

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет Магістерської підготовки

Кафедра Автоматизованих систем
моніторингу навколишнього середовища

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: Квантові реєстри – складові елементи інформаційно-вимірювальних
систем нового покоління

Виконала студентка 2 курсу групи МКМ- 19
спеціальності 122 Комп'ютерні науки
Чіяченко Ксенія Олександрівна

Керівник д.ф.-м.н., професор
Ковальчук Володимир Володимирович

Рецензент к. геогр. н, професор
Сербов Микола Георгійович


Одеса 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Магістерської підготовки
Кафедра Автоматизованих систем моніторингу навколишнього середовища
Рівень вищої освіти Магістр
Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Автоматизованих систем моніторингу навколишнього середовища

 Перелигін Борис Вікторович
"26" жовтня 2020 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Чіяченко Ксенії Олександрівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Квантові реєстри – складові елементи інформаційно-вимірювальних систем нового покоління»

керівник роботи Ковальчук Володимир Володимирович д.ф.-м.н., професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “16” жовтня 2020 року
№ 194 «С»

2. Строк подання студентом роботи 7 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи робота квантових реєстрів, їх переваги і недоліки, які слід врахувати при вирішенні інформаційно-технологічних задач.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1.Квантування в теорії інформація.

2. Обробка інформації з застосуванням квантового реєстру.

3.Структура квантового реєстру на основі досягнень сучасних нанотехнологій.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 26 жовтня 2020р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Одержання завдання на виконання магістерської кваліфікаційної роботи	26.10.2020	100	відмінно
2	Пошук та підбір літератури та інших джерел інформації	30.10.2020	100	відмінно
3	Вступ	02.11. 2020	100	відмінно
4	Квантування в теорії інформації	05.11.2020	100	відмінно
5	Обробка інформації з застосуванням квантового реєстру	13.11.2020	100	відмінно
6	Рубіжна атестація	19.11.2020	100	відмінно
7	Структура квантового комп'ютера та нанотехнологія, нанометрологія, стандартизація	20.11.2020	100	відмінно
9	Висновок	24.11.2020		
10	Здача готової магістерської кваліфікаційної роботи та документів секретарю ЕК	07.12.2020		
11	Рецензування	16.12.2020		
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		100	відмінно

Студент



(підпис)

Чіяченко К.О

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Ковальчук В.В

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна магістерська робота: 77 с., 17 рис., 65 джерел.

АЛГОРИТМ, КВАНТОВИЙ РЕГІСТР, КВАНТУВАННЯ, МІКРОСХЕМИ, НАНОМЕТРОЛОГІЯ, НАНОТЕХНОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ, ТРАНЗИСТОР.

Мета роботи – систематизація останніх розробок в галузі створення квантових комп'ютерів та їх складових елементів – квантових реєстрів.

Об'єкт роботи – процес квантової обробки даних.

Методи дослідження – аналіз і синтез інформації, системний підхід щодо визначення обмежень та погрішностей, що перешкоджають створенню складових квантового комп'ютера – квантових реєстрів, на основі схеми кодування квантових станів і корекції помилок в них.

У першому розділі представлено засоби та методи реалізації процедури квантування в теорії інформації.

У другому розділі описаний підхід щодо обробки інформації із використанням квантового реєстру.

У третьому розділі представлена і описана структура квантового реєстра, не лише як складова квантового комп'ютера, але і як нова і сучасна нанотехнологічна основа.

Результати проведеного аналізу дозволяють реалізувати, з одного боку, проведення більш глибокого осмислення фізичних основ, власне, квантової теорії речовини, її зв'язку з квантовою теорією інформації, з іншого – мотивувати зусилля, що спрямовані на реалізацію нового перспективного напрямку в обчислювальній техніці – створення комп'ютерів нового покоління та їх складових з використанням абсолютно нових квантових технологій, що виникають на перетині різних наук.

ANNOTATION

Qualifying master's thesis: 77 pp., 17 figs., 65 sources.

ALGORITHM, QUANTUM REGISTER, QUANTIFYING, MICRO-CYPES, NANOMETROLOGY, NANOTECHNOLOGY, STANDARDIZATION, TRANSISTOR.

The purpose of the work is to systematize the latest developments in the field of quantum computers and their constituent elements – quantum registers.

The object of work is the process of quantum data processing.

Research methods – analysis and synthesis of information, a systematic approach to identify constraints and errors that prevent the creation of components of a quantum computer – quantum registers, based on the scheme of coding quantum states and error correction in them.

The first section presents the means and methods of implementing the quantization procedure in information theory.

The second section describes the approach to information processing using a quantum register.

The third section presents and describes the structure of the quantum register, not only as a component of the quantum computer, but also as a new and modern nanotechnological basis.

The results of the analysis allow to implement, on the one hand, a deeper understanding of the physical foundations, in fact, the quantum theory of matter, its connection with the quantum theory of information, on the other – to motivate efforts to implement a new promising direction in computing – new generation computers and their components using completely new quantum technologies that emerge at the intersection of different sciences.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	7
Вступ.....	8
1 Квантування в теорії інформації.....	9
1.1 Історія інформаційної еволюції.....	9
1.2 Ідея квантових вимірювань.....	20
1.3 Чинники, які визначають ефективність квантових розрахунків.....	29
1.4 Структура квантового комп'ютера та квантові алгоритми.....	33
2 Обробка інформації з застосуванням квантового регістру.....	41
2.1 Технічні характеристики.....	41
2.2 Технічна реалізація квантових розрахунків.....	51
2.3 Використання квантових структур у електроніці.....	53
3 Структура квантового комп'ютера та нанотехнологія, нанометрологія, стандартизація	58
3.1 Структура квантового комп'ютера й регістра.....	59
3.2 Квантова корекція помилок у квантовому комп'ютері.....	61
3.3 Нанотехнології, нанометрологія, стандартизація.....	62
Висновки.....	71
Перелік джерел посилання.....	72

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- МОН – метал-окисел-напівпровідник
- ЕЛ – електронна лампа.
- ЕОМ – електронна обчислювальна машина.
- ІС – інтегральна схема.
- ІЛ – інтегрально-інжекційна логіка.
- РТЛ – резисторно-транзисторна логіка (застаріла, замінена на ТТЛ).
- ДТЛ – діод-транзисторна логіка (застаріла, замінена на ТТЛ).
- ТТЛ – транзисторно-транзисторна логіка – мікросхеми зроблені з біполярних транзисторів з багатоеміттерних транзисторів на вході.

ВСТУП

Актуальність. Сьогодні проведення наукових досліджень у напрямку квантовій теорії передачі інформації набуває надзвичайно актуального характеру. З одного боку, реалізація цього дослідження сприятиме більш глибокого осмислення фізичних основ, власне, квантової теорії речовини, її зв'язок з практичною діяльністю людини, зокрема, квантовою теорією інформації. З іншого боку, стимулювало зусилля щодо реалізації абсолютно нового напрямку в обчислювальній техніці – створення квантових комп'ютерів, абсолютно нових технологій (нанотехнологій). Серед важливих завдань останніх слід відзначити необхідність проведення моделювання багаточастинкових кван-ових систем, до яких можна віднести складні молекули, біологічні об'єкти, а також елементи сучасної наноелектроніки. Це можуть бути і такі квантові системи, де поряд з іншими квантовими властивостями істотну роль відіграє суперпозиція та заплутаність станів, особливості квантової динаміки. Отже, виходячи з цього потреба в квантових комп'ютерах очевидно існує вже сьогодні.

Задачі роботи: викласти математичні, фізичні основи квантових обчислень; проаналізувати принципи роботи квантових комп'ютерів; проаналізувати основні поняття квантової теорії інформації, на основі опису логічних операцій і квантових алгоритмів; обґрунтувати обмеження, які з'являються на шляху до повномасштабних квантових обчислень, і можливі шляхи їх подолання; детально розглянути варіанти реалізованих прототипів квантових комп'ютерів їх переваги, недоліки і проблеми реалізації.

Предмет дослідження – квантові регістри та сфера їх застосування. Об'єкт дослідження склав процес квантової обробки даних.

Практичне значення результатів дослідження – результати аналізу обмежень та погрішностей, які перешкоджають створенню складових квантового комп'ютера – квантових регістрів, на основі схеми кодування квантових станів і корекції помилок в них.

1 КВАНТУВАННЯ В ТЕОРІЇ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Історія інформаційної еволюції

Електровакуумна лампа або електронна лампа (ЕЛ) – електровакуумний прилад, який призначений для різноманітних перетворень електричних величин шляхом утворення потоку електронів та його керуванням.

Залежно від кількості електродів: діоди – двохелектродні лампи, тріоди – трьохелектродні лампи, тетроди – чотирьохелектродні лампи і т.д.

Дія ЕЛ базується на принципі термоелектронної емісії. У електровакуумній лампі емісія електронів відбувається у вакуумі з розжареної поверхні катода [1]¹⁾.

В 1883 році Т.Едісон, експериментуючи з лампою розжарювання, встановив в ній додатковий електрод – анод. Коли на розжарену нитку (катод) був поданий від'ємний потенціал, а на анод позитивний потенціал, через лампу пішов струм, який створювали електрони, які емітував гарячий катод, за який правила нитка розжарювання. Це був перший ламповий діод. Він пропускав струм лише в одному напрямі і широко використовувався для перетворення змінного струму в постійний. Для керування потоком електронів в балоні лампи між катодом і анодом почали поміщати металеві сітки, змінюючи електричний потенціал яких можна змінювати величину струму, який протікає через лампу.

Такі лампи широко використовувалися для підсилення і генерації електричних сигналів, а також перетворення частот сигналів. Вакуумні електронні лампи, які сьогодні можна побачити тільки в старих телевізорах і радіоприймачах, були в тому числі елементною базою комп'ютерів першого покоління. Головним недоліком електронних ламп було те, що пристрої на їх основі були досить громіздкими. Для живлення ламп необхідно було

¹⁾ [1] Гавриленко В., Новиков Ю., Озерин Ю., Раков А., Тодуа П. Российский прототип международного тест-объекта нанорельефа для РЭМ и АСМ.– Наноиндустрия, 2008, №6, с. 22–26.

підводити додаткову енергію для розжарювання катода (саме він є джерелом електронів, необхідних для утворення струму в лампі), а утворене ними тепло відводити. Наприклад, в перших комп'ютерах використовувалися тисячі ламп, які розміщувалися в металевих шафах і займали багато місця. Важила така машина десятки тонн.

Для забезпечення роботи такої ЕОМ була потрібна електростанція. Для охолодження машини використовували потужні вентилятори у зв'язку з виділенням лампами величезної кількості тепла.

Залежно від кількості електродів, що міститься в лампі, лампи отримали відповідну назву (два електроди – діод, три – тріод, чотири – тетрод, п'ять – пентод і т.ін.). Незважаючи на чимало недоліків, електронні лампи й досі не витіснені з ринку напівпровідниковими приладами, а продовжують існувати і використовуватись у радіотехнічних та радіоелектронних пристроях. Наприклад, магнетронні генератори. Магнетрони також використовуються в НВЧ пічках. Електронні лампи мають високу лінійність модуляційної кривої тому вони використовуються як підсилювальні елементи у сучасній аудіопрोगравальній техніці класу *high-end* в основному японського виробництва [2]¹⁾.

Також, лампові схеми продовжують використовуватися у підсилювачах для електрогітар. Це зумовлено намаганнями гітаристів отримувати від електрогітари вінтажний звук, як півсторіччя назад. Обробка звуку лампою відрізняється від транзисторної, вона викликає підсилення парних гармонік і, звідси, високо поціновуваний професіоналами «ламповий звук».

Транзистор – напівпровідниковий елемент електронної техніки, який дозволяє керувати струмом, який протікає через нього, за допомогою прикладеної до додаткового електрода напруги.

¹⁾ [2] Годуа П.А., Быков В.А., Волк Ч.П., Горнев Е.С., Желкобаев Ж., Зыкин Л.М., Ишанов А.Б., Календин В.В., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Прохоров А.М., Раков А.В., Саунин С.А., Черняков В.Н. Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию.–Микросистемная техника, 2004, №1,с.38–44; №2, с.24-39; №3, с.25-32.

Транзистори є основними елементами сучасної електроніки. Зазвичай вони застосовуються в підсилювачах і логічних електронних схемах. У мікросхемах в єдиний функціональний блок об'єднані тисячі й мільйони окремих транзисторів.

