Д. Лутай
(підпис)

Керівник роботи _____ доцент каф. МЕЕПП О.Г. Пащенко
(підпис) (посада, ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 46 сторінки, 16 рисунків, 4 таблиці.

ПЗЗ, ПОТЕНЦІАЛЬНА ЯМА, ЕЛЕКТРОН, МАТРИЦЯ, НАНОСТРУКТУРА.

Об'єкт дослідження роботи - локалізація зарядових пакетів у багатошарових наноструктурах.

Предметом дослідження – пристрої з зарядовим зв'язком.

Мета роботи - метою даної роботи є дослідити компоненти пристроїв з зарядовим зв'язком та обрати найкращі компоненти для зарядових пакетів.

Для досягнення цієї мети слід вирішити наступні завдання:

- розібрати поняття зарядових пакетів;
- обрати пристрої з багатошаровими наноструктурами;
- дослідити компоненти пристроїв;
- вивести таблицю найкращих компонентив для отримання зарядового пакету.

Вирішення цих завдань дасть можливість отримати оптимальні компоненти для розробки зарядових пакетів у багатошарових наноструктурах.

Метод наукових досліджень включає: дослідження зарядових пристроїв, дослідження матеріалів та компонентів.

Актуальність роботи обумовлена швидким розвитком нанотехнологій та їх важливістю для сучасної науки і техніки. Ця тема є ключовою для розуміння фундаментальних фізичних процесів у наноструктурах, а також для створення нових матеріалів і пристроїв із покращеними характеристиками.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 46 pages, 16 figures, 4 tables

CCD, POTENTIAL WELL, ELECTRON, MATRIX, NANOSTRUCTURE.

The object of the research work is the localization of charge packets in multilayer nanostructures.

The subject of the research is charge-coupled devices.

The purpose of the work is to investigate the components of charge-coupled devices and select the best components for charge packets.

To achieve this goal, the following tasks should be solved:

- analyze the concept of charge packets;
- select devices with multi-layer nanostructures;
- investigate the components of devices;
- derive a table of the best components for obtaining a charge packet.

Solving these tasks will make it possible to obtain optimal components for the development of charge packets in multilayer nanostructures.

The method of scientific research includes: the study of charge devices, the study of materials and components.

The relevance of the work is due to the rapid development of nanotechnologies and their importance for modern science and technology. This topic is key for understanding fundamental physical processes in nanostructures, as well as for creating new materials and devices with improved characteristics.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1 ПРИЛАДИ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ	10
1.1 ПЗЗ – матриця.....	10
1.2 CMOS – матриця	12
1.3 Сканери.....	14
2 ПРИНЦИП ДІЇ МАТРИЦІ ПРИЛАДІВ З ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ	18
2.1 Схема пристрою ПЗЗ – матриці.....	18
2.2 Фізичні основи роботи та конструкції приладів із зарядовим зв'язком	20
3 ПОТЕНЦІЙНА, КЛАСИЧНА ТА КВАНТОВА ЯМА.....	27
3.1 Потенційна яма загальні уявлення	27
3.2 Класична потенційна яма	28
3.3 Квантова яма.....	29
4 ЛОКАЛІЗАЦІЯ ЗАРЯДОВИХ ПАКЕТІВ В НАНОСТРУКТУРАХ	31
4.1 Локалізація електронів в наноструктурах	31
4.2 Електрони у прямокутній ямі.....	36
4.3 Тонка плівка, як двовимірна система.....	39
4.4 Довільна квантова яма	40
ВИСНОВКИ.....	44
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	46
ДОДАТОК А	Ошибка! Закладка не определена.
ДОДАТОК Б.....	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

МДН – метал-діелектрик-напівпровідник;

МПЕ - молекулярно-променева епітаксія;

ІЧ – Інфрo-червоне;

ПЗЗ - пристрій із зарядовим зв'язком;

CCD- Charge-Coupled Device;

CMOS - Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.

ВСТУП

У сучасній мікроелектроніці та наноелектроніці досліджується велика кількість різних приладів з наноструктурами та надгратами. За типом прилади можуть належати до різних частотних діапазонів та потужності, а в області застосування - до пасивних, підсилювальних та генераторних. У цьому кожен тип приладів використовує свої різновиди наноструктур. Використання того чи іншого виду наноструктури або надграти як активна область напівпровідникового приладу залежить від типу приладу та його параметрів, які передбачається досягти застосуванням наноструктури. Так само як і у звичайних напівпровідникових приладах, у приладах наноелектроніки основну роль у функціонуванні відіграють потоки заряджених частинок, пакети зарядові частинок різних типів і концентрацій.

Нанотехнології активно використовуються в медицині, фармацевтиці, машинобудуванні, промисловості, сільському господарстві, біології, електроніці, екології. В наш час можна виробляти багатошарові наноструктури. Багатошарові наноструктури являють собою матеріали, що складаються з шарів, що чергуються, товщиною в нанометровому діапазоні (1 – 100 нм). Такі структури часто створюються задля досягнення унікальних фізичних, хімічних і механічних властивостей, які зустрічаються у традиційних матеріалах.

Основні характеристики багатошарових наноструктур:

- малий розмір шарів: Наноструктури мають надзвичайно тонкі шари, що дозволяє регулювати їх властивості на атомарному рівні;
- високий ступінь контролю: Технології, такі як молекулярно-променева епітаксія (МПЕ) або осадження з парової фази, дозволяють точно контролювати склад, товщину та кількість шарів;
- інженерія властивостей: Такі матеріали демонструють покращені оптичні, магнітні, термічні та механічні властивості.

Приклади застосування:

- оптика. Багатошарові структури застосовуються для створення покриття антивідблиску та фільтрів, що працюють з певними довжинами хвиль;
- магнітні матеріали. Використовуються в спинтроніку (наприклад, у жорстких дисках) завдяки ефекту гігантського магнітоопору;
- мікроелектроніка. Як компоненти транзисторів, мікросхем та інших електронних пристроїв;
- енергетика. У сонячних батареях для підвищення ефективності перетворення енергії.

Розвиток багатошарових наноструктур продовжує відкривати нові горизонти в науці та техніці, дозволяючи створювати матеріали із заздалегідь заданими характеристиками для широкого спектру завдань.

Зарядовий пакет – це сукупність елементів які утворюють пристрій з зарядовим зв'язком. Пристрій із зарядовим зв'язком (Charge-Coupled Device, CCD) - це напівпровідниковий пристрій, який використовується для реєстрації та зчитування оптичних сигналів у вигляді електричних зарядів. Його основне застосування - перетворення світла в електронний сигнал, що робить CCD ключовим компонентом у цифрових камерах, телескопах, медичних сканерах і багатьох інших пристроях.

1 ПРИЛАДИ ІЗ ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ

1.1 ПЗЗ – матриця

ПЗЗ-матриця (пристрій із зарядовим зв'язком, або Charge-Coupled Device, CCD) — це фоточутливий сенсор, який перетворює світловий сигнал в електричний. Вона складається з великої кількості світлочутливих елементів (пікселів), кожен з яких фіксує інтенсивність світла, що на нього потрапляє. ПЗЗ-матриці широко використовуються у фотографії, відеозаписі, астрономії, медичних сканерах та наукових дослідженнях, як показано на рисунку 1.1 [3].

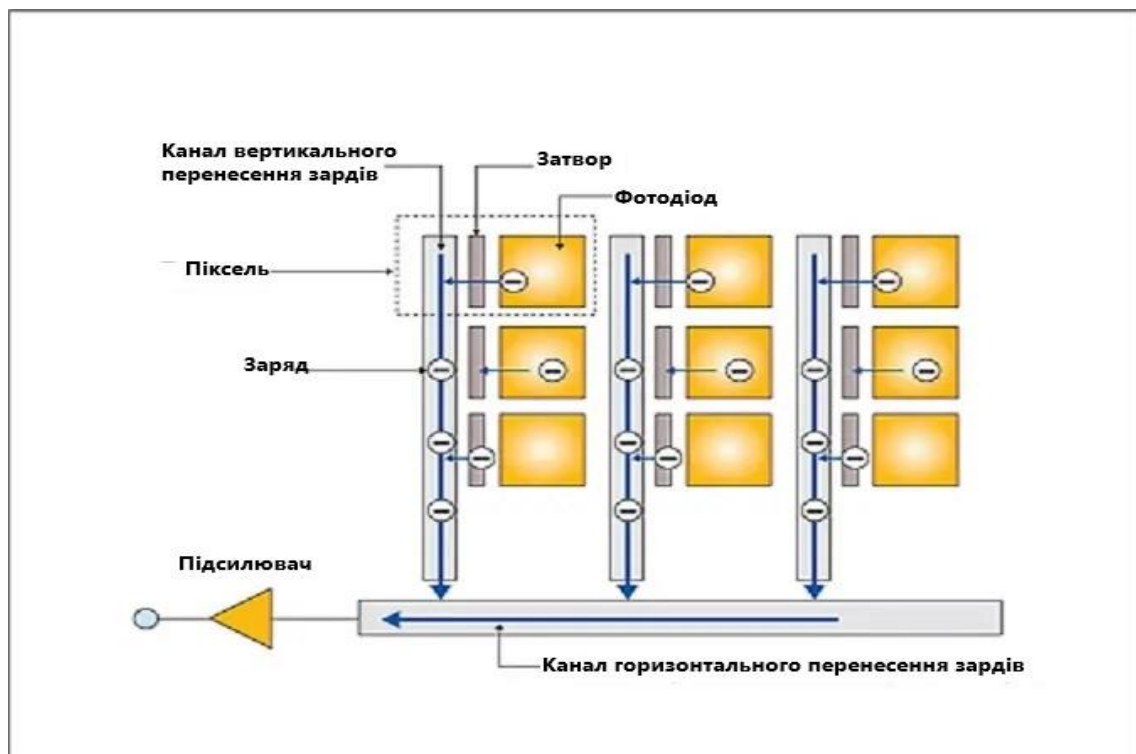


Рисунок 1.1 – Структура ПЗС-матриці

Принцип роботи ПЗЗ-матриці:

— поглинання світла. Світло, яке падає на кожен піксель, генерує електрони завдяки фотоэффекту [6]. Кількість електронів, що генеруються пропорційна інтенсивності світла;

— зберігання заряду. Електрони накопичуються в кожному пікселі у вигляді зарядового пакету;

— передача зарядів. Заряди передаються від пікселя до пікселя, поки не досягають регіону зчитування;

— зчитування та обробка. Заряди перетворюються на електричні сигнали, які обробляються для формування зображення.