За будовою та принципом дії транзистори поділяють на два великі класи: біполярні транзистори й польові транзистори. До кожного з цих класів входять численні типи транзисторів, що відрізняються за будовою і характеристиками [3]¹⁾.

В біполярному транзисторі носії заряду рухаються від емітера через тонку базу до колектора. База відділена від емітера й колектора р-n переходами. Струм протікає через транзистор лише тоді, коли носії заряду інжектуються з емітера в базу через р-n перехід. В базі вони є неосновними носіями заряду й легко проникають через інший р-n перехід між базою й колектором, прискорюючись при цьому. В самій базі носії заряду рухаються за рахунок дифузійного механізму, тож база повинна бути досить тонкою. Управління струмом між емітером і колектором здійснюється зміною напруги між базою і емітером, від якої залежать умови інжекції носіїв заряду в базу.

В польовому транзисторі струм протікає від витоку до стоку через канал під затвором. Прикладена до затвору напруга збільшує або зменшує ширину області збіднення, а тим самим ширину каналу, контролюючи струм.

Перший патент на польовий транзистор отримав у 1925 році в Канаді уродженець Львова Юліус Едгар Лілієнфельд, однак він не опублікував жодних досліджень, пов'язаних з своїм винаходом. У 1934 році німецький фізик Оскар Гайль запатентував ще один польовий транзистор. У 1947 році Джон Бардін та Волтер Браттейн із AT&T Bell Labs відкрили ефект підсилення в кристалі германію. Вільям Шоклі побичив у цьому явищі знач-

¹⁾ [3] Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. Metrology in linear measurements of nanoobject elements. – Proceedings of SPIE, 2006, vol.6260, p.626013-1–626013-8.

ний потенціал. Завдяки своїй роботі над новим явищем він може вважатися батьком транзистора. Термін «транзистор» запропонував Джон Пірс.

У 1956 році Бардін, Шоклі і Браттейн отримали за винахід транзистора Нобелівську премію. У 50-х та 60-х роках 20 ст. транзистори швидко витіснили вакуумні лампи майже з усіх областей застосування, завдяки своїй компактності, технологічності, довговічності та можливості інтегрування у великі й надвеликі електронні схеми.

Окрім поділу на біполярні та польові транзистори, існує багато різних типів, специфічних за своєю будовою.

Біполярні транзистори розрізняються за полярністю: вони бувають Р-Н-Р та Н-Р-Н типу. Середня літера в цих позначеннях відповідає типу провідності матеріалу бази [4]¹⁾.

Польові транзистори розрізняються за типом провідності в каналі: на Р-канальні (основний тип провідності – дірковий) та Н-канальні – основний тип провідності електронний. Серед польових транзисторів найбільш поширені транзистори типу метал-оксид-напівпровідник, які можуть використовувати або область збагачення або область збіднення.

Транзистори розрізняються також за матеріалом, за максимальною потужністю, максимальною частотою, за призначенням, за типом корпусу.

Найпоширеніший напівпровідниковий матеріал для виробництва транзисторів – кремній. Використовуються також германій, арсенід галію та інші бінарні напівпровідники.

Сімейство вольтамперних характеристик для МОН-транзистора. Кожна крива показує залежність струму між витоком і стоком, в залежності від напруги між цими двома електродами, для різних значень напруги між витоком і затвором.

Оскільки транзистор має три електроди, тоді для кожного із струмів через два електроди транзистора, існує сімейство вольтамперних харак-

¹⁾ [4] Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Ozerin Yu.V., Rakov A.V., Todua P.A. Silicon tect object of linewidth of nanometer range for SEM and AFM. – Proceedings of SPIE, 2007, vol. 6648, p. 66480R-1–66480R-11.

теристик при різних значеннях напруги на третьому електроді, або струму, який протікає через нього.

У багатьох застосуваннях важливі частотні характеристики транзисторів – швидкість перемикання між різними станами. Транзистор має два основні застосування: у якості підсилювачі у якості перемикача.

Підсилювальні властивості транзистора зв'язані з його здатністю контролювати великий струм між двома електродами за допомогою малого струму між двома іншими електродами. Таким чином малі зміни величини сигналу в одному електричному колі можуть відтворюватися з більшою амплітудою в іншому колі.

Використання транзистора у якості перемикача пов'язане з тим, що приклавши відповідну напругу до одного з його виводів, можна зменшити практично до нуля струм між двома іншими виводами, які називають запиранням транзистора. Цю властивість використовують для побудови логічних вентилів [5]¹⁾.

Корпуси транзисторів виготовляються з металу, кераміки або пластику. Для транзисторів великої потужності необхідно додаткове охолодження.

Транзистори монтуються на друкованих платах за технологією "через отвір", або за технологією поверхневого монтажу. При технології "через отвір", виводи транзисторів вставляються в попередньо просверлені в платі отвори. Корпуси транзисторів стандартизовані, але послідовність виводів ні, вона залежить від виробника.

Інтегральна (мікро)схема (ІС, ІМС, м/сх, англ. integrated circuit, ІС, microcircuit), чип, мікрочіп (англ. microchip, siliconchip, chip – крапка, пластинка – спочатку термін ставився до пластинки кристала мікросхеми) – мікроелектроний пристрій – електронна схема довільної складності, виготовлена на напівпровідниковому кристалі (або плівці) і поміщена в нерозбірний корпус.

¹⁾ [5] Todua P.A., Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V. Check of the quality of fabrication of test objects with a trapezoidal profile. – Proceedings of SPIE, 2008, vol.7042, p. 704209-1–704209-8.

Часто під інтегральною схемою (ІС) розуміють властиво кристал або плівку з електронною схемою, а під мікросхемою (МС) – ІС, укладену в корпус. У той ж година вираження "чип-компонента" означає "компоненти для поверхневого монтажу", на відміну від компонентів для традиційної пайки у відчини на платі. Тому вірно сказати «чип-мікросхема», маючи на увазі мікросхему для поверхневого монтажу. На 2009 год більша частина мікросхем виготовляється в корпусах для поверхневого монтажу [6]¹⁾.

Винахід мікросхем почалося з вивчення властивостей тонких оксидних плівок, які проявляються в ефекті поганої електропровідності при невеликих електричних напругах. Проблема полягала в тому, що в місці зіткнення двох металів не відбувалося електричного контакту або він мав полярні властивості. Глибокі вивчення цього феномена привели до винаходу діодів, а пізніше транзисторів і інтегральних мікросхем.

В 1958 році двоє вчених, які живуть у зовсім різних місцях, винайшли практично ідентичну модель інтегральної схеми. Один з них, Джек Кілбі, працював на Texas Instruments, іншої, Роберт Нойс, був одним з засновників невеликої компанії по виробництву напівпровідників Fairchild Semiconductor. Транзистори, резистори, конденсатори та інші деталі в той час розміщалися на платах окремо, і вчені вирішили спробувати їх об'єднати на одному монолітному кристалі з напівпровідникового матеріалу. Лише Кілбі скористався германієм, а Нойс віддав перевагу кремнію. В 1959 році вони окремо один від одного отримали патенти на свої винаходи – почалося протистояння двох компаній, яке закінчилося мирним договором і створенням спільної ліцензії на виробництво чипів. Після того як в 1961 році Fairchild Semiconductor Corporation пустила інтегральні схеми у вільний продаж, їх відразу стали використовувати у виробництві калькуляторів і комп'ютерів замість окремих транзисторів, що дозволило значно зменшити розмір і збільшити продуктивність.

¹⁾ [6] Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А. Тест-объект с тремя аттестованными размерами ширины линии для растровой электронной микроскопии. – Измерительная техника, 2008, № 9, с. 49–51.

Перша радянська напівпровідникова мікросхема була створена в 1961 році в Таганрогському радіотехнічному інституті, у лабораторії Л. Н. Колесова.

Перша в СРСР напівпровідникова інтегральна мікросхема була розроблена (створена) на основі планарної технології, розробленої на початку 1960 року в НДІ-35 (потім перейменованій у НИИ "Пульсар") колективом, який надалі був переведений у НИИМЭ (Мікрон). Створення першої вітчизняної кремнієвої інтегральної схеми було сконцентровано на розробці та виробництві з військовим прийманням серії інтегральних кремнієвих схем ТС-100 (37 елементів – еквівалент схемотехнічної складності тригера, аналога американських ІС серії SN-51 фірми Texas Instruments). Зразки прототипи та виробничі зразки кремнієвих інтегральних схем для відтворення були отримані з США. Роботи проводилися в НДІ-35 (директор Трутко) і Фрязинським заводом (директор Колмогоров) по оборонному замовленню для використання в автономному висотомірі системи наведення балістичної ракети. Розробка включала шість типових інтегральних кремнієвих планарних схем серії ТС-100 з організацією досвідченого виробництва зайняла в НДІ-35 три роки (з 1962 по 1965 рік). Ще два роки пішло на освоєння заводського виробництва з військовим прийманням у Фрязино (1967 рік).

Рівні проектування:

- фізичний – методи реалізації одного транзистора (або невеликої групи) у вигляді легованих зон на кристалі;
- електричний – принципова електрична схема (транзистори, конденсатори, резистори і т.п.);
- логічний – логічна схема (логічні інвертори, елементи АБО--НЕ, І-НЕ і т.п.);
- схемо- і системотехнічний рівень – схемо- і системотехнічна схеми (тригери, компаратори, шифратори, дешифратори, АЛУ і т.п.);
- топологічний – топологічні фотошаблони для виробництва;
- програмний рівень (для мікроконтролерів і мікропроцесорів) – команди асемблера для программіста.

В цей час більша частина інтегральних схем розробляється за допомогою САПР, які дозволяють автоматизувати та значно прискорити процес одержання топологічних фотошаблонів [7]¹⁾.

У СРСР були запропоновані наступні назви мікросхем залежно від ступеня інтеграції (зазначена кількість елементів для цифрових схем):

- мала інтегральна схема (МІС) – до 100 елементів у кристалі;
- середня інтегральна схема (СІС) – до 1000 елементів у кристалі;
- велика інтегральна схема (ВІС) – до 10000 елементів у кристалі;
- надвелика інтегральна схема (НВІС) – до 1 мільйона елементів у кристалі;
- ультравелика інтегральна схема (УВІС) – до 1 мільярда елементів у кристалі;
- дужевелика інтегральна схема (ДВІС) – більше 1 мільярда елементів у кристалі.

У цей час назва ДВІС практично не використовується (наприклад, останні версії процесорів Pentium 4 містять поки кілька сотень мільйонів транзисторів), і всі схеми з числом елементів, які перевищують 10 000, відносять до класу НВІС, вважаючи УВІС його підкласом аналогові, цифрові, аналого-цифрові [8]²⁾.

Основним елементом аналогових мікросхем є транзистори (біполярні або польові). Різниця в технології виготовлення транзисторів істотно впливає на характеристики мікросхем. Тому нерідко в описі мікросхеми вказують технологію виготовлення, щоб підкреслити тим самим загальну характеристику властивостей і можливостей мікросхеми. У сучасних технологіях поєднують технології біполярних і польових транзисторів, щоб домогтися поліпшення характеристик мікросхем.

¹⁾ [7] Gavrilenko V.P., Filippov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. Measurements of linear sizes of relief elements in the nanometer range using a scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2007, vol.6648, p. 66480T-1–66480T-12.

²⁾ [8] Novikov Yu.A., Darznez S.A., Filippov M.N., Mityukhlyayev V.B., Rakov A.V., Todua P.A. Nanorelief elements in reference measures for scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7025, p. 702511-1–702511-10.

Мікросхеми на уніполярних (польових) транзисторах – самі економічні (по споживанню струму):

- Мон-МОН-логіка (метал-окисел-напівпровідник логіка) – мікросхеми формуються з польових транзисторів n-мон або р-МОН типу;
- Кмон-КМОН-логіка (комплементарна Мон-Логіка) – кожний логічний елемент мікросхеми складається з пари взаємодоповнюючих (комплементарних) польових транзисторів (n-мон і р-МОН).