Переваги ПЗЗ-матриць:

— висока чутливість до світла, забезпечує якісне зображення навіть у слабкому освітленні;

— відмінна якість зображення виникає завдяки низькому рівню шумів;

— точність передачі кольорів досягається високою однорідністю сенсорів, яка, у свою чергу, дозволяє отримувати реалістичні кольори.

Недоліки ПЗЗ-матриць:

— високе енергоспоживання. ПЗЗ-матриці споживають більше енергії, ніж CMOS-матриці;

— велика вартість виробництва. Особливо для великих сенсорів (великої площі);

— відносно низька швидкість зчитування. Нижча, ніж у CMOS, через послідовний процес передачі заряду.

Застосування ПЗЗ-матриць:

— астрономія. Завдяки високій чутливості до світла ПЗЗ-матриці використовуються в телескопах для фіксації слабо випромінюючих астрономічних об'єктів;

— наукові дослідження. Використовуються в мікроскопах, спектрометрах та інших приладах;

— медична візуалізація. Високоякісна фіксація зображень у рентгенівських сканерах та інших медичних пристроях;

— цифрова фотографія. Раніше широко застосовувалися у цифрових фотоапаратах, хоча поступово замінюються CMOS-матрицями.

Хоча ПЗЗ-матриці зберігають популярність у спеціалізованих галузях, таких як астрономія, для побутових пристроїв частіше використовуються CMOS-матриці через їхню економічність і енергоефективність;

1.2 CMOS – матриця

CMOS-матриці (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) — це фоточутливі сенсори, які використовуються для перетворення світлових сигналів у електричні. Вони стали популярними завдяки своїй енергоефективності, високій швидкості роботи та низькій вартості виробництва. CMOS-матриці зараз домінують у більшості пристроїв цифрової зйомки, таких як смартфони, вебкамери та цифрові фотоапарати, рисунок 1.2.

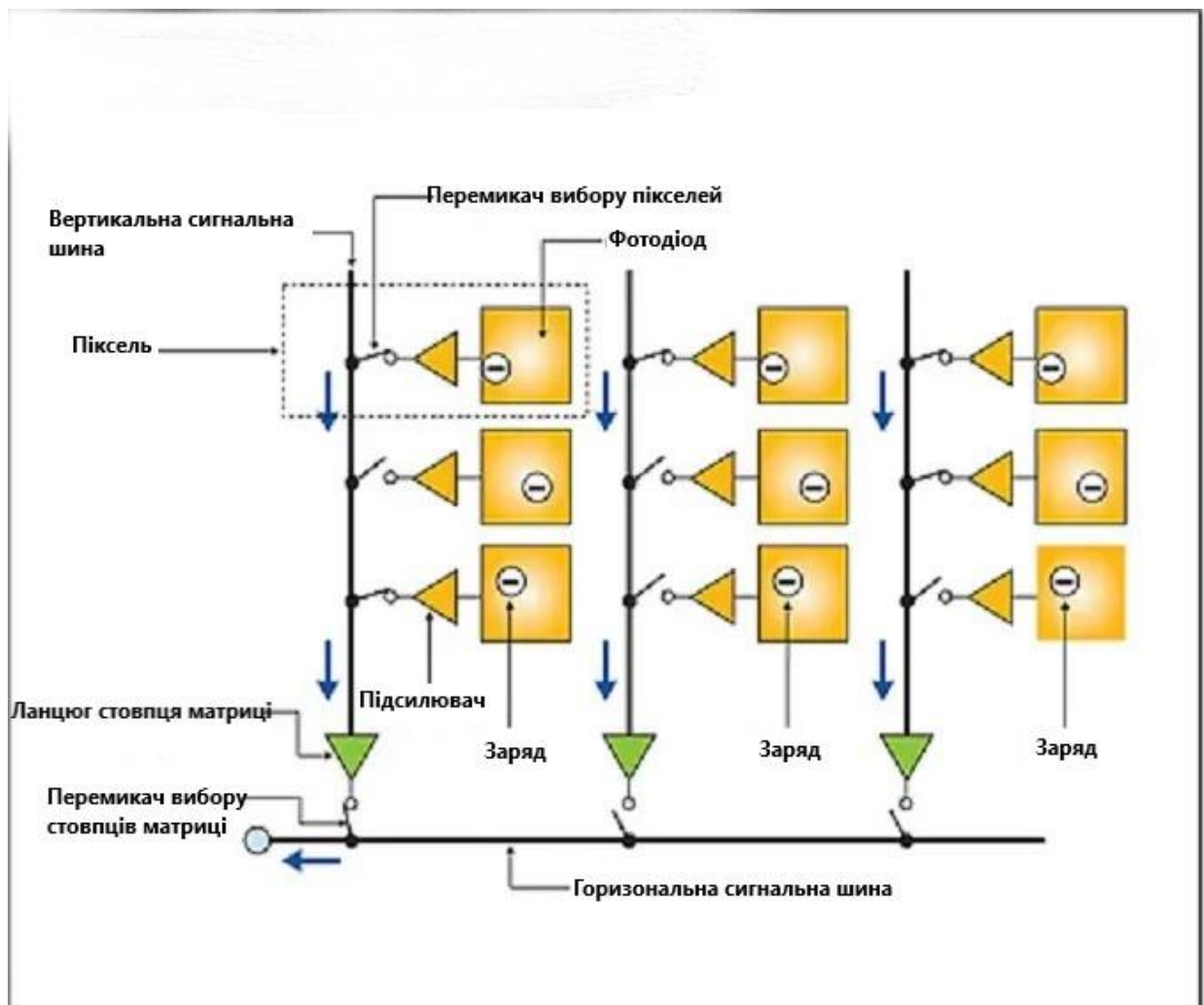


Рисунок 1.2 – Структура CMOS-матриці

Принцип роботи CMOS-матриці:

- поглинання світла. Світло, яке потрапляє на кожен піксель, викликає генерацію електронів завдяки фотоефекту;
- перетворення сигналу. У кожному пікселі є власний підсилювач та аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), які конвертують заряд в цифровий сигнал;
- паралельне зчитування: Завдяки інтеграції електроніки в кожному пікселі, CMOS-матриця може зчитувати сигнали одночасно з декількох пікселів, що значно підвищує швидкість роботи.

Переваги CMOS-матриць:

- енергоефективність. Споживають менше енергії порівняно з ПЗЗ-матрицями;
- висока швидкість зчитування. Завдяки паралельному зчитуванню сигналу;
- низька вартість виробництва. CMOS-сенсори виготовляються за тими ж технологіями, що й більшість мікросхем, що здешевлює їхнє виробництво;
- компактність. Інтеграція додаткових елементів (підсилювачі, АЦП) у саму матрицю дозволяє зменшити її розміри;
- висока роздільна здатність. Забезпечує якісне зображення навіть на невеликих сенсорах;

Недоліки CMOS-матриць:

- відносно високий рівень шуму. Рівень шуму в CMOS-матрицях зазвичай вищий, ніж у ПЗЗ, хоча сучасні технології значно знизили цю проблему;
- не достатньо висока якість передачі кольорів. У дешевих моделях може бути менш точною, ніж у ПЗЗ;
- невелика світлочутливість. Раніше CMOS поступалися ПЗЗ за чутливістю, але сучасні розробки мінімізували цю різницю.

Застосування CMOS-матриць:

- смартфони та планшети. CMOS-матриці забезпечують високу швидкість зйомки та низьке енергоспоживання;
- вебкамери. Завдяки низькій вартості та компактності;
- автомобільні камери. Для систем паркування та автопілотів;
- безпека та спостереження. Використовуються в камерах відеоспостереження;
- медичне обладнання. Наприклад, у цифрових ендоскопах.

Таблиця 1.1 - Порівняння CMOS та ПЗС-матриць

Параметр	CMOS	ПЗС
Енергоспоживання	Низьке	Високе
Швидкість зчитування	Висока	Нижча
Рівень шуму	Вищий	Нижчий
Вартість	Нижча	Вища
Якість зображення	Висока (залежить від моделі)	Дуже висока для спеціалізованих завдань

Сучасні CMOS-матриці значно покращилися і використовуються навіть у професійній фотографії, де раніше домінували ПЗС. Вони залишаються стандартом для багатьох електронних пристроїв.

1.3 Сканери

Прилад з зарядовим зв'язком (ПЗЗ) являє собою сукупність МДН-елементів, які сформовані на спільній напівпровідниковій підкладці так близько один від одного, що можуть взаємодіяти між собою.

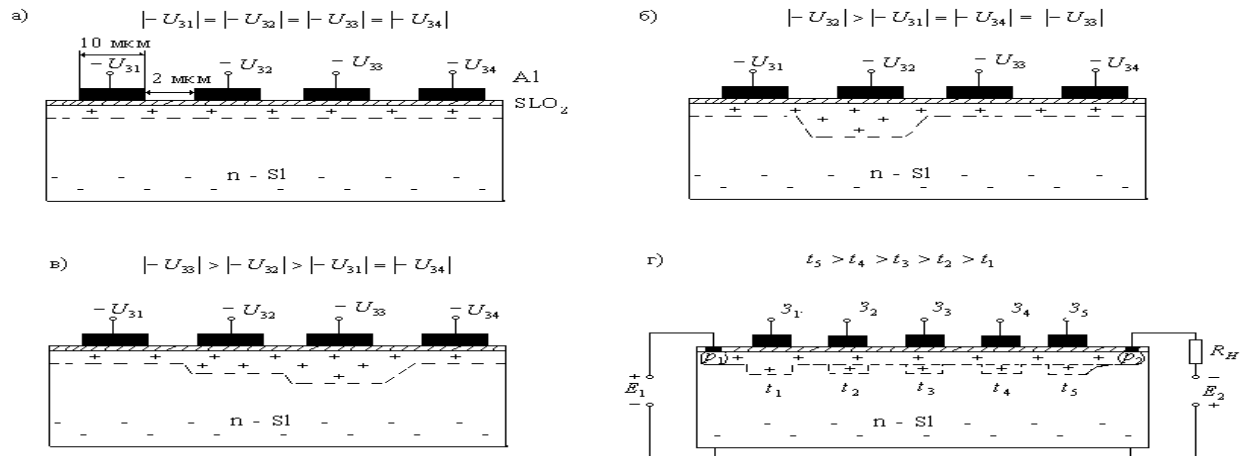
Принцип дії ПЗЗ заключається в накопиченні та зберіганні під затворами МДН-елементів об'ємних зарядів неосновних носіїв підкладки та їх переміщенні від одного елемента до іншого при зміні напруг на затворах структури. В цьому полягає основна відмінність ПЗЗ від інших напівпровідникових приладів.

ПЗЗ – структури зазвичай формують на основі n-кремнію. Від’ємні робочі напруги затворів ПЗЗ вищі порогових значень $U_{пор}$, тому під затворами виникають області, збіднені основними носіями. В них концентруються заряди неосновних носіїв – дірок, які зтягуються туди полем затвора. Внаслідок малих відстаней між затворами (2-3 мкм) збіднені носіями області зливаються в єдиний шар, рельєф якого відповідає розподіленню напруг на затворах.

Якщо напруги на всіх затворах однакові, об’єднаний шар вздовж усієї поверхні має одну й ту ж глибину, дірки розподіляються в ньому рівномірно (рисунок 1.3 а). Якщо на одному із затворів Z_2 діє від’ємна напруга, його поле утримує більший позитивний заряд дірок під цим затвором (рисунок 1.3 б). Об’ємний заряд дірок (зарядовий пакет) може зберігатися під цим затвором порівняно довго, так як в збідненій області майже нема електронів, з якими дірки могли б рекомбінувати. Такий режим роботи ПЗЗ називають режимом зберігання, а напругу затвора U_{z2} - напругою зберігання. Напруга U_{z2} складає від 10В до 15 В. Максимальний час зберігання залежить від допустимої зміни заряду дірок за час зберігання. При допустимій зміні заряду на 1% час зберігання складає від 10 до 20 мс. Розглянемо процес переміщення зарядового пакету від одного затвору до іншого. Нехай на затвор Z_3 подана від’ємна напруга більша, ніж на затворі Z_2 .

На межі затворів Z_3 і Z_2 виникає електричне поле, яке прискорює дірки і сприяє їх переміщенню в область під затвором Z_3 . Дірковий пакет, що зберігався під затвором Z_2 , переходить під затвор Z_3 і залишається там, оскільки на межі з наступним затвором Z_4 діє гальмівне поле, так як $|-U_{z4}| > |-U_{z3}|$.

Введення об’ємного затвора під затвор називають режимом запису, а напругу U_{z3} , що забезпечує такий ввід, - напругою запису.



а, б і в – розподілення об’ємних зарядів відповідно в режимах спокою, зберігання та запису;

г – схема ввімкнення та етапи переміщення зарядового пакета

Рисунок 1.3 - Пристрій з зарядовим зв’язком

В процесі переміщення зарядового пакета мають місце втрати заряду, обумовлені захватом деяких дірок приповерхневими пастками і тим, що частина дірок не встигає від одного затвора до іншого за час запису. Напруга запису складає від 20 до 25 В. Час запису від 20 до 50 нс. Час запису знижується при зменшенні відстаней між затворами, зростанні рухливості носіїв та підвищенні напруги запису.

В робочій схемі ПЗЗ первинним джерелом зарядів може слугувати вхідний р-п – перехід, ввімкнений в прямому напрямку джерелом зміщення E_1 (рисунок 1.3 г). Резистор навантаження підключає до вихідного р-п – переходу, зміщеному в зворотному напрямку джерелом зміщення E_2 . Змінюючи в строгій послідовності напруги затворів, можна реалізувати переміщення зарядового пакета від вхідного р-п – переходу через всі елементи ПЗЗ до вихідного р-п – переходу, ввімкненого в зворотному напрямку. Дірки, які переходять до останнього затвору, захоплюються полем р-п – переходу і створюють імпульс струму в вихідному колі. Загальний час затримки між вхідним сигналом і вихідним імпульсом визначається числом МДН – елементів в ПЗЗ структурі.

Затримка вхідного імпульсу на точний заданий час – одна з переваг ПЗЗ, яка визначає їх застосування в лініях затримки та перетворення аналогових сигналів.

Друга область застосування ПЗЗ – запам'ятовуючі пристрої – обумовлена можливістю порівняно довгого зберігання інформації в ПЗЗ після того, як пакети зарядів розмістились у відповідних МДН – елементах. При зчитуванні подаються тактові імпульси і записана інформація послідовно поступає на вихід. Запам'ятовуючі пристрої такого типу знаходять застосування в цифровій техніці, причому ємність їх досить велика.

Третя унікальна функція ПЗЗ визначається тим, що заряд носіїв можна вводити не тільки через відкритий р-n – перехід, але й шляхом локального освітлення поверхні. При цьому під відповідним затвором концентрується заряд, пропорційний величині освітленості. Якщо освітленість різна, то сукупність зарядів під затворами характеризує зображення, спроектоване на ПЗЗ. Подавши напругу зчитування, можна отримати на виході ПЗЗ послідовність імпульсів, амплітуди яких пропорційні освітленості, - принцип, який широко використовується в телебаченні при формуванні відеосигналів.

Ці особливості ПЗЗ визначають основні області їх застосування – формувачі відеосигналів, запам'ятовуючі пристрої, схеми аналогової обробки інформації, лінії затримки, фільтрації і кодування сигналів.

ПЗЗ мають перспективні техніко-економічні показники: відсутність великого числа р-n – переходів і контактних з'єднань визначає простоту їх технології, високу надійність та низьку вартість; густина елементів в ПЗЗ значно вища, а потужність, що витрачається на обробку інформації, на порядок менша, ніж у відповідних МДН – схем.

2 ПРИНЦИП ДІЇ МАТРИЦІ ПРИЛАДІВ З ЗАРЯДОВИМ ЗВ'ЯЗКОМ

2.1 Схема пристрою ПЗЗ – матриці

Схема пристрою ПЗЗ приведена на рисунку 2.1 [4]. На напівпровідникової поверхні (кремнієва підкладка) знаходиться тонкий (0,1 – 0,15 мкм) шар діелектрика (двоокис кремнію), на якому розташовуються смужки проводять електродів (з металу або полікри-сталліческого кремнію). Ці електроди утворюють лінійну або матричну регулярну систему, причому відстані між електродами настільки малі, що можуть бути суттєвими ефекти взаємодії сусідніх електродів.

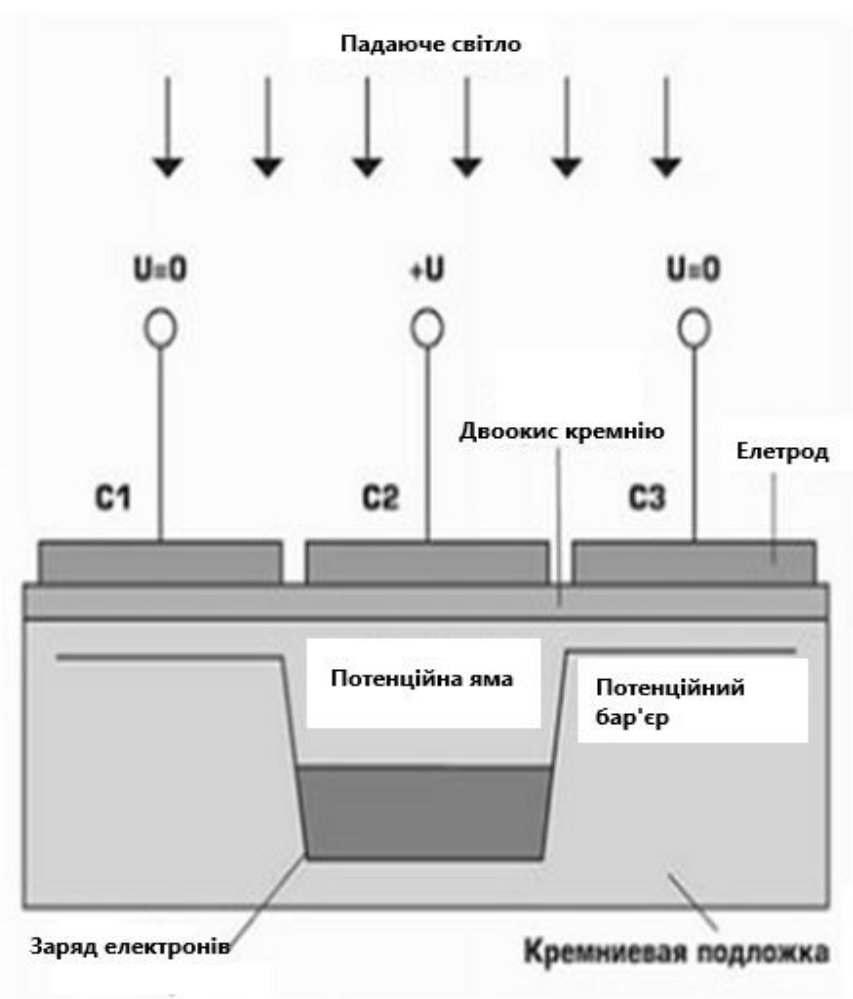


Рисунок 2.1 - Схема пристрою ПЗС-матриці

Принцип роботи ПЗЗ заснований на виникненні, зберіганні і спрямованій передачі зарядових пакетів в потенційних ямах, що утворюються в поверхневому шарі напівпровідника при додатку до електродів зовнішніх електричних напруг.