Мікросхеми на біполярних транзисторах:

- РТЛ – резисторно-транзисторна логіка (застаріла, замінена на ТТЛ);
- ДТЛ – діод-транзисторна логіка (застаріла, замінена на ТТЛ);
- ТТЛ – транзисторно-транзисторна логіка – мікросхеми зроблені з біполярних транзисторів з багатоеміттерних транзисторів на вході;
- ТТЛШ – транзисторно-транзисторна логіка з діодами Шоттки – удосконалена ТТЛ, в якій використовуються біполярні транзистори з ефектом Шоттки;
- ЕЗЛ – еміттерно-зв'язана логіка – на біполярних транзисторах, режим роботи яких підібраний так, щоб вони не входили в режим насичення, – що істотно підвищує швидкодію;
- ІЛ – інтегрально-інжекційная логіка.

КМОН і ТТЛ (ТТЛШ) технології є найпоширенішими логіками мікросхем. Де необхідно заощаджувати споживання струму, застосовують Кмон-Технологію, де важливіше швидкість і не потрібна економія споживаної потужності застосовують ТТЛ-Технологію [9]¹⁾. Слабким місцем КМОП-Мікросхем є вразливість від статичного струму – досить торкнутися рукою виводу мікросхеми і її цілісність уже не гарантується. З розвитком технологій ТТЛ і КМОН мікросхеми по параметрах зближаються і, як наслідок, наприклад, серія мікросхем 1564 – зроблена за технологією КМОН, а функціональність і розміщення в корпусі як у ТТЛ технології.

¹⁾ [9] Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. Measurements of the parameters of the electron beam of a scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2008, vol.7042, p.70420C-1–70420C-12.

Мікросхеми, виготовлені по ЕЗЛ-Технології, є найшвидшими, але й найбільш енергоспоживаючими, і застосовувалися при виробництві обчислювальної техніки в тих випадках, коли найважливішим параметром була швидкість обчислення. У ССРСР самі продуктивні ЕОМ типу ЕЗ106х виготовлялися на Езл-Мікросхемах. Зараз ця технологія використовується рідко [10]¹⁾.

Закон Мура. При виготовленні мікросхем використовується метод фотолітографії (проекційної, контактної й ін.), при цьому схему формують на підложці (звичайно з кремнію), отриманої шляхом різання алмазними дисками монокристалів кремнію на тонкі пластини. Через маленький лінійний розмірів елементів мікросхем, від використання видимого світла, і навіть ближнього ультрафіолета, при засвітці давно відмовилися [11]²⁾.

Як характеристика технологічного процесу виробництва мікросхем вказують мінімальні контрольовані розміри топології фотоповторювача (контактні вікна в оксиді кремнію, ширина затворів у транзисторах і т.д.) і, як наслідок, розміри транзисторів (і інших елементів) на кристалі. Цей параметр, однак, перебуває у взаємозалежності з поруч інших виробничих можливостей: чистотою одержуваного кремнію, характеристиками інжекторів, методами фотолітографії, методами втравлювання й напилювання [12]³⁾.

В 1970-1970-х роках мінімальний контрольований розмір становив від 2 мкм до 8 мкм, в 1980-х був зменшений до 0, від 5 мкм до 2 мкм. Деякі експериментальні зразки фотолітографічного встаткування рентгенівського діапазону забезпечували мінімальний розмір 0,18 мкм.

¹⁾ [10] Волк Ч.П., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Калибровка растрового электронного микроскопа по двум координатам с использованием одного аттестованного размера. – Измерительная техника, 2008, № 6, с. 18–20.

²⁾ [11] Todua P.A., Filippov M.N., Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V. Measurement of linear sizes of relief elements in the nanometer range using an atomic force microscopy. – Proceedings of SPIE, 2007, vol. 6648, p. 66480S-1–66480S-12.

³⁾ [12] Novikov Yu.A., Filippov M.N., Lysov I.D., Rakov A.V., Sharonov V.A., Todua P.A. Direct measurement of the linewidth of relief elements of AFM in nanometer range. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7025, p. 702510-1–702510-10.

В 1990 роках, через новий виток "війни платформ", експериментальні методи стали впроваджуватися у виробництво й швидко вдосконалюватися. На початку 1990-х процесори (наприклад, ранні Pentium і Pentium Pro) виготовляли за технологією від 0,5 мкм до 0,6 мкм (від 500 нм до 600 нм). Потім їхній рівень піднявся від 250 нм до 350 нм. Наступні процесори (Pentium 2, K6-2+, Athlon) вже робили за технологією 180 нм.

Наприкінці 1990-х фірма Texas Instruments створила нову ультрафіолетову технологію з мінімальним контролюючим розміром близько 80 нм. Але досягти її в масовому виробництві не вдалося аж до недавнього часу. За станом на 2009 рік технології вдалося забезпечити рівень виробництва аж до 90 нм [13]¹⁾.

Нові процесори (спершу це був Core 2 Duo) роблять за новою Уф-Технології 45 нм. Є й інші мікросхеми, які давно досягли й перевищили даний рівень (зокрема, відеопроцесори і флеш-пам'ять 10 нм). Проте подальший розвиток технології викликає усе більше труднощів. Обіцянки фірми Intel по переходу на рівень 30 нм вже до 2006 року так і не збулися.

За станом на 2009 рік альянс провідних розроблювачів і виробників мікросхем працює над технічним процесом 32 нм. Інтегральна мікросхема може володіти закінченим, як завгодно складним, функціоналом – аж до цілого мікрокомп'ютера (однокристальний мікрокомп'ютер).

Цифрові інтегральні мікросхеми мають ряд переваг у порівнянні з аналоговими.

Зменшене енергоспоживання пов'язане з застосуванням у цифровій електроніці імпульсних електричних сигналів. При одержанні й перетворенні таких сигналів активні елементи електронних пристроїв (транзисторів) працюють в "ключовому" режимі, тобто транзистор або "відкритий" – яке відповідає сигналу високого рівня (1), або "закритий" – (0), у першому випадку на транзисторі немає падіння напруги, у другому – через нього не

¹⁾ [13] Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Геометрия формирования изображения в сканирующей зондовой микроскопии. – Микроэлектроника, 2008, т. 37, №6, с. 448–469.

йде струм. В обох випадках енергоспоживання близько до 0, на відміну від аналогових пристроїв, у яких більшу частину часу транзистори перебувають у проміжному (резистивном) стані.

Висока завадостійкість цифрових пристроїв пов'язана з більшою відмінністю сигналів високого (наприклад, від 2,5 В до 5 В) і низького (від 0 В до 0,5 В) рівня. Помилка можлива при таких перешкодах, коли високий рівень сприймається як низький і навпаки, що мало ймовірно. Крім того, у цифрових пристроях можливе застосування спеціальних кодів, які дозволяють виправляти помилки.

Велика відмінність сигналів високого й низького рівня і досить широкий інтервал їхніх припустимих змін робить цифрову техніку нечутливою до неминучого в інтегральній технології розкиду параметрів елементів, рятує від необхідності підбора і налаштування цифрових пристроїв [14]¹⁾.

Як аналогові, так і цифрові первинні елементи. У російських корпусах відстань між выводами вимірюється в мілі-метрах і найбільш часто це 2,5 мм або 1,25 мм. В імпортованих мікросхемах відстань вимірюють у дюймах, використовуючи величину 1/10 дюйма або 1/20 дюйма, яка відповідає 2,54 мм і 1,28 мм. У корпусах до 16 выводів ця різниця не значна, а при більших розмірах (20 і більше выводів) ідентичні корпуси вже несумісні.

У сучасних імпортованих корпусах для поверхневого монтажу застосовують і метричні розміри: 0,8 мм; 0,65 мм і інші.

1.2 Ідея квантових вимірювань

Сьогодні робота над квантовим комп'ютером ведуться відразу в декількох найбільших корпораціях, які займаються виготовленням "заліза" і програмного забезпечення. Це IBM, AT&T, Microsoft, Intel, а також величезна кількість учених і цілих НДІ, як за рубежем, так і на просторах нашої

¹⁾ [14] Раков А.В., Тодуа П.А. Измерение линейности сканирования в атомно-силовом микроскопе. – Измерительная техника, 2008, № 6, с. 12–14.

неосяжної батьківщини. І якщо до створення повноцінної обчислювальної машини ще далеко, самі принципи квантової механіки вже давно успішно застосовуються та працюють у сучасній електроніці. Роботи ведуться, регулярно проходять семінари, пачками випускаються наукові публікації, ставляться експерименти і навіть створюються перші зразки обчислювальних пристроїв – прообрази майбутнього квантового комп'ютера. Це не дивно – дуже вже привабливі перспективи відкриваються перед дослідниками [15]¹⁾.

Класичний біт може приймати лише два стани – 0 або 1. Третього не дано. А от кубіт може бути наполовину 1 і наполовину 0. Він може бути з ймовірністю в 34% – нуль, і 66% – одиниця. Але сама цікаве – це так звана суперпозиція, коли стан кубіту виражається комбінацією всіх можливих значень. Тобто 8 класичних біт у конкретний момент часу можуть перебувати лише в одному стані, наприклад 10010110. А от для 8 кубіт базисним станом будуть всі 256 можливих варіацій, від 00000000 до 11111111. Причому одночасно. Таким чином, одна операція над групою кубітів торкається всіх значень, які ця група може приймати. Якщо зрівняти швидкість розкладання на прості множники числа, яка складається з 155 знаків, тоді сучасний класичний комп'ютер, як вже було описано вище, упорається за 35 років. Квантовий комп'ютер, зібраний на основі всього лише 512 кубіт, витратить на це всього кілька секунд [16]²⁾.

Така швидкодія досягається за рахунок так званого "квантового паралелізму". Суть цього явища в наступному. Припустимо, що існує класичний регістр, який складається з N біт. При цьому вплив на регістр (тобто обчислювальна операція) навіть в ідеалі здатно змінити його не більш ніж N змінних. На практиці кількість одночасно змінюваних біт упирається в мож-

¹⁾ [15] Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Прямое измерение ширины линии на атомно-силовом микроскопе. –Измерительная техника, 2008, № 5, с. 10–12.

²⁾ [16] Гавриленко В.П., Лесновский Е.Н., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А., Филиппов М.Н. Первые российские стандарты в нанотехнологиях. – Известия РАН, сер.физич., 2009, т. 73, №4, с. 454–462.

ливості процесора. Квантовий же комп'ютер, який складається з N кубіт, здатний виконувати 2^N операцій, причому одночасно.

Звичайно, створення обчислювальної машини на основі 512 кубіт – це справа майбутнього, причому невиразно далекого. Може, це трапиться через півроку, а може – через 50 років, поки сказати складно. Найбільший існуючий комп'ютер нараховує 7 кубіт. Також є відомості про створення канадською фірмою D-Wave 16-кубітній машини Orion у лютому 2007 року. Однак існування цього комп'ютера вже не раз піддавалося сумнівам внаслідок загальної розмитості інформації, наданої наукової громадськості. Втім, це не головне. Основна причина недовіри – фантастичність заявлених компанією результатів. Представники D-Wave затверджують, що в створену ними обчислювальну машину закладена можливість легкого збільшення кількості кубіт. Таким чином, компанія планує в другому кварталі 2008 року "проапгрейдити" Orion до тих самих 512 кубіт, а під кінець року – і до 1024.

Це може здатися протиприродним, тому що наш життєвий досвід заснований на явищах керованих класичною, а не квантовою фізикою, яка працює на атомарному рівні. Цю досить важку для розуміння концепцію, можливо, краще пояснити через експеримент. Властивості кубіту ілюструє рис. 1.1.