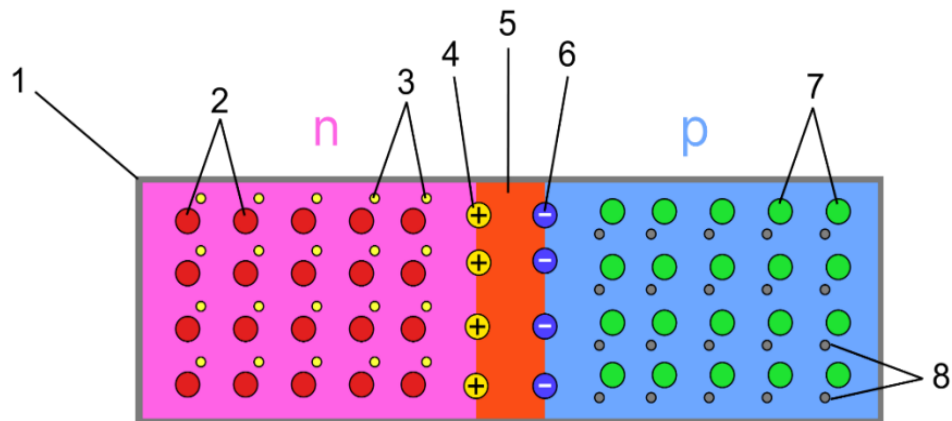
На рисунку 2.1 (C1, C2 і C3) позначені ємності конденсаторів, що виникають в структурах метал-діелектрик-напівпровідник (МДН). Якщо до якогось електроду докласти позитивне напруга U , то в МДН-структур виникає електричне поле, під дією якого основні носії (дірки) дуже швидко (за одиниці пікосекунд) йдуть від поверхні напівпровідника в його глибину. В результаті у поверхні утворюється збіднений дірками і збагачений електронами шар, товщина якого становить частки або одиниці мікрометра. Неосновні носії (електрони) переміщуються (під дією поля) до кордону розділу напівпровідник-діелектрик і локалізуються в вузькому (інверсному) шарі. Таким чином, у поверхні виникає потенційна яма для електронів, в яку вони «скочуються» зі збідненого шару під дією поля. Основні носії (дірки) під дією поля викидаються в нейтральну частину напівпровідника. Протягом заданого інтервалу часу кожен піксель поступово заповнюється електронами пропорційно кількості потрапив в нього світла. Після закінчення цього часу електричні заряди, накопичені кожним пікселем, по черзі передаються на «вихід» приладу і вимірюються. Одним з основних параметрів ПЗЗ матриці (як і всіх фотореєструючі приладів) є квантова ефективність.

Квантова ефективність - це відношення числа фотоелектронів, що утворилися в напівпровіднику або поблизу його межі в результаті фотоефекту, до числа фотонів які впали на цей напівпровідник. Це кількісна міра світлової чутливості. Оскільки енергія фотонів залежить від довжини хвилі, квантову ефективність також вимірюють для різних діапазонів довжин хвиль. За квантової ефективності ПЗЗ не мають собі рівних. Наприклад, квантова ефективність зіниці ока -1%; кращі фотоемульсії мають квантову ефективність приблизно 2-3%; електровакуумні прилади (наприклад, фотопомножувачі) - до 20%; у ПЗЗ цей параметр може досягати 95%. Крім того, надзвичайно широкий

діапазон довжин хвиль, на які реагує ПЗЗ: від десятих часток нанометра (гамма і рентгенівське випромінювання) до 1100 нм (ІК-випромінювання). Цей величезний діапазон набагато більше спектрального діапазону будь-якого іншого детектора, відомого до теперішнього часу.

2.2 Фізичні основи роботи та конструкції приладів із зарядовим зв'язком

Робота ПЗЗ ґрунтується на властивостях напівпровідників та їх взаємодії [5]. Ввести заряд у систему можна як за допомогою р-n переходу, так і за допомогою фотоефекту. р-n-перехід або електронно-дірковий перехід - область зіткнення двох напівпровідників з різними типами провідності - діркової (у напівпровіднику р-типу) та електронної (у напівпровіднику n-типу). Утворення замикаючого шару при контакті напівпровідників р- і n-типів зображено на рисунку 2.2.



1 – кристал кремнію, 2 – атоми донорної домішки, 3 – надлишкові електрони, 4 – позитивно заряджені іони, 5 – замикаючий шар, 6 – негативний іони, 7 – атоми акцепторної домішки, 8 – дірки

Рисунок 2.2 - Утворення замикаючого шару

Методом дифузії та іонної імплантації в кристал чистого кремнію (1) впроваджується атом з п'ятьма валентними електронами (2), один з цих

валентних електронів залишиться вільним від зв'язку з атомами кремнію і при попаданні кристала з даною домішкою в електричне поле, надлишковий електрон (3) атома домішки буде легко зірваний із зовнішньої оболонки і почне переміщення при набагато меншій напрузі, прикладеній до напівпровідника, ніж у чистому кремнії. Така домішка називається донорною або віддає, а отриманий напівпровідник буде напівпровідником n-типу. Напівпровідник p-типу виходить тим же способом, але як домішка в кристал кремнію впроваджується не п'ятивалентний, а тривалентний атом (7), це призводить до того, що один із зв'язків із сусіднім атомом кремнію виявиться не повним і у зв'язку між атомами буде утворена дірка (8), вільне місце з некомпенсованим позитивним зарядом. Такий тип домішки називається акцепторним або таким, що приймає. При попаданні такого напівпровідника в електричне поле електрони з сусідніх атомів починають переміщатися на вільні місця, дірки. Однак у цьому випадку реальними носіями заряду так само залишаються негативно заряджені електрони. Беручи до уваги той факт, що для перенесення електрона від одного атома до іншого потрібно більше енергії ніж для вільного переміщення всередині кристала, то провідність p-типу завжди слабкіше електронної за рівних умов. Збільшуючи кількість домішок у кристалі його опір падає, а електричні властивості зміщуються від ізолятора до провідника. Якщо встановити контакт між напівпровідником n-типу і p-типу, причому обидві області повинні розташовуватися на одному кристалі кремнію, то почнеться процес дифузії, на місці контакту двох систем електрони, отримавши енергію від тепла, покинуть свій атом і почнуть хаотичний рух, а деяким електроном вдасться подолати межу поділу двох систем, що називається p-n переходом. Дірки, що перейшли з p-області в n-область більше, не дадуть електронам перейти з n в p область, притягуючи їх до себе. Те саме станеться і на іншій половині. Атоми донорів, що залишилися без електронів, перетворяться на позитивні іони (4), а атоми акцепторів, які втратили дірок у негативні іони (6), які теж не пропустять рухомі носії заряду зі своїх областей в чужу. У цей момент p-n перехід на межі напівпровідників припиниться і утворюється замикаючий

шар (5), а система встановиться в електричну рівновагу. При підключенні р-області до мінусу джерела живлення, а n-області відповідно до плюсу, електрони під впливом електричного поля притягнуться до позитивного контакту, а дірки відповідно до негативного, тим самим замикаючий шар буде збільшуватися (рисунок 2.3). При зміні контактів джерела живлення, електрони так само почнуть притягувати до позитивного контакту, а дірки до негативного, і все ж таки зможуть подолати р-n бар'єр подолавши весь кристал, а з джерела живлення нові електрони будуть рухатися тим же маршрутом, при цьому електричний ланцюг замкнеться і встановиться безперервний струм.

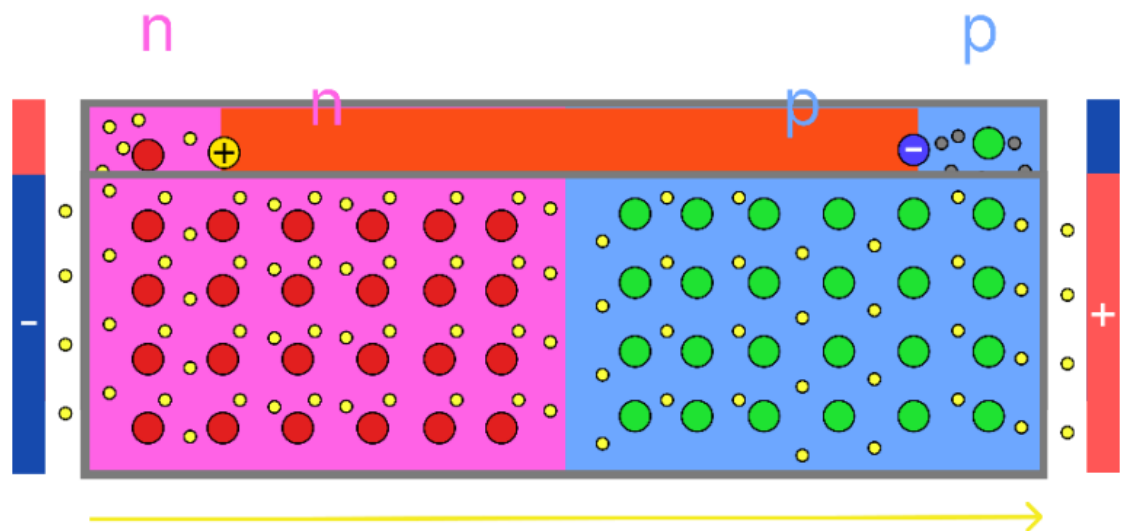
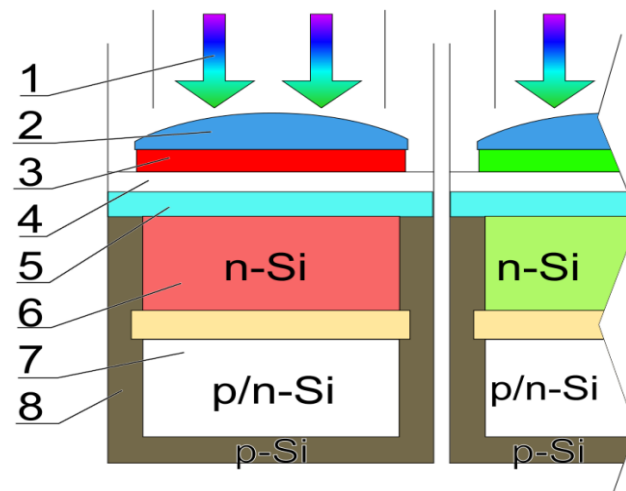


Рисунок 2.3 – Схема зворотного включення р-n переходу

Також у ПЗЗ пристроях використовується така властивість напівпровідників, як фотоефект, при вплив на напівпровідник випромінювання у ньому збільшується кількість основних носіїв заряду. Дана властивість можна використовувати для розробки ПЗЗ пристроїв, що переводить зовнішнє випромінювання в електричний сигнал, цей метод широко застосовується у пристроях фіксації зображення.

На рисунку 2.4 показано схему субпікселів ПЗЗ – матриці [5].



1 - випромінювання, в даному випадку фотони, які необхідно вважати і МДН структура (один субпіксель) ПЗЗ матриці, що складається з таких елементів як:

2 - мікролінза субпікселя яка необхідна для того, щоб матриця захоплювала якнайбільше світла, 3 - світлофільтр, який пропускає світлові хвилі певної довжини, в даному випадку R - Червоний світлофільтр, 4 - світлопроникний електрод (затвор), 5 - SiO (діелектрик), 6 - зона внутрішнього фотоефекту (кишеня n типу), 7 - зона потенційної ями, 8 – кремнієва підкладка p – типу

Рисунок 2.4 - Схема субпікселів ПЗЗ-матриці

Світло, що падає на МДН структуру проходячи через світлофільтр (3), який пропускає хвилі тільки необхідної довжини, минає прозорий електрод (4) і проникає вглиб структури потрапляючи на кремнієву підкладку (8), де відбувається перетворення світла в заряд в результаті внутрішнього фотоефекту: світлові кванти поглинаються кристалічною решіткою напівпровідника із виділенням носіїв заряду. Це може бути пара «електрон + дірка», або одиничний носій заряду – останнє відбувається при використанні донорних або акцепторних домішок у напівпровіднику.