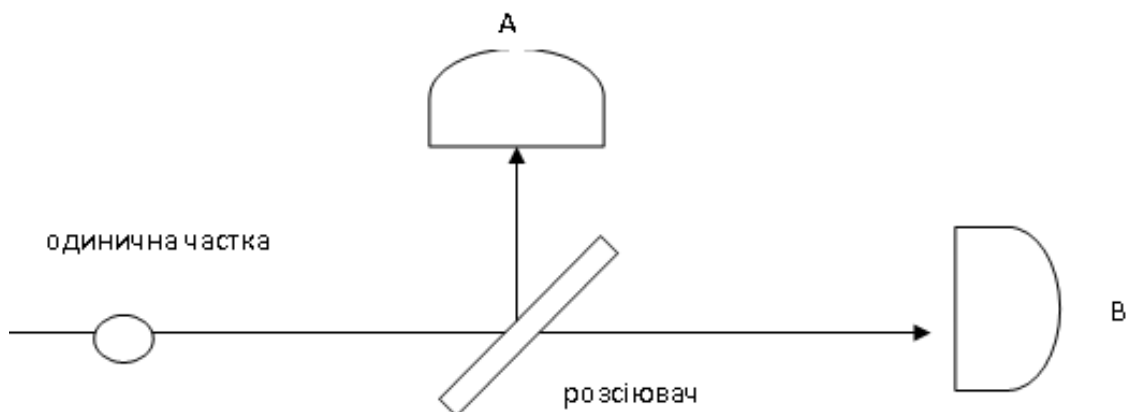


Рисунок 1.1 – До ілюстрації властивостей кубіта: А,В - детектори

Тут джерело світла випромінює фотон у напрямку до напівпрозорого дзеркала. Це дзеркало розщеплює світло, відображаючи половину світивши вертикально у напрямку до детектора А і передаючи другу половину у напрямку до детектора В. Проте фотон – це неділима частка світла і не може бути розщеплений, тому він виявляє себе з рівною ймовірністю в детекторі А або детекторі В. Інтуїція підказує нам, що фотон покидає дзеркало у випадково вибраному напрямі вертикальному або горизонтальному. Проте, квантова механіка передбачає, що фотон, насправді, розповсюджується по обох напрямках одночасно. Це ясніше демонструє рис. 1.2.

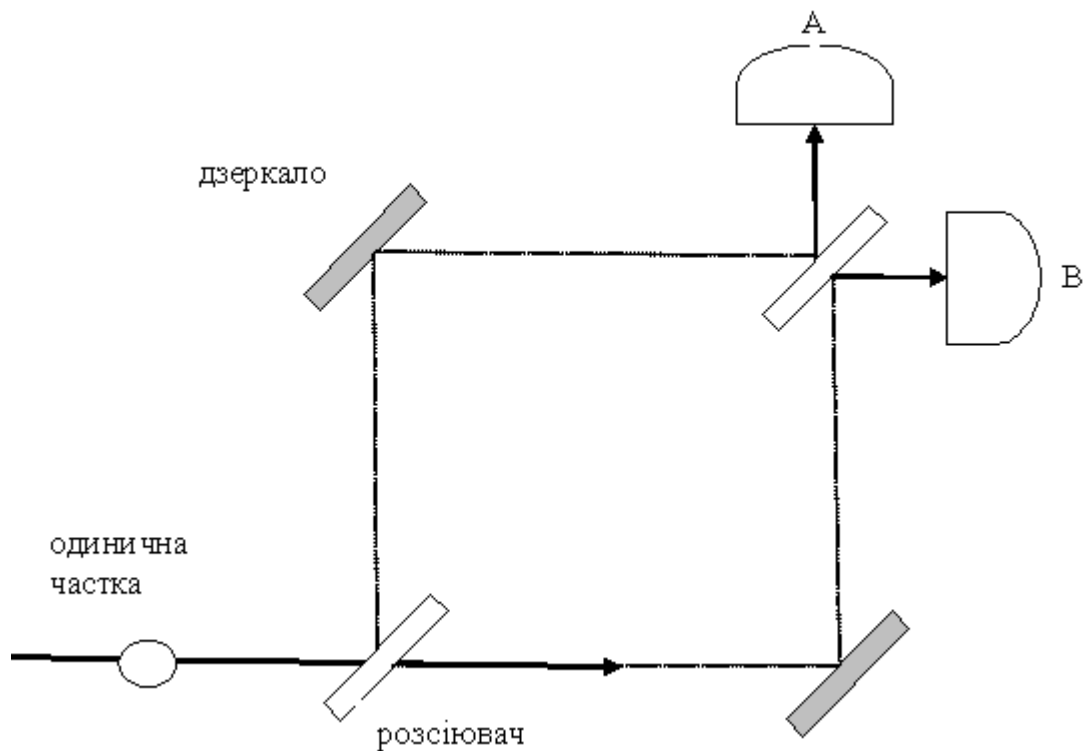


Рисунок 1.2 – Явище одно - частинної інтерференції: А,В - детектори

В такому експерименті, як на рис. 1.1, де фотон відбивається від напівпрозорого дзеркала, можна було б аргументувати, що фотон не розщеплюється на два промені, оскільки лише один детектор зареєструє сигнал, тоді як в другому детекторі сигналу не буде. Маючи в своєму розпорядженні інформацію лише про такий експеримент, можна було б вважати, що будь-

який конкретний фотон після дзеркала рухається або вертикально або горизонтально, роблячи випадковий вибір між двома можливостями. Проте, квантова механіка передбачає, що фотон насправді поширюється відразу по обох дорогах, де колапс на якійсь одній дорозі лише в результаті вимірювання. Цей ефект, відомий, як одночасткова інтерференція може бути краще проілюстрований в декілька складнішому експерименті [17]¹⁾.

В цьому експерименті, фотон спочатку стикається з напівпрозорим дзеркалом, потім з дзеркалом, яке повністю відображає, і в кінці ще з одним напівпрозорим дзеркалом перед тим, як потрапити в детектор. Кожне напівпрозоре дзеркало вводить можливість для фотона піти в одному з двох напрямів. Після зіткнення з першою розподільчою пластиною (напівпрозоре дзеркало) фотон прямує дзеркалом, яке повністю відображає, на другу діляльну пластину, і все виглядає також як на рис. 1.1. Тому можна було б передбачити, що фотон досягне або детектора А, або детектора В з рівною ймовірністю. Проте, експеримент говорить, що насправді в такій установці детектор А реєструє фотон в 100% випадків, тоді як в детектор (рис. 1.2) виражає цікавий експеримент, який демонструє явище одночастинної інтерференції [18]²⁾. В такій установці, експеримент говорить, що фотон завжди досягає детектор А, і ніколи детектор В.

Якщо одиничний фотон переміщається вертикально і потрапляє на дзеркало, тоді, по аналогії з експериментом на (рис. 1.1), повинна була б бути рівна ймовірність, якщо фотон попаде в детектор А або в детектор В. Те ж саме можна сказати про фотон, який продовжить горизонтальне поширення після діляльної пластини. Проте, дійсний результат дуже відрізняється від наших очікувань. Таким чином, єдиний розумний висновок повинен полягати в тому, що фотон якимсь чином поширюється по обох напрямках відразу. При цьому фотон інтерферує сам з собою в точці сходження двох

¹⁾ [17] Ландау Д., Лифшиц И. Статистическая физика. Часть 1. Наука, М 1976. 235с.

²⁾ [18] Леонтович М.А.. Введение в термодинамику. Статистическая физика. Москва, Наука, 1983. 416с.

альтернативних доріг на другому напівпрозорому дзеркалі так, якщо можливість попасти в детектор В руйнується. Це явище, відоме під назвою квантової інтерференції, відбувається через суперпозиції можливих станів фотона, тобто, можливих альтернативних доріг. Оскільки насправді випущений єдиний фотон, все проходить так, ніби існує фотон-дублікат, який поширюється по іншому напрямку. Фотон-дублікат дає про себе знати лише в результаті інтерференції з вихідним фотоном в точці, де альтернативні напрями знову сходяться. Якщо ж заблокувати один з напрямів поглинаючим екраном, тоді детектор В знову починає реєструвати попадання фотона, як в першому експерименті [19]¹.

Ця унікальна особливість квантових об'єктів, серед інших, робить поточні дослідження по квантових обчисленнях не просто продовженням сучасної ідеї комп'ютера, але, швидше, абсолютно новим чином мислення. Саме завдяки цим особливостям квантових об'єктів квантові комп'ютери потенційно повинні стати неймовірно потужними обчислювальними пристроями [20]². Ідея квантових обчислень полягає в тому, що квантова система з L дворівневих квантових елементів (кубітів які на рис. 1.3).

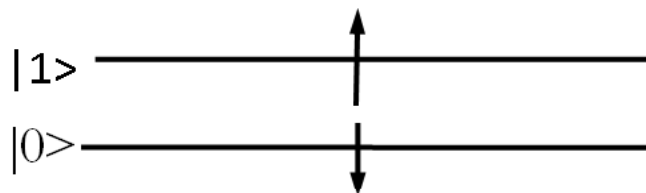


Рисунок 1.3 – Квантовий біт

Має 2^L лінійно незалежних станів, а значить, унаслідок принципу квантової суперпозиції, 2^L -мірне Гільбертовий простір станів. Операція в квантових обчисленнях відповідає повороту в цьому просторі. Таким чином,

¹ [19] Кадомцев Б.Б.. Динамика и информация. УФН, 164, №5, 449 (1994). 190 с.

² [20]Холево А.С. Введение в квантовую теорию информации. Москва, 2002. МЦНМО, 2002. 228 с.

квантовий обчислювальний пристрій розміром L кубіт може виконувати паралельно 2^L операцій.

Передбачимо, що є один кубіт. У такому разі після вимірювання, в так званій класичній формі, результат буде 0 або 1. Насправді кубіт - квантовий об'єкт і тому, внаслідок принципу невизначеності, може бути і 0, і 1 з певною вірогідністю. Якщо кубіт дорівнює 0 (або 1) з стовідсотковою вірогідністю, його стан позначається за допомогою символу $|0\rangle$ (або $|1\rangle$) – в позначеннях Діраку. $|0\rangle$ і $|1\rangle$ – це базові стани. У загальному випадку квантовий стан кубіта знаходиться між базовими і записується, у вигляді $a|0\rangle+b|1\rangle$, де $|a|^2$ і $|b|^2$ – вірогідність виміряти 0 або 1 відповідно, де a і b комплексні. Більш того, відразу після вимірювання кубіт переходить в базовий квантовий стан, аналогічний класичному результату [21]¹⁾.

Наприклад є кубіт в квантовому стані $3/5|0\rangle-4/5|1\rangle$. В цьому випадку, вірогідність отримати при вимірюванні 0 складає $(4/5)^2=16/25=64\%$, 1 $(-3/5)^2=9/25=36\%$. В даному випадку, при вимірюванні ми отримали 0 з 64% вірогідністю. Тоді кубіт перескакує в новий квантовий стан $1*|0\rangle+0*|1\rangle=|0\rangle$, тобто, при наступному вимірюванні цього кубіта ми отримаємо 0 з стовідсотковою вірогідністю [22]²⁾.

Перейдемо до системи з двох кубітів. Вимірювання кожного з них може дати 0 або 1. Тому в системі 4 класичних стани: 00, 01, 10 і 11. Аналогічні їм базові квантові стани: $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ і $|11\rangle$. І нарешті, загальний квантовий стан системи має вигляд:

$$a|00\rangle+b|01\rangle+c|10\rangle+d|11\rangle. \quad (1.1)$$

Тепер $|a|^2$ – вірогідність виміряти 00 і так далі. Відзначимо, що $|a|^2+|b|^2+|c|^2+|d|^2=1$ як повна вірогідність.

¹⁾ [21] Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежда и реальность. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. 315 с.

²⁾ [22] Клышко Д.Н.. Физические основы квантовой электроники. Москва, Наука, 1986. 293с.

У загальному випадку, системи з L кубітів у неї 2^L класичних станів (00000, 00001, 11111), кожне з яких може бути виміряне з вірогідністю від 0% до 100%.

Кубіт є основною складовою квантового комп'ютера. Кубіт може набувати 2 значення 0 або 1. Двом значенням кубіта можуть відповідати, наприклад, основний і збуджений стани атома, напрями вгору і вниз, спина атомного ядра, напрям струму в надпровідному кільці, два можливі положення електрона в напівпровіднику і тому подібне [23]¹⁾.

Квантовий регістр влаштований майже так само, як і класичний. Це ланцюг квантових бітів, над якими можна проводити одно- і двобітові логічні операції, представленому на (рис. 1.4).

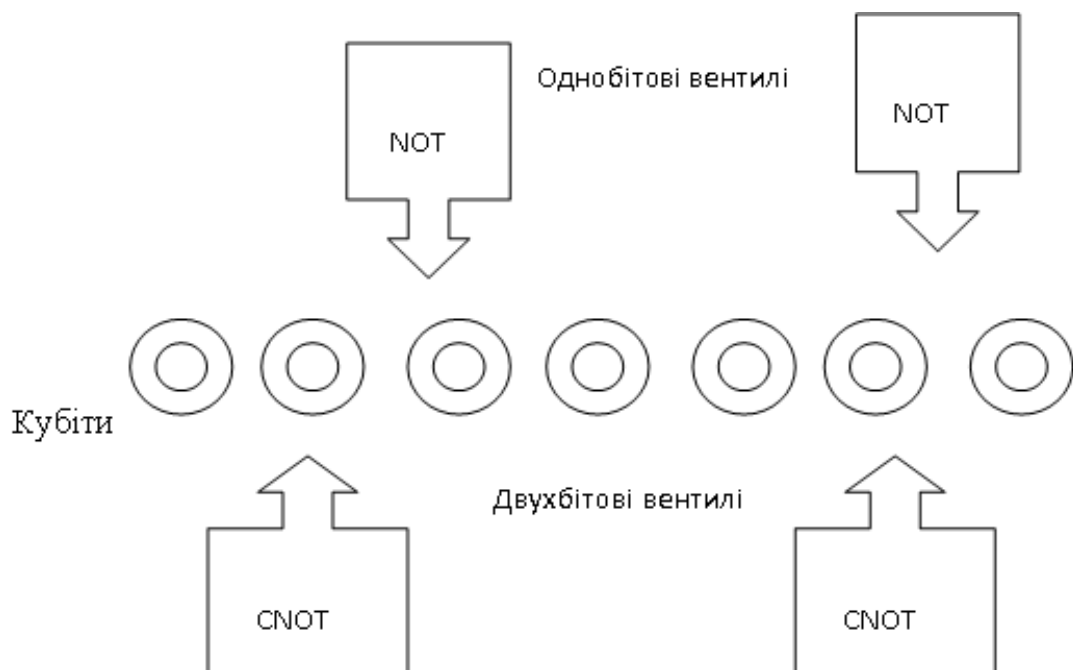


Рисунок 1.4 – Квантовий регістр: NOT – це регістр "НЕ",
CNOT(Controlled-NOT) – це регістр "управляємо НЕ"

До базових станів квантового регістра, освіченого L кубітами, відносяться, так само як і в класичному, всі можливі послідовності нулів і оди-

¹⁾ [23] Бом Д.. Квантовая теория, Москва, "Постмаркет", 2002. 175 с.

ниць довжиною L . Всього може бути 2^L різна комбінація. Їх можна вважати записом чисел в двійниковій формі від 0 до 2^L-1 і позначати $0,1,2,3,\dots, 2^L-1$. Проте ці базові стани не вичерпують всіх можливих значень квантового регістра (на відміну від класичного), оскільки існують ще і стани суперпозиції, які задаються комплексними амплітудами, зв'язаними умовою нормування. Класичного аналога у більшості можливих значень квантового регістра (за винятком базових) просто не існує [24]¹⁾.

Уявіть, що на регістр здійснюється зовнішня дія, наприклад, в частину простору подані електричні імпульси або направлені лазерні промені. Якщо це класичний регістр, імпульс, який можна розглядати як обчислювальну операцію, змінить L змінних. Якщо ж це квантовий регістр, то той же імпульс може одночасно перетворити до 2^L змінних.

Таким чином, квантовий регістр, в принципі, здатний обробляти інформацію в $2^L/L$ разів швидше в порівнянні з своїм класичним аналогом. Звідси відразу видно, що маленькі квантові регістри ($L < 20$) можуть служити лише для демонстрації окремих вузлів і принципів роботи квантового комп'ютера, але не принесуть великої практичної користі, оскільки не зуміють обігнати сучасні ЕОМ, а коштувати будуть свідомо дорожче.

Насправді квантове прискорення зазвичай значно менше, ніж приведена груба оцінка зверху (це пов'язано з складністю здобуття великої кількості амплітуд і прочитування результату), тому практично корисний квантовий комп'ютер повинен містити тисячі кубітів. Але, з іншого боку, зрозуміло, що для досягнення дійсного прискорення обчислень немає необхідності збирати мільйони квантових бітів. Комп'ютер з пам'яттю, вимірюваною всього лише в кілокубітах, буде в деяких завданнях несумірно швидше, ніж класичний суперкомп'ютер з терабайтами пам'яті [25]²⁾.

¹⁾ [24] Клышко Д.Н. Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения. УФН, 168, №9, 975–1016 (1998). 236 с.

²⁾ [25] Клышко Д.Н.. Квантовая оптика: квантовые, классические и метафизические аспекты. УФН, т.164, № 11, 1187–1214 (1994). 212 с.

1.3 Чинники, які визначають ефективність квантових розрахунків

Головна перевага квантового комп'ютера перед класичним – безпрецедентна швидкодія при рішенні ряду завдань. Завдяки своїй будові квантовий комп'ютер володіє рядом практично чарівних властивостей, які забезпечують якісно новий рівень обчислень і зберігання інформації [26]¹⁾.

У звичайному комп'ютері інформація кодується послідовністю бітів, і ці біти послідовно обробляються булевими логічними елементами, щоб отримати потрібний результат. Аналогічно квантовий комп'ютер обробляє кубіти, виконуючи послідовність операцій квантовими логічними елементами, кожен з яких є унітарним перетворенням, що діє на одиничний кубіт або пару кубітів. Послідовно виконуючи ці перетворення, квантовий комп'ютер може виконати складне унітарне перетворення над всім набором кубітів, приготованих в деякому початковому стані. Після цього можна виконати вимірювання над кубітами, який і дасть кінцевий результат обчислень. Це схожість обчислень між квантовим і класичним комп'ютером дозволяє вважати, що, принаймні, в теорії, класичний комп'ютер може в точності відтворювати роботу квантового комп'ютера. Іншими словами, класичний комп'ютер може робити все те ж саме, що і квантовий комп'ютер. Річ у тому, що, хоча теоретично класичний комп'ютер може симулювати квантовий комп'ютер, це дуже неефективно, настільки неефективно, що практично класичний комп'ютер не в змозі вирішувати багато завдань, які по плечу квантовому комп'ютеру. Симуляція квантового комп'ютера на класичному комп'ютері обчислювально складна проблема, тому що кореляції між квантовими бітами якісно відрізняється від кореляцій між класичними бітами, як було вперше показано Джоном Беллом. Для прикладу можна взяти систему лише з декількох сотень кубітів. Вона існує в просторі Гілберта розмірністю ~ 1090 , при моделюванні класичним комп'ютером, використання

¹⁾ [26] Боумейстер Д., Экерт А., Цайлингер А.. Физика квантовой информации. Москва, "Постмаркет", 2002. 376 с.

експоненціально великих матриць (щоб виконати розрахунки для кожного окремого стану, який також описується матрицею). Це означає, що класичному комп'ютеру знадобиться експоненціально більше часу по порівнянню навіть з примітивним квантовим комп'ютером [27]¹⁾.

Річард Фейнман був серед перших, хто усвідомив потенціал, закладений в явищі квантовій суперпозиції для вирішення таких завдань набагато швидше. Наприклад, система з 500 кубітів, яку практично неможливо промоделювати класично, є квантовою суперпозицією з 2500 станів. Кожне значення такої суперпозиції класично еквівалентно списку з 500 одиниць і нулів. Будь-яка квантова операція над такою системою, наприклад, налагоджений визначеним образом імпульс радіохвиль, який може виконати операцію кероване НЕ над 100-м-код і 101-м-код кубітом одночасно впливатиме на 2500 станів. Таким чином, за один тік комп'ютерного годинника квантова операція обчислює не один машинний стан, як звичайні комп'ютери, а 2500 станів відразу. Проте, врешті-решт, над системою кубітів виконується вимірювання, і система колапсує в єдиний квантовий стан, відповідний єдиному рішенню задачі, єдиному набору з 500 одиниць і нулів, як це диктується вимірювальною аксіомою квантової механіки. Це результат, рішення яке, знайдене колективним процесом квантових паралельних обчислень, що бере свої витoki в суперпозиції, еквівалентно виконанню тієї ж самої операції на класичному суперкомп'ютері з ~10150 окремих процесорів (що, звичайно, неможливо) [28]²⁾.

Перші дослідники в цій області були, звичайно, надихнулі такими гігантськими можливостями, і тому незабаром почалося справжнє полювання за відповідними завданнями для такої обчислювальної потужності [29]³⁾.

¹⁾ [27] Горбачев В.Н., Жилиба А.И. Физические основы современных информационных процессов. Ст.-Петербург, Издательство "Петербургский институт печати", 2004. 410 с.

²⁾ [28] Елютин П.В.. Теоретические основы квантовой радиофизики. Изд-во МГУ, 2003. 187 с.

³⁾ [29] Cirac J. and Zoller P. Quantum Computations with Cold Trapped Ions. Phys.Rev.Lett. 74, 4091 (2001). 260 с.

Пітер Шор, запропонував задачу, яку можна було б вирішити за допомогою квантового комп'ютера та квантового алгоритму [30]¹⁾. Алгоритм Шора використовує потужність квантової суперпозиції, щоб розкласти великі числа (порядку ~ 10200 двійкових розрядів і більше) на множники за декілька секунд. Ця задача має важливе практичне вживання для шифрування, де загальноприйнятій (і кращій) алгоритм шифрування, відомий як RSA, заснований якраз на складності розкладання великих складених чисел на прості множники. Комп'ютер, який з легкістю вирішує таку задачу, звичайно, представляє великий інтерес для безлічі урядових організацій, використовуючих RSA який до сих пір вважався "незламним" і для будь-кого хто зацікавлений в безпеці своїх даних. Шифрування, проте, лише одне можливе вживання квантового комп'ютера. Шор розробив цілий набір математичних операцій, які можуть бути виконані виключно на квантовому комп'ютері. Деякі з цих операцій використовуються в його алгоритмі факторизації [31]²⁾. Далі, Фейнман стверджував, що квантовий комп'ютер може діяти як моделюючий пристрій для квантової фізики, потенційно відкриваючи двері тоді багатьом відкриттям в цій області. В даний час потужність і можливості квантового комп'ютера, в основному, предмет теоретичних міркувань.

Елементарним кроком при квантових обчисленнях є унітарна операція над L -кубітової суперпозицією станів реєстра з L кубітов, при цьому виконується паралельна обробка відразу всіх 2^L комплексних амплітуд, тоді як для класичного комп'ютера подібна операція зажадало б 2^L окремих елементарних кроків.

Така властивість називається квантовим паралелізмом в роботі квантових пристроїв, воно приводить до експоненціального прискорення обчислювального процесу. У цьому полягає одна з головних переваг квантових комп'ютерів в порівнянні з класичними цифровими комп'ютерами. Обчислювальний процес носить характер інтерференції – комплексні амплі-

¹⁾ [30] Shor P. Introduction to Quantum Algorithms. Quant-ph/000503. 342 с.

²⁾ [31] Shor P. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on Quantum Computer. Quant-ph/9508027. 257 с.

літуди станів багатьох кубітів можуть складатися конструктивно і деструктивно. Такий побудований, наприклад, знаменитий алгоритм Л.Гровера пошуку в неструктурованій базі даних.

Однією з найцікавіших властивостей квантових станів, що принципово відрізняють їх від класичних, є заплутування (entanglement) станів, яке є когерентною суперпозицією станів декількох квантових елементів, що визначає своєрідну нелокальну кореляцію цих станів, що виникає при взаємодії кубітів. Такі стани отримали назву заплутаних (entangled) станів. Заплутані стани грають дуже важливу роль в різних процесах передачі і обробки квантової інформації. Хоча поняття заплутування (entanglement) було введене ще Е.Шредингером під назвою Verschrnkung у 1935 році, велику увагу воно привернуло до себе лише з 1993 році у зв'язку з виявленою Ч.Беннеттом з теоретичною можливістю використання його для передачі (телепортації) невідомого для відправника А квантового стану дворівневої системи до одержувача В без реального переміщення самого елемента. Ця думка стала далі основною для розвитку принципово нового методу секретної передачі інформації (криптографії). Останнім часом квантове явище телепортації активно обговорюється з точки зору організації швидких квантових обчислень в багатокубітових системах [32]¹⁾.

Перелік можливих додатків заплутаного стану вже досить великий. Властивість заплутування квантових станів лежить і в основі багатьох квантових алгоритмів. Воно є одним з коріння очікуваних успіхів квантових обчислювальних процесів, оскільки відкриває принципово нові можливості кодування інформації, забезпечення перешкодозахищеної і ефективнішого управління інформацією [33]²⁾.

З очікуваним експоненціальним прискоренням квантових обчислень зазвичай зв'язують перспективи вирішення так званої *np*-повної

¹⁾ [32] Feynman R.. Quantum mechanical computers, Found.Phys. 16, 507–531(2002). 301 с.