У такому разі використовується акцепторная домішка, відповідно виникатиме лише одиничний носій заряду. Очевидно, що носії заряду до моменту зчитування необхідно якось зберегти Для зберігання заряду в структурі, кремнієва підкладка (8), основний матеріал ПЗЗ-матриці, оснащена

каналом з напівпровідника n-типу (6), над яким розташовується прозорий для фотонів електрод з полікристалічного кремнію (4) з ізолюючим прошарком з оксиду кремнію (5). При подачі цей електрод потенціалу навколо нього формується електричне поле, а під n-каналом в збідненій зоні утворюється потенційна яма, за допомогою електричного поля надлишкові електрони притягуються до потенційної ями, в якій і затримуються. Чим більше фотонів потрапить на ПЗЗ-елемент і перетвориться на електрони, тим вищим буде заряд, накопичений ямою. При цьому електрони в міру накопичення в ямі частково нейтралізують електричне поле і врешті-решт можуть повністю його компенсувати, так що все електричне поле падатиме тільки на діелектриці, і все повернеться у вихідний стан - за винятком, що на межі розділу утворюється тонкий шар електронів. Це пов'язано з тим, що до позитивного потенціалу притягуються негативно заряджені носії заряду – електрони, а позитивно заряджені – дірки – відштовхуються. Після накопичення електронів у субпікселях кожного пікселя, заряд, що отримав назву фотострумів, необхідно вважати з кожної потенційної ями матриці. При зчитуванні заряду використовується здатність ПЗЗ-елементів до переміщення зарядів потенційних ям – власне, саме тому ці пристрої називаються приладами із зарядним зв'язком. Для цього на провідник чергової МДН структури подається більша напруга, ніж у попередньої, внаслідок чого в кремнієвій підкладці цього елемента утворюється більш глибока потенційна яма, в яку спрямовуються електрони з попереднього елемента т.к. потенціал електричного поля більший. Пристрій зчитування, який повинен отримувати та записувати заряд з кожної потенційної ями, розташований в одному з кутів матриці. Для доставки зарядів до пристрою зчитування ПЗЗ матриці використовується два види перенесення заряду: паралельний і послідовний. Паралельний перенесення здійснюватиме перенесення заряду не одного елемента, а цілого рядка на наступний, аж до зсувного регістру, одночасно. Послідовне перенесення відповідає за поступове зсув заряду до пристрою зчитування заряду. Обидва переноси працюють за одним принципом: При синхронній подачі різного потенціалу на провідники

МДН-структур забезпечується одночасне перенесення всіх зарядів рядка праворуч наліво (або ліворуч) за один робочий цикл.

Щоб виконувати всі ці переноси необхідно велика кількість керуючих мікросхем, які синхронізують подачу потенціалів на обидва реєстри. Розглянемо подачу потенціалів та перенесення зарядів за один цикл на трифазному ПЗЗ пристрої. Для цього будемо використовувати три шини, які по черзі з'єднують кожен 3-й елемент починаючи з: 1-а шина - з 1-го елемента, 2-а шина - з 2-го, 3-я шина - з 3-го. Спочатку напруга всіх шин мало і однаково. Подамо напругу (U_2) на першу шину (рисунок 2.5 а), таким чином створюється напруга на 1-му елементі і потенційну яму скочуються утворені фотоелектрони. При цьому напруга на 2-му і 3-му провідниках дорівнює нулю. Ця напруга є напругою зберігання заряду та ПЗЗ працює в режимі зберігання. Тепер подамо вищу напругу (U_3) на другу шину (рисунок 2.5 б). Напруга на провіднику 2 буде вищою, тому електрони з елемента 1 перейдуть у другий елемент під дією сильнішого електричного поля. Напруга U_3 є напругою перенесення, а ПЗЗ працює в режимі передачі заряду. Після цього ми зменшуємо напругу на провіднику 1 до початкового (U_1) та напругу на провіднику 2 до того, яке було на провіднику 1 в момент зберігання заряду (U_2). Таким чином, ми повертаємо ПЗЗ в режим зберігання. Виконуючи синхронні подачі напруги на шини, ми доб'ємося перенесення заряду з одного боку в інший і переведення його в цифровий сигнал.

Однак при такому способі зчитування можна зіткнутися з проблемою того, що при зрушенні генерація електронів не припиняється, а значить у пакети зарядів потрапляє надлишковий заряд, який псує зображення, що отримується. Ця проблема вирішується додаванням механічного затвора, який перекриває фотони доступ до матриці, а значить генерація електронів припиняється до моменту повного зчитування зображення. Однак це рішення не може надати зчитування відеоряду. У камерах відеозапису затвора немає, а боротьба з надлишковим зарядом ведеться за допомогою буферних елементів.

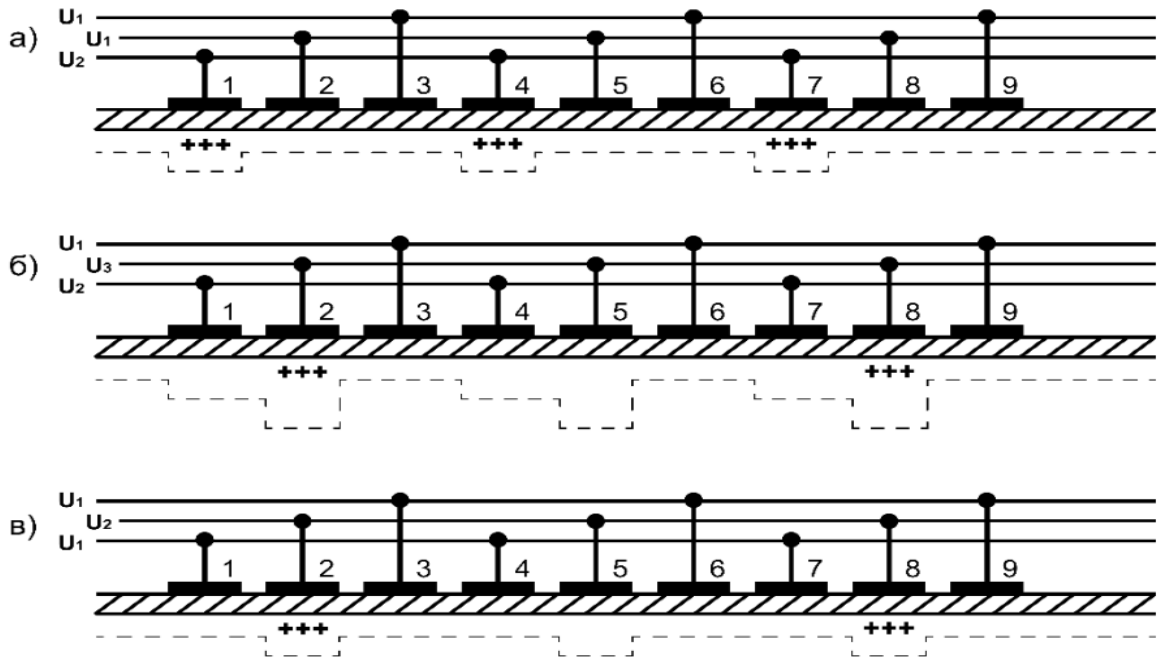


Рисунок 2.5 – Переміщення зарядів між МДН – структурами[5]

Поряд з основною МДН-структурою, розташовується така сама, але повністю захищена від впливу світла буферна структура. При отриманні заряду, основні МДН елементи передають його на буферні елементи, в яких вже відбувається перенесення і зчитування зарядів за описаним вище методом.

3 ПОТЕНЦІЙНА, КЛАСИЧНА ТА КВАНТОВА ЯМА

3.1 Потенційна яма загальні уявлення

Для розуміння роботи ПЗЗ дуже суттєвим є поняття потенціальної ями [7]. Його широко використовують у фізиці, особливо у квантовій механіці. Зрозуміло, що «яма» - це умовність, що означає лише таке місце в кристалі, де потенціальна енергія частинки має мінімум - якраз там зрештою опиниться частинка, якщо ніщо її не затримує. Енергія частинки може визначатися дією будь-яких сил: земним тяжінням, ядерною взаємодією або електричним полем (як і в цьому випадку). Чим більший електричний потенціал, тим більша глибина ями, тобто тим сильніше «тягне» туди частинку. За наявності багатьох різних ям частинки прагнуть опинитися в самій глибокій. Поняття «потенціальна яма» в ПЗЗ використовують для констатації наявності необхідних умов, які сприяють накопиченню зарядів. Процеси ПЗЗ нагадують процеси створення індукованих каналів у МДН- транзисторах. Накопичення зарядів у поверхневому шарі підкладки МДН- структур теж можна розглядати як накопичення в потенціальній ямі. Прилади із зарядовим зв'язком являють собою сукупність взаємодіючих МДН-структур, що забезпечується загальним напівпровідниковим шаром і малою відстанню між затворами. Принцип дії ПЗЗ ґрунтується на тому, що в кожній окремій МДН – структурі можна накопичити локальний заряд неосновних носіїв - зарядовий пакет - і зміщувати його вздовж поверхні з-під однієї МДН – структури під іншу, змінюючи необхідним чином напругу на металевих електродах. Прилади із зарядовим зв'язком складаються з багатьох технологічно поєднаних МДН- структур, розташованих на дуже малих відстанях одна від одної, а тому є типовим прикладом мікроелектроніки - інтегральною мікросхемою. Більше того, ПЗЗ є прикладом великої ІМС, оскільки кількість МДН- структур у ньому перевищує декілька тисяч. За аналогією з МДН- транзисторами металеві електроди ПЗЗ називають затворами.

Робочі напруги на затворах ПЗЗ перевищують порогові напруги. Тому в напівпровіднику під затворами утворюються порівняно глибокі збіднені шари - потенціальні ями. Створення тонких інверсійних шарів поблизу поверхні напівпровідника в ПЗЗ є небажаним. Глибина потенціальних ям прямо залежить від напруги на затворі. Через малу відстань між затворами збіднені шари «зливаються» в єдиний збіднений шар, «дно» якого (дно сукупності потенціальних ям) має визначений рельєф, що відповідає розподілу напруги на затворах. Якщо напруга на даному затворі більша, ніж на двох суміжних, то під ним формується «поглиблення». Геометричний рельєф збіднених шарів створюється потенціальним рельєфом. Структура ПЗЗ може бути сформована на кремнієвій підкладці n- або p-типу. Відповідно для створення потенціальних ям та переміщення зарядів вздовж структури на затвори подається або позитивна, або негативна напруга. Для цього використовують генератори, які формують періодичну послідовність тактових імпульсів. Зрозуміло, що тривалість збереження пакета носіїв, накопичених у потенціальних ямах, обмежена. Відбувається рекомбінація, змінюється кількість неосновних носіїв внаслідок термогенерації і т. ін. Зрештою в статичному режимі пакети зарядів під усіма затворами вирівнюються і поняття зарядового пакета, яке лежить в основі роботи ПЗЗ, втрачає сенс. Отже, тривалість зберігання інформації (пакетів зарядів) у ПЗЗ обмежена зверху. Це обмеження залежить від того, яке зменшення заряду допустиме протягом часу зберігання. Якщо допустима зміна становить 1 %, то тривалість зберігання на перевищує 10...20 мс. Таким чином, робота ПЗЗ оснований на нестационарному режимі елементів, а сам він є приладом динамічного типу,

3.2 Класична потенційна яма

Якщо потенційна яма має досить великі розміри і в неї потрапила частка, енергія якої нижче, ніж необхідна для подолання країв ями, можуть виникнути коливання частки в ямі. Їх амплітуда буде визначатися енергією частинки E , а

період - також профілем потенційної енергії та масою частинки [5]. Частинка, що перебуває на дні потенційної ями, перебуває в стані стійкої рівноваги, тобто під час її відхилення від точки мінімуму потенційної енергії виникає сила, спрямована в протилежний відхиленню бік, рисунок 3.1.

В одновимірному випадку, коли потенційна енергія залежить тільки від однієї декартової координати, можна виділити енергію руху частинки в напрямку цієї координати та енергію руху в перпендикулярній площині (\perp). Рух у площині відбувається з постійною швидкістю. Рух уздовж осі обмежений точками x_1 , x_2 , в яких $V(x) = E$. Якщо жодного руху в площині немає, то $E = V(x)$.

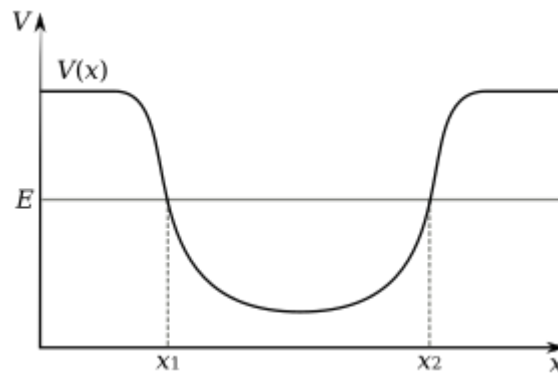


Рисунок 3.1 - Потенційна яма

Якщо частинка має повну енергію і рухається лише вздовж осі X , то такий рух у класичному випадку повністю, а в квантовому переважно локалізовано на ділянці від X_1 до X_2 . Потенційна яма - область простору, де є локальний мінімум потенційної енергії частинки.

3.3 Квантова яма

Якщо розмір ями малий (хоча б за однією з декартових координат можна порівняти з дебройлевою довжиною частинки) [5], то така яма називається квантовою і поведінка частинки в ній підпорядковується квантовим законам. Квантова яма, в якій потенційна енергія залежить від усіх трьох координат, називається квантовою точкою, від двох координат - квантовим дротом

(ниткою), а від однієї координати - власне квантовою ямою. В останньому випадку енергія, асоційована з рухом уздовж осі X , може набувати не будь-яких значень, а тільки з ряду дискретних: E_n , знайдених під час розв'язання рівняння Шредінгера для даного профілю ями. Обмежень на складову немає, і, відповідно, не може виявитися нижчою за E_0 .

Як і в разі потенційної ями великих розмірів, за відсутності руху в площині буде і частинка перебуває переважно в області $x < 0$. Однак, якщо класична частинка взагалі не може проникати в координатну область поза зазначеним діапазоном, то для квантової частинки це можливо за рахунок так званого тунельного ефекту, тобто межі руху нестрогі.

Серед форм ям, що становлять практичний інтерес і вивчаються в курсах квантової механіки, - прямокутна з нескінченними стінками та зі стінками скінченної висоти, трикутна, параболічна та деякі інші, складніші.

4 ЛОКАЛІЗАЦІЯ ЗАРЯДОВИХ ПАКЕТІВ В НАНОСТРУКТУРАХ

4.1 Локалізація електронів в наноструктурах

Створення наноструктури в активній області того чи іншого напівпровідникового приладу призводить до виникнення ряду потенційних штучних бар'єрів і ям, які спочатку задають енергетичні та електрофізичні властивості носіїв [9]. Сумарне поле носіїв, що опинилися в активній області приладу, як в результаті теплової генерації, так і в результаті узгодженого спрямованого руху в результаті зовнішнього польового або будь-якого іншого виду впливу, як правило, не впливають на потенційний рельєф наноструктури. Характер руху носіїв у сфері наноструктури змінюється проти звичайним, об'ємним напівпровідниковим приладом. Тому електрофізичні властивості приладів з наноструктурами в основному визначаються параметрами наноструктури та її впливом на процеси генерації, накопичення та рекомбінації носіїв, а також на їх спрямований і тепловий рух. Так, наприклад, у фотоприймачах різних типів та сонячних елементах з наноструктурами забезпечується просторовий поділ електронів і дірок з метою недопущення паразитної рекомбінації та підвищення сили струму, одержуваного від таких елементів. Крім того, застосування наноструктур дозволяє найбільш повно охопити заданий діапазон довжин хвиль, поглинається оптичного випромінювання - якомога ширшого у випадку сонячного елемента, і якомога вузшого - у випадку датчика або монохромного фотоприймача. У світлодіодах і напівпровідникових лазерах наноструктури сприяють утворенню інверсної населеності, перешкоджають паразитному бічному розтіканню носіїв, сприяють зниженню порогового струму та формуванню оптичного хвилеводу в активній області приладу для виведення генерованого випромінювання, збільшенню його спрямованості та зниженню втрат на розсіювання. В електронних напівпровідникових приладах застосування наноструктур дозволяє більш

широко та якісно застосовувати тунельний механізм перенесення зарядів у порівнянні з традиційними об'ємними приладами. У приладах, що використовують резонансне тунелювання електронів, - резонансно-тунельних діодах, резонансно-тунельних транзисторах, біполярних транзисторах з надтонкою тунельно-проникною базою і деяких інших, наноструктури дозволяють створювати К-подібну вольтамперну характеристику з заданими величинами заданою крутістю ділянки негативного диференціального опору. У приладах з лавинним механізмом розмноження носіїв заряду наноструктури сприяють локалізації носіїв у потенційних ямах різних форм і розмірів, а також сприяють формуванню поля, що прискорює або тягне, при подачі на прилад керуючого напруги. У будь-якому конкретному застосуванні тієї чи іншої наноструктури визначальну роль відіграє сумарний самоузгоджений потенціал усієї сукупності потенційних ям, бар'єрів, буферних, обмежувальних та розділових шарів. При цьому в самій наноструктурі її елементи можуть взаємодіяти між собою, породжуючи періодичний надгратковий потенціал, або розташовуватися на такій відстані один від одного, яка виключає або суттєво ускладнює їхню взаємодію. Досить часто практично зустрічаються прилади, у яких є обидва виду розташування елементів наноструктур. Крім того, наноструктура може складатися з неповторних як взаємодіючих, так і невзаємодіючих елементів або навіть надграт з різними структурними параметрами. Коректне та повне моделювання таких наноструктур неможливе без з'ясування ступеня взаємодії та взаємного впливу елементів, що становлять наноструктуру один на одного. У макромасштабі вільні електрони у твердому тілі переміщаються по кожному з трьох просторових напрямків. І тут кажуть, що електронний газ тривимірний. Хвиля, що відповідає вільному електрону у твердому тілі, може безперешкодно поширюватись у будь-якому напрямку. При зменшенні розмірів напівпровідникового приладу до мікромасштабів ця властивість зберігається аж до певного граничного розміру.

Ситуація кардинально змінюється, коли електрон потрапляє в твердотільну структуру, розмір якої L принаймні в одному напрямку обмежений

і за своєю величиною порівняний з довжиною хвилі де Бройля. Класичним аналогом такої структури є струна із жорстко закріпленими кінцями. Коливання струни можуть відбуватися лише у режимі стоячих хвиль із довжиною хвилі.

$$\lambda_n = 2L/n, n = 1, 2, 3, \dots$$

Ефект, що виникає при обмеженні або лімітуванні руху електронів фізичними розмірами області, в якій він знаходиться, називається ефектом локалізації або розмірним квантуванням або розміром квантовим ефектом.

Квантовий розмірний ефект пов'язаний із квантуванням імпульсу електрона. У результаті безперервний енергетичний спектр електронів розпадається на дискретні рівні, тобто. відбувається квантування енергії діапазону електрона, рисунок 4.1.

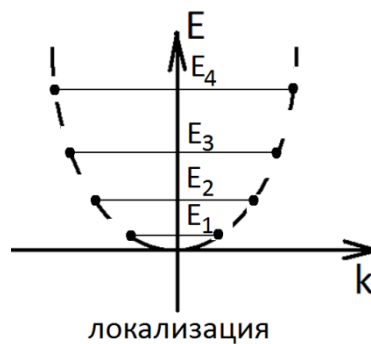


Рисунок 4.1 - Квантування енергії спектру електрона

В результаті такого квантування електрофізичні властивості електронів, наприклад, питомий опір зразка починає осцилювати в залежності від нанорозміру зразка, рисунок 4.2.

Ефекти осциляції питомого опору та лінеаризації енергетичного спектру носіїв спостерігаються в таких квантових структурах, як тонкі напівпровідникові або металеві плівки, вузькі приповерхневі області просторового заряду (вузькі канали). Умовно графічно квантово-обмежені структури можна уявити собі, як показано на рисунку 4.3.