²⁾ [33] Feynman R. Simulating physics with computers, Internat. J. Theoret. Phys. 21, 467 488 с.

(Nondeterministic polynomial-time complete) проблеми, тобто проблеми вирішення таких завдань, для яких це рішення дуже важко знайти за допомогою класичних цифрових комп'ютерів, хоча дуже просто це рішення перевірити. Такі завдання відносяться до класу необчислюваних в тому сенсі, що вони не можуть бути вирішені на класичних комп'ютерах за час, поліноміально залежне від числа бітів L , що представляють завдання. Квантовий алгоритм факторизації, запропонований П.Шором в 1994 р., що дозволяє виконувати розкладання n -значного числа на прості множники за час поліноміально залежне від n , тобто з експоненціальним прискоренням в порівнянні з найпотужнішими класичними алгоритмами, став однією з основних спонук для інтенсивного розвитку квантових методів обчислень і винаходу алгоритмів, які дозволяють вирішувати деякі np -проблеми. Вважається, що алгоритм Шора вже зараз дозволить знайти вживання квантовим комп'ютерам вельми скромних розмірів (десятки кубітів) для цілей квантової криптографії, квантової комунікації.

Одним з важливих додатків квантових обчислень можливо виявиться також моделювання поведінки широкого класу багаточастинкових квантових систем, що наголошувалося ще Р.Фейнманом. Завдання такого роду можуть стати особливо актуальними у зв'язку з швидким просуванням сучасної нанотехнології все глибше в область нанометрових масштабів і необхідністю прямого моделювання електронних процесів в приладах наноелектроніки, у тому числі і в багатокубітових квантових пристроях, а також у зв'язку з потребою моделювання фізичних властивостей різних складних органічних молекулярних і біологічних систем, штучних напівпровідникових і магнітних матеріалів і структур.

1.4 Структура квантового комп'ютера та квантові алгоритми

Квантові методи виконання обчислювальних операцій, а також передачі і обробки інформації, вже починають втілюватися в реально функ-

ціонуючих експериментальних пристроях, що стимулює зусилля по реалізації квантових комп'ютерів – цього нового напрямку в обчислювальній техніці.

Кількість публікацій по квантовій теорії інформації і квантовим обчисленням набула останнім часом лавиноподібного характеру, з'явилися і експериментальні роботи [34]¹⁾.

Принципова схема роботи будь-якого квантового комп'ютера може бути представлена таким чином (див. рис. 1.5). Основною його частиною є квантовий реєстр – сукупність деякого числа L кубітів. До введення інформації в комп'ютер всі кубіти реєстра мають бути приведені в основні базисні (булеві) стани, тобто в стан $|01c, |02c, |03c, \dots |0Lc \in |01, 02, 03, \dots 0Lc$. Ця операція називається підготовкою початкового стану або ініціалізацією (initializing). Далі кожен кубіт піддається селективній дії, наприклад, за допомогою імпульсів зовнішнього електромагнітного поля, керованих класичним комп'ютером, яке переведе основні базисні стани певних кубітів в не основні стани $|0c\rangle|1c\rangle$. При цьому стан всього реєстра перейде в суперпозицію базисних станів вигляду $|n\rangle = |n_1, n_2, n_3, \dots nLc$, де $n_i = 0, 1$, задаючи бінарне представлення числа $n = \sum n_i 2^i$.

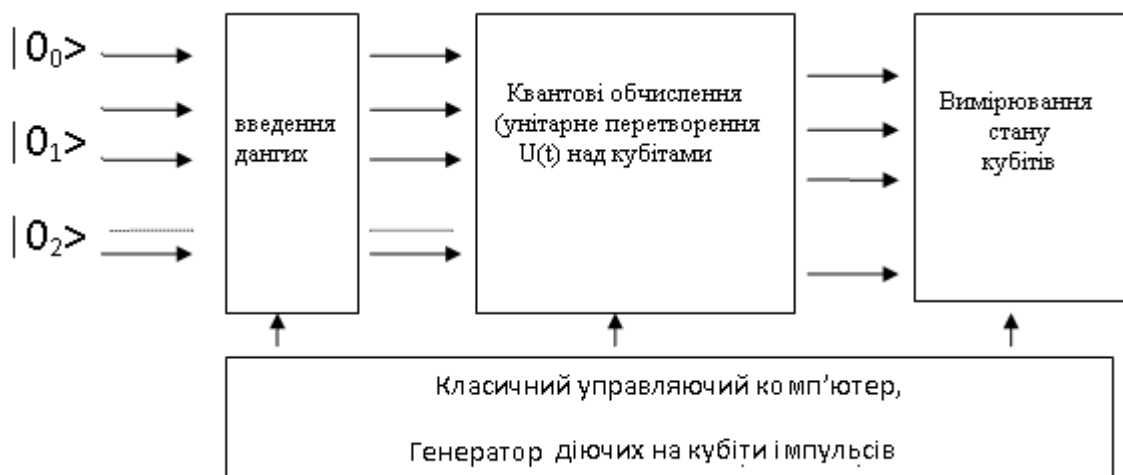


Рисунок 1.5 – Принципова схема роботи квантового комп'ютера

¹⁾ [34] Gisin N. Quantum Cryptography. Quant-ph/0101098. 620 с.

При введенні інформації в квантовий комп'ютер стан вхідного регістра, за допомогою відповідних імпульсних дій перетвориться у відповідну когерентну суперпозицію базисних ортогональних станів

$$|y(0)\rangle = \sum c_n |n\rangle. \quad (1.2)$$

У такому вигляді інформація далі піддається дії квантового процесора, що виконує послідовність квантових логічних операцій, яка визначається унітарним перетворенням що діє на стан всього регістра. До моменту часу t в результаті перетворень вихідний квантовий стан стає новим суперпозицією вигляду

$$|y(t)\rangle = \sum c_n U |n\rangle, \quad (1.3)$$

яка і визначає результат перетворення інформації на виході комп'ютера. Сукупність всіх можливих операцій на вході даного комп'ютера, що формують вихідні стани, а також що здійснюють унітарні локальні перетворення, відповідні алгоритму обчислення, способи придушення втрати когерентності – так званою декогерентізації (decoherence) квантових станів і виправлення випадкових помилок, грають тут ту ж роль, що і "програмне забезпечення" (software) в класичному комп'ютері [35]¹⁾.

Факторизація великих чисел. Рішення цієї задачі цікаве ще і тим, що захист багатьох секретних даних в даний час будується на тому, що класичний комп'ютер не може за прийнятний час розкласти велике число на прості множники [36]²⁾. Пітер Шор розробив перший квантовий алгоритм, призначений для факторизації, чим дав величезний поштовх розвитку квантових обчислень, представлений на (рис. 1.6).

¹⁾ [35] Bennett Ch.H. , Phys. Rev. Lett. 68, 3121 (2004). – 159 с.

²⁾ [36] Wiesner S. , SIGACT News 15, 78; original manuscript written circa 2006. 407с.

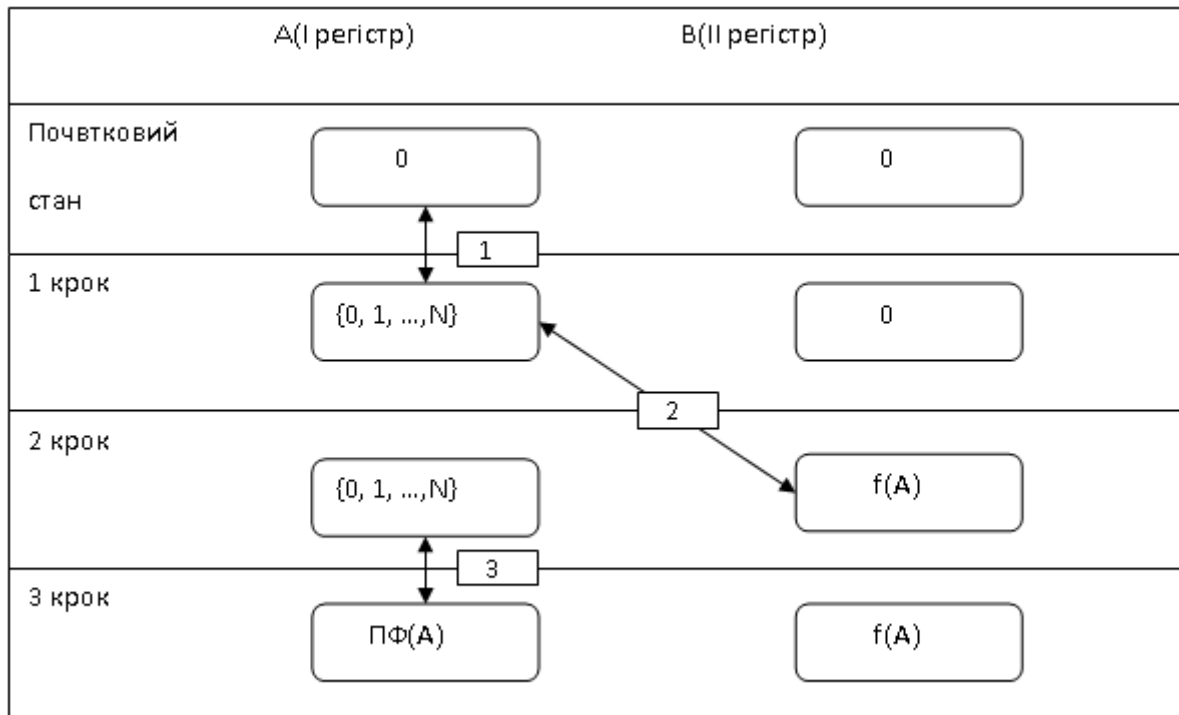


Рисунок 1.6 – Схема алгоритму Шора: 1 – перетворення у стан суперпозиції; 2 – обчислення $c^x \bmod N$; 3 – перетворення Фур'є.

Щоб проілюструвати відмінності квантових алгоритмів від класичних, зупинимося на алгоритмі Шора детальніше. Передбачимо, що N – число, яке потрібно розкласти на прості множники. Виберемо ціле число 3 , менше N , і обчислимо значення функції: $f(x) = c^x \bmod N$. знайдемо залишок від ділення c^x на N . Математики показали, що дана функція буде періодичною, і її період r дозволяє отримати прості множники для числа N . Оскільки $f(0)=1$ і r – період функції f , тоді $f(r)=1$. Найменше ненульове натуральне число r , що відповідає умові $cr=1 \bmod N$, називають порядком числа 3 по модулю N . Оскільки $(cr/2-1)(cr/2+1) = cr-1 = 0 \bmod N$ тоді найбільший загальний дільник – $\text{НОД}(cr/2-1, N)$ дасть шуканий результат (тоді НОД може бути знайдений за допомогою алгоритму Евкліда за поліноміальний час, тобто "досить швидкий"). Алгоритм Шора передбачає використання двох квантових реєстрів, кожен з яких складається з q кубітів (q має бути достатнім для розміщення в реєстрі числа N). Спочатку перший реєстр переводиться в стан супер-

позиції, в якому він зберігає одночасно всі числа від 0 до N . Вміст першого регістра використовується як аргумент при обчисленні функції $f(x)$, результат якого поміщається в другий регістр. Після цього над першим регістром здійснюється квантове перетворення Фур'є. Шор показав, що у результаті система, яка складається з цих двох квантових регістрів, з великою вірогідністю переходить в стан, який дозволяє визначити порядок r числа s . Для однозначного визначення r алгоритм може бути повторений кілька разів. Шор показав також, що всі необхідні для здійснення його алгоритму перетворення можуть бути виконані на квантовому комп'ютері за поліноміальний час [37]¹⁾.

КК здатний проводити одночасно 64 тис, операцій. Основною частиною будь-якого квантового комп'ютера є квантовий регістр, що є сукупністю деякого числа кубітів, квантових одиниць інформації. Кубіт, на відміну від звичайного біта, який може набувати значення 0 або 1, може одночасно знаходитися в різних квантових станах, які представляють суперпозицію 0 і 1.

До введення інформації в комп'ютер всі кубіти регістра мають бути приведені в основні базисні стани (операція ініціалізації). Далі кожен кубіт піддається селективній дії (імпульсами зовнішнього електромагнітного поля або іншими), і весь регістр переходить в суперпозицію базисних станів [38]²⁾.