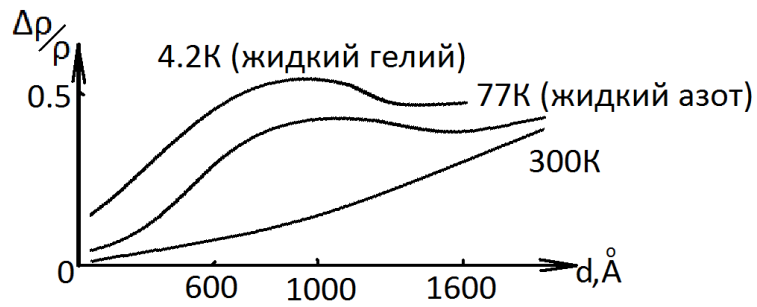


Рисунок 4.2 – Опір зразка в залежності від нанорозміру

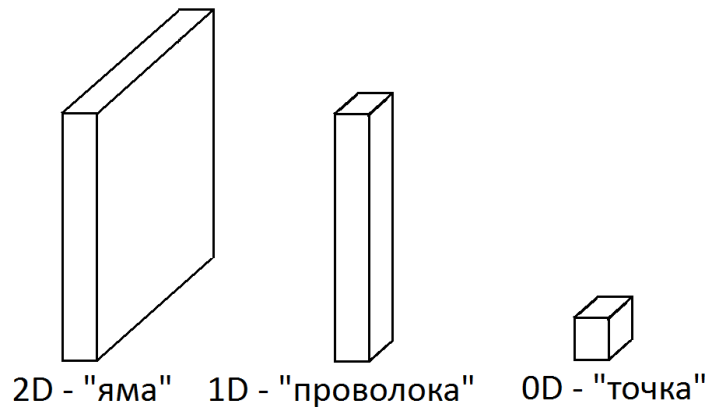


Рисунок 4.3 - Квантові структури

У квантовій ямі електрони провідності локалізовані за одним виміром і не локалізовані за двома іншими в площині, перпендикулярній цьому виміру, тобто. електрони у ямі – двомірний електронний газ.

Історично такі ефекти вперше були експериментально виявлені в 60-х роках у тонких плівках. В даний час технологія виготовлення напівпровідникових наноструктур знаходиться на високому рівні та продовжує швидко вдосконалюватись.

Гетеропереходи типу GaAs/Al_xGa_{1-x}As, де x – частка атомів галію, заміщених атомами алюмінію та структури типу МДП, є найбільш добре вивченими типами квантоворозмірних наноструктур.

Удосконалення технології зараз дозволяє отримувати гетеропереходи на основі таких традиційних напівпровідникових матеріалів, як Ge і Si. Існує ряд методів, що дозволяють створювати структури, у яких рух електронів має

одновимірний і навіть 0 – мірний характер. Тенденція зниження розмірності напівпровідникових структур відображена у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 - Зниження розмірності структур

Наноструктура	Размерность делокализации	Размерность локализации
Объемный полупроводник	3 (x, y, z)	0
Квантовая яма	2 (x, z)	1 (y)
Квантовая проволока	1 (z)	2 (x, y)
Квантовая точка	0	3 (x, y, z)

Зниження розмірності структур, облік і використання нових фізичних явищ одна із основних напрямів розвитку сучасної наноелектроніки. При цьому найважливіші характеристики приладів (наприклад, швидкодія) значно покращуються, рисунок 4.4.

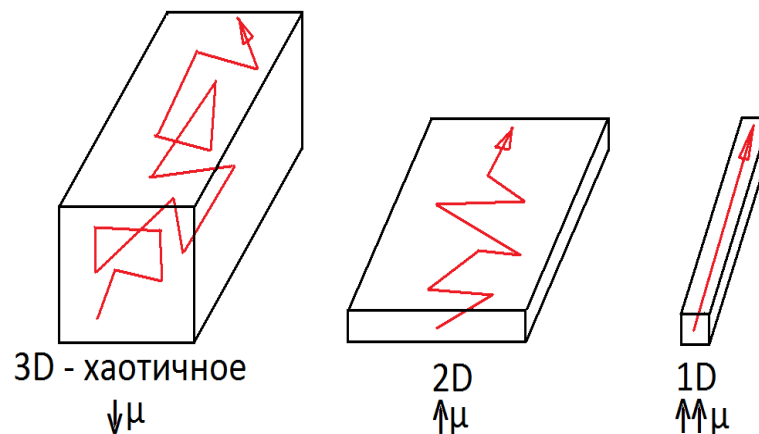


Рисунок 4.4 - Фізичний рух електронів у структурах

Фізично рух електронів у таких структурах еквівалентно їх руху потенційної ями, тобто. в обмеженій області, відокремленої від решти простору

потенційними бар'єрами. Найпростіший приклад потенційної ями – прямокутна криниця з дуже крутими стінками.

4.2 Електрони у прямокутній ямі

Для спрощення завдання можливо розглянути поведінку електрона потенційної ямі (рисунок 4.5) з нескінченними потенційними стінками. За умови $0 \leq x \leq L$, ймовірність виявити електрон за межами ями дорівнює 0, і відповідно хвильова функція поза ями теж дорівнює нулю. Така поведінка електрона має місце у тонких напівпровідникових та металевих плівках, оскільки робота виходу електронів з металу та напівпровідника порядку 4-5 еВ, а $kT = 0.0259$ еВ.

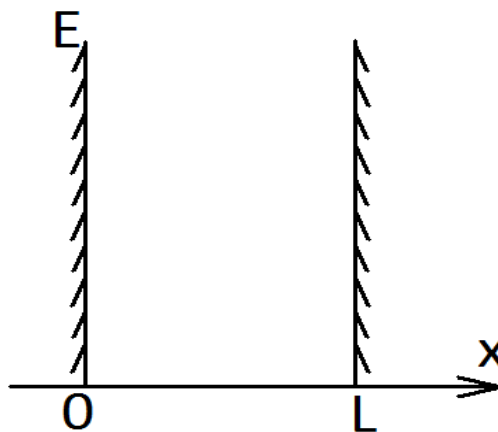


Рисунок 4.5 – Прямокутна яма

Виходячи з умови безперервності хвильової функції на межах ями впливає, що у точках $x=0$ і $x=L$ має бути

$$\Psi(0) = \Psi(L) = 0$$

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\Psi = 0$$

Де Ψ - хвильова функція, яку необхідно знайти для розв'язання цього завдання.

$$\frac{2m}{\hbar^2} E = k^2$$

$$\Psi(x) = A \sin(kx + \varphi_0),$$

з першої умови (умови безперервності хвильової функції):

$$(\Psi(0) = 0)$$

впливає, що

$$\varphi_0 = 0,$$

а із другого

$$(\Psi(L) = 0),$$

$\sin = 0$ при

$$kL = \pm m.$$

Тоді

$$k = \pm \frac{\pi}{L} n.$$

Відтак можна вважати доведеним, що хвильове число k (тобто імпульс електрона) у прямокутній квантовій ямі може набувати лише дискретних значень. І, отже, енергетичні рівні, які займають електрони в прямокутній квантовій ямі, також можуть набувати лише дискретних значень (рисунок 4.6).

Це впливає із закону дисперсії:

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} k^2,$$

тоді

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} n^2,$$

де n – головне квантове число.

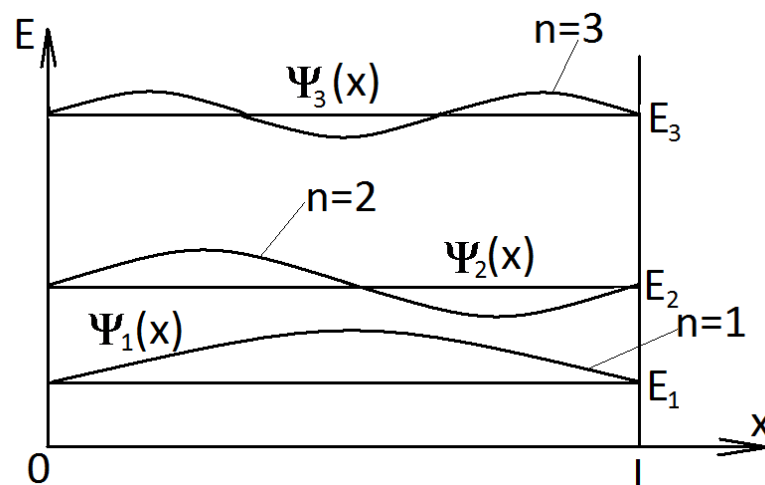


Рисунок 4.6 – Енергетичний спектр електрона і відповідні хвильові функції

Основні властивості енергетичного спектру електрона, що знаходиться у квантовій ямі:

- мінімальна енергія, яку електрон має в потенційній ямі, відмінна від нуля;
- зі зростанням n відстань між рівнями збільшується;
- чим менший розмір ями (тобто менше область локалізації електрона), тим більша відстань між рівнями. За нескінченно великої ширини квантової ями. Тобто $L \rightarrow \infty$ дискретний енергетичний спектр переходить у суцільний.

Хвильові функції

$$\Psi_n(x) = A \sin \frac{n\pi}{L} x,$$

щоб знайти A , скористаємося умовами нормування:

$$\int_0^L \Psi(x) \cdot \Psi^*(x) dx = 1,$$

тобто, знаходження інтегралу від квадрату модулю хвильової функції

$$\int_0^L \Psi^2(x) dx = 1,$$

$$A^2 \int_0^L \sin^2 \frac{n\pi}{L} x dx = 1.$$

Призводить до

$$A = \sqrt{\frac{2}{L}},$$

тоді

$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi}{L} x.$$

Це і є рівняння стоячих хвиль чи рівняння струни.

У тому випадку, якщо потенційна яма неодномірна та прямокутна (локалізація електронів двовимірна та потенційні прямокутні бар'єри з розмірами L і W), то результати можна узагальнити наступним чином.

Хвильова функція запишеться як суперпозиція хвильових функцій виду:

$$\Psi_{n,m}(x,y) = \frac{2}{\sqrt{LW}} \sin\left(\frac{\pi n}{L}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi m}{W}y\right),$$

а енергія будет квантуватися:

$$E_{n,m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} n^2 + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mW^2} m^2.$$

Якщо $L=5\text{нм}$, $m_e=10^{-27}\text{г}$, то $E_1=0.02\text{ эВ}$ для вільного електрона. Для електрона, що усередині напівпровідника $m_e=10^{-26}\text{г}$, $E_1=0.2\text{ эВ}$.