В Orion регістр складається всього з 16 кубіт. Потім інформація обробляється квантовим процесором, що виконує послідовність квантових логічних операцій. Результатом перетворення інформації на виході комп'ютера є нова суперпозиція станів, яку можна далі перетворити до вигляду, придатного для подальшого використання традиційні захисні системи засновані на тому, що передаване повідомлення за допомогою деякого алгоритму комбінується з додатковою секретною інформацією (ключем), внаслідок чого виходить криптограма. Якщо для кожного повідомлення використовувати окремий ключ, тоді забезпечується абсолютна

¹⁾ [37] Vaidman L. and N.Yordan. Methods for reliable teleportation, 2000. 215 с.

²⁾ [38] Bennet Ch. Quantum Information and Computation. Physics Today, October 24 (1998). 363 с.

секретність. Це питання складає суть проблеми поширення ключа. Схема пристрою для квантового поширення ключа представлена на (рис. 1.7).

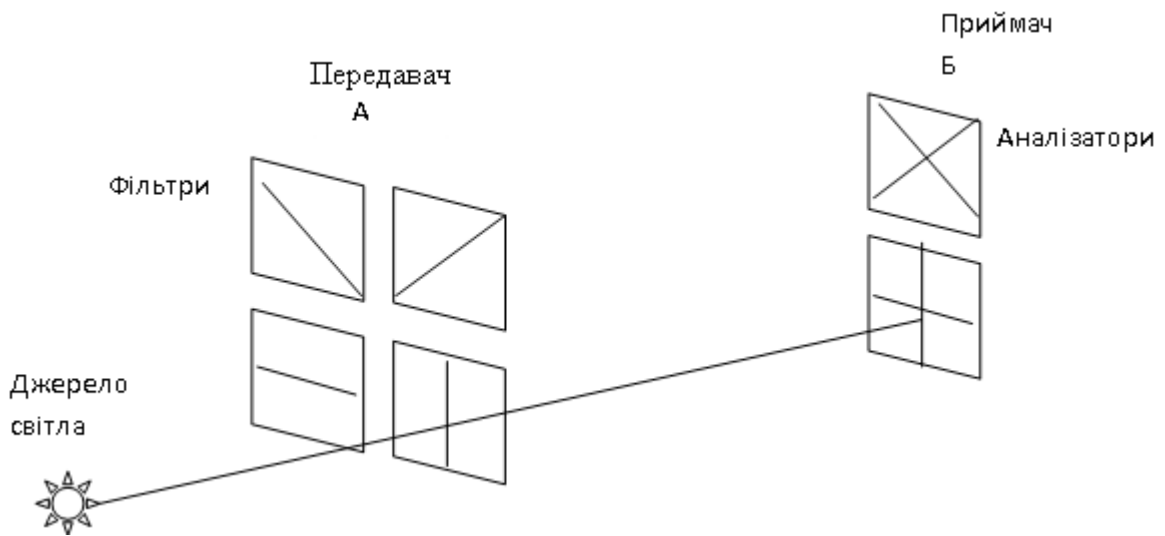


Рисунок 1.7 – Схема пристрою для квантового ключа

Для будь-якої системи передачі інформації характерні наступні дійові особи: об'єкти А і Б, які обмінюються інформацією, та намагається перехопити цю інформацію. Запропонований в 1984 р. Чарльзом Беннетом і Джілом Brassardом метод квантового поширення ключа (quantum key distribution) дозволяє передати ключ від А до Б так, щоб спроба його перехоплення неминуче буде виявлена [39]¹⁾.

А і Б мають бути сполучені квантовим каналом зв'язку (волоконно-оптичний канал, в якому інформація переноситься за допомогою фотонів) і звичайним загальнодоступним каналом (наприклад, телефонні лінії або internet-з'єднання).

А посилає фотон в одному з чотирьох поляризованих станів (вертикальному, горизонтальному, під кутами $+45^\circ$, -45°), який обирається випадково, і записує результат. Б має в своєму розпорядженні два аналізатори: один аналізатор дозволяє визначати вертикально і горизонтально

¹⁾ [39] Напівпровідникові прилади : Підручник / Л. Д. Васильєва, Б. І. Медведенко, Ю. І. Якименко . – К.: Кондор, 2008. – ISBN 978-966-622-103-9.

поляризовані фотони, інший – фотони, поляризовані під кутами $+45^\circ$ і -45° . Для реєстрації кожного фотона Б випадково обирає аналізатор, записує вибір і результат, який був отриманий. Вірогідність того, що він вибере невірний аналізатор, складає 50%.

Після здобуття достатньої кількості фотонів Б по загальнодоступному каналу повідомляє А, які аналізатори він використовував, але не повідомляє, які результати він отримав. А порівнює цю послідовність зі своїм записом і повідомляє Б, для яких фотонів він правильно вибрав аналізатор, але не повідомляє, яка була поляризація цих фотонів. З послідовності викидаються ті біти, для яких не були застосовані відповідні аналізатори. Для бітів, що залишилися, А і Б повинні мати однакові результати за умови, що не виконувала перехоплення.

А і Б вибирають випадкову підмножину ключа і порівнюють його по загальнодоступному каналу. Передбачимо, що розрізали кабель і виконує вимірювання за допомогою устаткування, аналогічного устаткуванню Б. Після цього вона посиляє Б фотон відповідно до результатів своїх вимірів (використовуючи устаткування, аналогічне устаткуванню А). Тоді в 50% випадків вибере невірний аналізатор і посилатиме Б фотони у випадково обраних станах, що в 25% випадків дасть помилку. Таким чином, на цьому етапі перехоплення інформації може бути виявлений [40]¹⁾.

Проте помилки можуть виникати навіть в тому випадку, якщо не виконувала перехоплення. Вони можуть бути усунені за допомогою стандартних методів корекції помилок. Обчислений коефіцієнт помилки (звичай близько 1%) може бути повністю віднесений на рахунок. Процедура, визвана посиленням секретності (*privacy amplification*), дозволяє видалити з ключа інформацію, яка могла бути перехоплена, проте це знов приводить до скорочення довжини використовуваного ключа. Тому дуже поважно зробити коефіцієнт помилок як можна меншим. Після здійснення вказаної процедури

¹⁾ [40] Терещук Р. М., Терещук К. М., Седов С. А. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства. – К.: Наукова думка, 1988. – С. 183 – 191.

А і Б отримують в розпорядження ключ необхідної довжини, що випадково згенерував, завдяки якому вони можуть зашифрувати повідомлення і переслати його по загальнодоступному каналу. Якщо для кожного нового повідомлення вони повторюватимуть цю процедуру, тоді інформація буде безумовно захищена від несанкціонованого доступу. Потрібно відмітити, що цей «протокол» не може бути безпосередньо використаний для обміну інформацією, оскільки частина інформації, обрана випадковим чином, має бути викинута [41]¹⁾.

¹⁾ [41] Shumacher B.W. Quantum coding /Phys. Rev. 1995. P. 2738-2747.

2 ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ З ЗАСТОСУВАННЯМ КВАНТОВИХ СТРУКТУР

2.1. Квантові структури

У класичній фізиці електрони, як і всі інші частки, рухаються по траєкторіях, які можна розрахувати за допомогою рівнянь Ньютона. Електрони мають масу m і електричний заряд e . В області, де є електромагнітне поле, вони рухаються прискорено, а там, де поля ні, рух рівномірний та прямолінійний. У кожному разі, задаючи початкову координату та імпульс (або швидкість), можна обчислити траєкторію. Так, наприклад, за допомогою класичних рівнянь рухи розраховуються електронні траєкторії в кінескопі або магнетроні. Однак як привабливим і природним не здавалася б класична картина руху, від неї доведеться відмовитися, якщо ми збираємося розглядати електрони, які рухаються в мікроскопічно малих об'ємах. Подання, отримані на основі повсякденного досвіду й почуттєвого сприйняття, не застосовні до мікросвіту.

У квантовій механіці картина руху зовсім інша. Ця теорія не описує рухи по траєкторії. Справа в тому, що у квантовій механіці накладається обмеження на точність, з якої можуть бути задані початкова координата й імпульсна частки. Якщо координата частки відома з точністю, тоді її імпульс можна визначити не точніше, ніж

$$\Delta p \geq \frac{\hbar}{\Delta x} \quad (2.1)$$

Це знамените співвідношення невизначеностей Гейзенберга, причому величина, що фігурує тут, \hbar називається постійною планки або квантом дії. Відповідно до співвідношення невизначеностей, дуже точне завдання координати електрона λv приводить до великої невизначеності імпульсу λi ,

виходить, напрямок, по якому буде рухатися електрон, передбачити неможливо [42]¹⁾.

Основною частиною квантового комп'ютера є реєстр, який складається з деякого числа кубіт. Процес обчислень полягає в операціях, утворених над реєстром, які переводять його з однієї суперпозиції базисних станів в іншу.

Якщо спрощувати, тоді весь процес обчислення зводиться до трьох операцій. Спочатку відбувається ініціалізація (підготовка початкового стану), під час якої всі кубіти переводяться в основний базисний стан -0 . Далі здійснюється введення інформації. При цьому реєстр переходить у суперпозицію базисних станів, який виражає з різним ступенем ймовірності будь-яку комбінацію нулів і одиниць у межах наявної кількості кубіт. Наступний етап – обробка інформації квантовим процесором. При цьому над реєстром виконується ряд логічних операцій, внаслідок чого він приймає новий квантовий стан (по суті – та ж суперпозиція, яка виражає будь-яку комбінацію нулів і одиниць, але з іншими ймовірностями), що і є результатом обчислень [43]²⁾.

Розглянемо спочатку, як співвідношення невизначеностей позначається на характері вільного руху. Нехай частка поміщена в область розміром a . Тоді, згідно (2.1), розкид її імпульсів один по одному величини буде дорівнювати $\Delta p \geq \frac{\hbar}{a}$. Якби ми стежили за рухом групи класичних часток, які локалізовані в області a і мають деякий розкид імпульсів, тоді побачили б, що ці частки розбігаються. За час $\Delta t \geq \frac{2a}{\Delta u}$ часток розбіжиться по області розміром $2a$. Виявляється, що рух однієї квантової частки, на яку не діють зовнішні сили, у відомому змісті аналогічної еволюції риючи класичних часток. Через деякий час частка, локалізована в обмеженій області, може бути виявлена в інтервалі більших розмірів. Який саме шлях вибере частка й де вона

¹⁾ [42] Feinman R.P. Quantum Mechanical Computer / Foundations of Physics, 1986. № 16(6). P. 507–531.

²⁾ [43] Shor P.W. Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring / Proc. 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (IEEE Press), 1994. P. 124–134.

буде виявлена, пророчити заздалегідь неможливо. Відомо лише одне: чим точніше визначена початкова координата і чим менша точно відомий імпульс, тим швидше частка буде віддалятися від початкової області локалізації. Якщо спочатку частка перебувала в області a і, відповідно до співвідношення невизначеностей, розкид швидкостей буде дорівнювати $\Delta u = \Delta p / m = \hbar / am$, тоді за час $\Delta t = 2ma^2 / \hbar$ область локалізації збільшиться вдвічі. Певно в такий спосіб величина задає час розпливання початкового розподілу.

Необхідно сказати про головну особливість квантовомеханічного опису. Якщо в деякий момент часу частка перебувала в обмеженій області простору, тоді в майбутньому неможливо вірогідно пророчити її місце розташування. Можна говорити про розподіл частки в просторі й про ймовірність цього розподілу. Величина, яка описує цей розподіл, одержала назву λ -функції або хвильової функції. Вона не описує усереднене поведення великої кількості електронів або одного електрона, заряд якого "розмазаний" по всьому простору. Вона дає ймовірний, статистичний опис окремого електрона. Інтенсивність цієї функції, а точніше, її квадрат λ визначає ймовірність виявити частку в тій або іншій області, точніше, ймовірність виявити частку в інтервалі λ дорівнює λ . Хвильова функція – це основна характеристика квантової системи. Вона містить повну інформацію про електрони або інші частки в атомі, молекулі, кристалі [44]¹⁾.

Отже, квантова механіка дає зовсім нову картину фізичного світу. Електрон подібний до хвилі. Він може випробовувати інтерференцію, проникати через вузькі щілини та бар'єри, але разом з тим зберігає ознаки звичайної частки. Дійсно, він має строго певну масу, заряд електрона також фіксований. Крім того, подібно класичній частці, електрон має імпульс і енергією.