4.3 Тонка плівка, як двовимірна система

Приклад двовимірної системи у вигляді тонкої плівки показано на рисунку 4.7. Усі вище наведені формули для E_n відносяться лише до руху електронів упоперек потенційної ями. У площині, паралельній стінкам ями електрони продовжують рухатися як вільні, тобто. їхній енергетичний спектр безперервний.

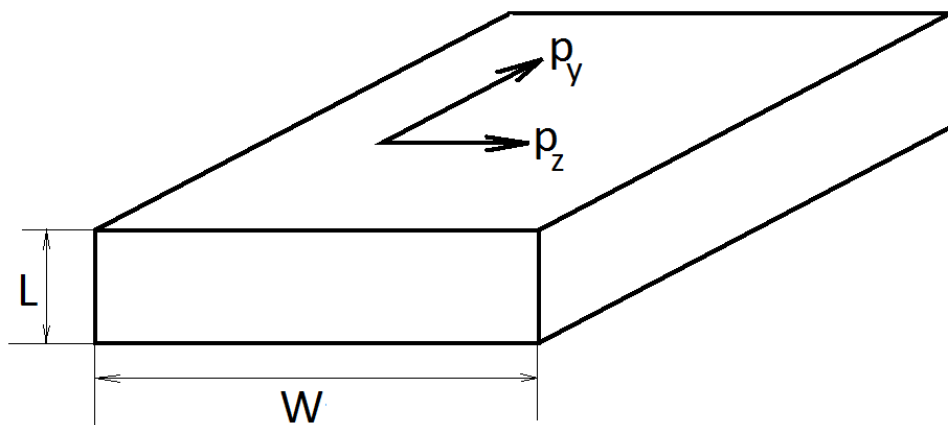


Рисунок 4.7 – Тонка плівка

Тоді повна енергія електрона складається з енергії дискретного рівня та енергії вільного електрона:

$$E = E_n + \frac{p_y^2 + p_z^2}{2m}.$$

Якщо концентрація електронів не надто висока, а температура низька, можна стверджувати, що

$$(E_2 - E_1) \gg kT .$$

Це означає, що більша частина електронів знаходиться на першому рівні, володіючи повною енергією, меншою, ніж рівень E_2 , а це, у свою чергу, означає, що в процесі взаємодії електронів з кристалічною решіткою може змінюватися тільки їхній імпульс у площині $y-z$ при незмінній енергії. Тому кванторозмірні структури, у яких заповнено лише один квантовий рівень, називаються структурами із двовимірним електронним газом.

4.4 Довільна квантова яма

Якщо потенційна яма має кінцеву глибину та непрямокутну форму, то енергія квантування не описуватиметься формулою.

Але висновок про наявність квантування, тобто, про наявність дискретного енергетичного спектра залишається чинним.

Залишається вірною та порядкова оцінка для енергій квантових рівнів, яку можна отримати у загальному випадку із Гейзенберзького співвідношення невизначеності.

Відповідно до співвідношення невизначеності Гейзенберга для енергії:

$$E_n \cdot \Delta t \approx \hbar ,$$

або

$$E_n \approx \frac{\hbar}{\Delta t} = \frac{\hbar^2}{\hbar \cdot \Delta t}$$

розмиття енергії на часовий інтервал, оскільки

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} ,$$

але і

$$k \sim \frac{1}{L} ,$$

а

$$v = \frac{L}{\Delta t},$$

тоді

$$\hbar \cdot \Delta t = \frac{\hbar k \cdot \Delta t}{k} = \frac{mv \cdot \Delta t}{k} = \frac{m \frac{L}{\Delta t} \cdot \Delta t}{\frac{1}{L}} = mL^2.$$

Так як

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{h}{p} \rightarrow p = \frac{kh}{2\pi} = k\hbar,$$

відповідно:

$$E_n \approx \frac{\hbar^2}{mL^2}$$

Можна вважати, що у довільній квантовій ямі виконується співвідношення, тобто. картинка, що з цієї формули має вигляд: якщо намалювати картинку, як одномірну, то за рахунок безперервної компоненти електрони, що належать одному і тому ж дискретному рівню, можуть володіти енергіями від E_n до ∞ .

Така сукупність енергетичних станів для фіксованого n називається підзоною розмірного квантування. Для квантових ям розмірність підзон завжди двовимірна.

Для того, щоб описане вище квантування енергетичного спектра в тонких плівках могло проявитися в будь-яких ефектах, що спостерігаються, необхідно, щоб відстань між енергетичними рівнями була досить велика. Тому на ці відстані потрібно накласти низку обмежень.

— обмеження теплової енергії;

$$(E_{n+1} - E_n) \gg kT.$$

Якщо ця умова не виконується, практично однакова заселеність сусідніх рівнів і часті переходи носіїв з-поміж них роблять кванторазмерные ефекти ненаблюдаемыми.

— обмеження за рівнем Фермі;

$$(E_{n+1} - E_n) \gg E_F .$$

Така умова важлива в системах з виродженням, тобто в яких рівень Фермі близько примикає до країв валентної зон і провідності.

$$E_F \gg kT .$$

При невиконанні цієї умови багато дискретних рівнів будуть заповнені. І хоч кванторозмірні ефекти будуть у принципі спостерігатися, але при цьому вони становитимуть дуже малу відносну величину.

— обмеження за часом релаксації;

У процесі свого руху в твердому тілі рухомі носії (електрони та дірки) відчувають різні розсіювання на домішках, фононах кристалічних ґрат (фонон – квант коливань кристалічних ґрат).

Часом релаксації називається час, який задається співвідношенням

$$\tau = \frac{m\mu}{q}$$

Згідно 2-го закону Ньютона сила - похідна від імпульсу. Фізично τ – середній час життя носіїв із заданим головним квантовим числом n та імпульсами p_x та p_z . Сила \times час = імпульс

$$qE \times \tau = mv .$$

Зі співвідношень Гейзенберга випливає, що кінцеве значення τ тягне за собою невизначеність в енергетичному стані, тоді очевидно, що для того, щоб спостерігати кванторозмірні ефекти, потрібно вимагати

$$(E_{n+1} - E_n) \gg \Delta E = \frac{\hbar}{\tau} = \frac{\hbar q}{m\mu}$$

Теоретично можна довести, що ця умова еквівалентна вимозі, щоб довжина вільного пробігу носіїв значно перевищувала товщину плівки.

З наведених трьох умов випливають важливі практичні висновки:

— для спостереження кванторозмірних ефектів необхідно забезпечити малі товщини шарів локалізації носіїв зарядів, які можна порівняти з довжиною хвилі де Бройля;

$$L \approx \lambda_D \approx \frac{\hbar}{\sqrt{3m^*kT}}$$

- досить низькі температури;
- дуже чисті матеріали з високою рухливістю носіїв.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для дослідження енергетичного спектру тонких плівок

	m^*	T	L_{100K}	L_{300K}
InSb	$0.0133m_0$	100K	120 нм	10 нм
Si	$0.92m_0$	100K	15 нм	

Якщо взяти лише два рівні перший і другий, то

$$E_2 - E_1 = \frac{3\hbar^2\pi^2}{2m^2L^2}$$

тоді

$$\mu \gg \frac{2qL^2}{3\hbar\pi^2}$$

Якщо $L=100$ нм, то $\mu_n \gg 10^4 \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано декілька наноприладів які працюють завдяки локалізації зарядів. Локалізація зарядів — ключовий процес у багатошарових наноструктурах: завдяки квантовій обмеженості та ефектам гетероструктур відбувається утримання зарядових носіїв у певних областях. Це дає змогу контролювати їхню поведінку, що є критично важливим для багатьох застосувань.

Багатошарові наноструктури розширюють функціональні можливості матеріалів: гетероструктури, квантові ями, квантові точки та суперґратки дозволяють створювати матеріали з наперед заданими оптичними, електричними та магнітними властивостями. Локалізація зарядів у цих системах дає змогу оптимізувати роботу пристроїв.

Важливість для сучасних технологій: Контрольовані локалізовані стани зарядів є основою для розвитку оптоелектроніки (світлодіоди, лазери), фотоніки, сонячних елементів і квантової електроніки. Локалізація дозволяє значно підвищити чутливість, швидкість і ефективність пристроїв.

Ефективність локалізації залежить від структурних параметрів: глибина квантових ям, товщина шарів, ширина забороненої зони та тип матеріалів безпосередньо впливають на ступінь локалізації зарядових носіїв.

Оптимізація цих параметрів є ключовим завданням для розробки наноструктур. Можливість створення нових квантових пристроїв: локалізовані заряди можуть використовуватися як базові елементи для квантових обчислень (кубіти), а також у квантовій криптографії.

Перспективи досліджень: Подальше вивчення механізмів локалізації та їхньої взаємодії з зовнішніми полями відкриває нові горизонти для створення інноваційних пристроїв. Особливий інтерес викликає дослідження взаємодії локалізованих станів з магнітними та електричними полями для контролю їхньої поведінки.

Дослідження локалізації зарядових пакетів у багатошарових наноструктурах має як фундаментальне, так і прикладне значення. Воно дозволяє розширити розуміння фізичних процесів на нанорівні та відкрити нові можливості для створення високотехнологічних пристроїв у різних галузях — від електроніки до квантової інженерії.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. No 50. – Режим доступу: <http://nure.ua>.
3. Прилади із зарядовим зв'язком [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://studfile.net/>.– 15.12.2024
4. Схема пристрою ПЗС [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://stud.com.ua>.– 10.12.2024
5. Фізичні основи роботи та конструкції приладів із зарядовим зв'язком [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://libeldoc.bsuir.by>.– 10.12.2024
6. Фотоефект [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org>.– 12.12.2023
7. Потенційна яма [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org>.– 15.15.2024
8. Мартинес-Цуарт Дж.М., Мартин-Палма Р. Дж., Агулло-Руеда Ф. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники. - М.: Техносфера, 2007. – 368 с.
9. Обухов И.А. Неравновесные эффекты в электронных приборах. - Севастополь: Вебер, 2010. - 303 с.
10. Локалізація зарядових пакетів в наноструктурах [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://dspace.uzhnu.edu.ua>.– 20.12.2024