Необхідно розглянути ще один прояв чисто квантової природи електрона. В тому випадку, коли рух відбувається в обмеженій області, його

¹⁾ [44] Zalka C. Simulating quantum systems on a quantum computer/Proc. Roy. Soc. London. 1998. P. 313–322.

енергія має строго певні, дискретні значення. Якщо спектр енергій квантований, та хвилі різної фізичної природи, порушені в обмеженому об'ємі, мають строго певну довжину хвилі та частоту. Так, натягнута струна або стовп повітря в трубці органа можуть звучати лише на цілком певних частотах. Якщо смикнути струну посередині, тоді вона буде коливатися так, що в центрі утворяться пучки. В тому випадку, коли струна притиснута пальцем у середній точці, можна збудити таке коливання, щоб було два пучки. Це стоячі хвилі. Щоб форма коливань не змінювалася згодом, частота повинна мати цілком певні значення. Говорять, що спектр таких коливань дискретний.

В квантовій механіці ситуація аналогічна. Електрон не бігає в обмеженій області, як класична частка. Якщо він замкнений в атомі, молекулі або будь-якій потенційній ямі, тоді хвильова функція Ψ представляє стоячу хвилю. Якщо мова йде про прямокутну потенційну яму, яка зображена на (рис. 2.1).

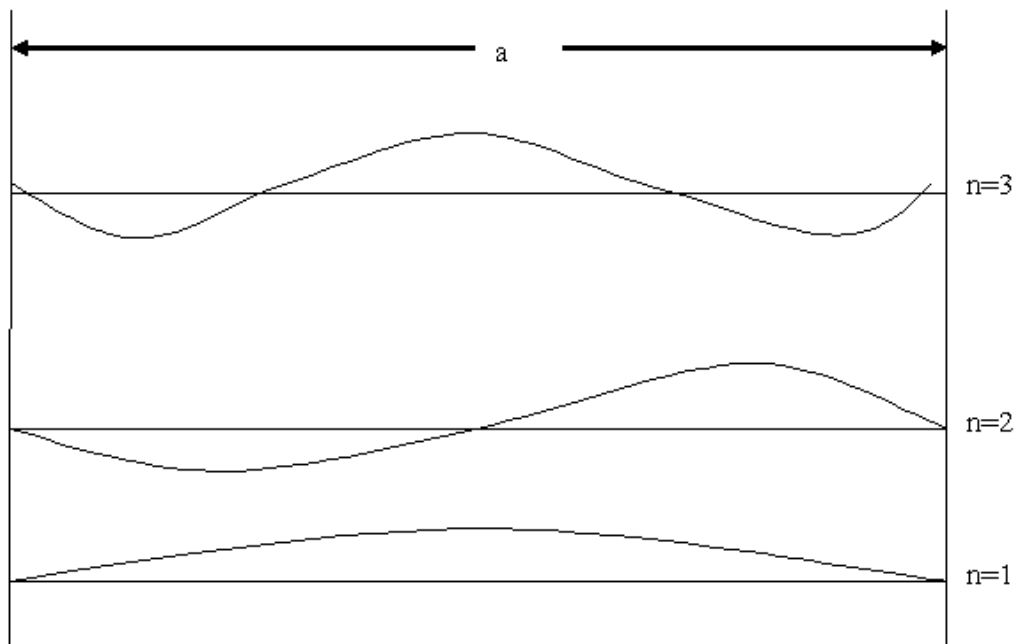


Рисунок 2.1 – Хвильові функції й рівні енергії частки, що перебуває в нескінченно глибокій потенційній ямі. Показано три нижніх енергетичних рівні і три хвильові функції

Тоді за своєю формою хвиля буде такою ж, як і у випадку натягнутої струни, однак, по-перше, природа хвилі тут інша, а по-друге, дискретним у цьому випадку буде не спектр частот, а спектр енергій. Стоячі хвилі, які описують електронні стани в ямі, – це синусоїди, що звертаються в точках $x=0$ і $x=a$ у нуль.

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{\pi x}{a} n, \quad (2.2)$$

де n – номер квантового стану,

a – розмір ями.

На (рис. 2.1) зображено три такі функції, які відповідають $n = 1, 2, 3, \dots$ Ми бачимо, що електронна щільність у ямі розподіляється нерівномірно, є максимуми й мінімуми щільності ймовірності [45]¹⁾. З формули (2.2) треба також, якщо довжини хвиль Ψ -функцій, що описують електронні стани з різними n , задовольняють умовам $\frac{\lambda_n}{2} = a/n$, тобто в ямі укладається ціле число напівхвиль. Тепер знайдемо дозволені рівні енергії електрона, що перебуває в потенційній ямі. Це можна зробити вирішивши рівняння Шредингера, але ми скористаємося правилом квантування Н. Бору. Відповідно до постулату Бору, у потенційній ямі дозволені лише ті траєкторії, для яких імпульс частки p_n і ширина ями a зв'язані співвідношенням:

$$p_n a = \pi \hbar n. \quad (2.3)$$

Тут n – номер квантового стану. Визначивши звідси дозволені значення імпульсу, без роботи знайдемо та рівні енергії в ямі:

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2. \quad (2.4)$$

¹⁾ [45] Ozhigov Y. Quantum Computer Can Not Speed Up Iterated Applications of a Black Box / quant/ph/9712051, 1997.

Зверніть увагу на те, що мінімальна енергія частки, яка перебуває в ямі, не може бути рівної нулю. Завжди існує так звана енергія нульових коливань, відповідно до формули (2.4), дорівнює $\pi^2\hbar^2/(2ma^2)$. Подивимося, який порядок має величина першого рівня в реальній квантовій ямі. Якщо ширина ями дорівнює 5 нм, тоді, згідно (2.4), маємо $E_1=0,02$ еВ. Потрібно, однак, мати на увазі, що електронна маса в кристалі може істотно відрізнятись від маси вільного електрона $m=10-27$ г. У типовій ситуації ефективна маса у квантовій ямі в десять разів менше маси вільного електрона. Тоді при тій же ширині ями одержимо $E_1=0,2$ еВ. Ця величина й визначає характерний масштаб електронних енергій у квантових структурах.

Тепер, розглянувши основні положення квантової механіки, необхідні для розуміння процесів, які відбуваються в напівпровідникових структурах, обговоримо деякі проблеми нанотехнології [46]¹⁾.

Найпростіша квантова структура, у якій рух електрона обмежений в одному напрямку, – це тонка плівка або просто досить тонкий шар напівпровідника. Саме на тонких плівках напівметалу вісмуту й напівпровідника InSb вперше спостерігалися ефекти розмірного квантування. На цей час квантові структури виготовляють інакше. Познайомимося з основними прийомами сучасної нанотехнології, однак необхідно розглянути структуру енергетичного спектра напівпровідників. Цей спектр складається з дозволених і заборонених енергетичних зон (рис 2.2), які сформовані з дискретних рівнів атомів, які утворюють кристал. Найвища енергетична зона називається зоною провідності. Нижче зони провідності розташована валентна зона, а між ними лежить заборонена зона енергій. В одних напівпровідників заборонені зони широкі, а в інших більше вузькі. Що відбудеться, якщо привести в контакт два напівпровідники з різними забороненими зонами (граніця таких напівпровідників називається гетероструктурою). На рис. 2.2 ми бачимо таку граніцю вузькозонного й широкозонного напівпровідників. Для електронів,

¹⁾ [46] Cory D.G., Fahmy A.F., Havel T.F. Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy: an experimentally accessible paradigm for quantum computing / Proc. of the 4th Workshop on Physics and Computation (Complex Systems Institute, Boston, New England), 1996.

які рухаються в вузькозонному напівпровіднику і мають енергії менше E^c_2 , границя буде відігравати роль потенційного бар'єра. Два гетероперехода обмежують рух електрона з двох сторін і як би утворять потенційну яму.

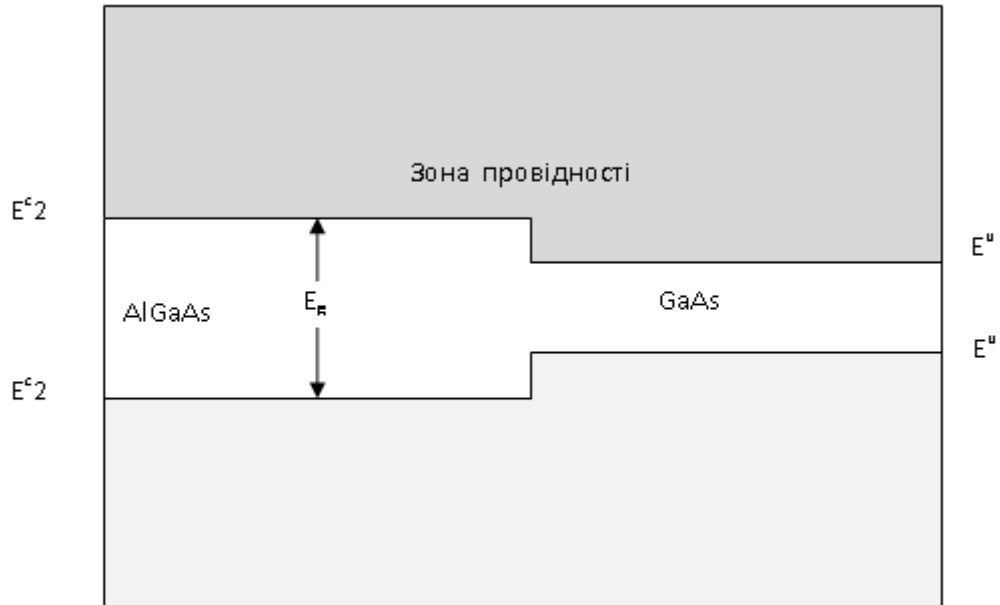


Рисунок 2.2 – Енергетичні зони на границі двох напівпровідників – гетероструктури E^c і E^u – границі зони провідності та валентної зони, E_g – ширина забороненої зони, електрон з енергією менше E^c_2 (рівень показаний червоним кольором) може перебувати лише праворуч від границі

Таким способом і створюють квантові ями, поміщаючи тонкий шар напівпровідника з вузькою забороненою зоною між двома шарами матеріалу з більш широкою забороненою зоною. В результаті електрон виявляється замкненим в одному напрямку, що й приводить до квантованої енергії поперечного руху. У той же час у двох інших напрямках рух електронів буде вільним, тому можна сказати, що електронний газ у квантовій ямі стає двовимірним. У такий же спосіб можна приготувати й структуру, яка містить квантовий бар'єр, для чого варто помістити тонкий шар напівпровідника з широкою забороненою зоною між двома напівпровідниками з вузькою забороненою зоною.

Для виготовлення подібних структур розроблено кілька зроблених технологічних процесів, однак найкращі результати в готуванні квантових структур досягнуті за допомогою методу молекулярно-променевої епітаксії. Для того щоб за допомогою цього методу виростити тонкий шар напівпровідника, потрібно направити потік атомів або молекул на ретельно очищену основу. Кілька потоків атомів, які виходять випаром речовини з окремих нагрітих джерел, одночасно летять на подложку. Щоб уникнути забруднення, вирощування структури роблять у глибокому вакуумі. Весь процес управляється комп'ютером, хімічний склад і кристалічна структура вирощуваного шару контролюються в процесі росту. Метод молекулярно-променевої епітаксії дозволяє вирощувати зроблені монокристалічні шари товщиною всього кілька періодів решітки (нагадаємо, один період кристалічної решітки становить близько 2λ).

Надзвичайно важливо, щоб періоди кристалічних решіток двох сусідніх шарів, які мають різний хімічний склад, були майже однаковими. Тоді шари будуть точно впливати один за одним і кристалічною решіткою вирощеної структури не буде містити дефектів. За допомогою методу молекулярно-променевої епітаксії можна одержати дуже різку (з точністю до моношару) границю між двома сусідніми шарами, причому поверхня виходить гладкою на атомному рівні. Квантові структури можна вирощувати з різних матеріалів, однак найбільш вдалою парою для вирощування квантових ям є напівпровідник GaAs – арсенід галію й твердий розчин $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, в якому частина атомів галію заміщена атомами алюмінію. Величина x – це частка атомів галію, заміщених атомами алюмінію, звичайно вона змінюється в межах від 0,15 до 0,35. Ширина забороненої зони в арсеніді галію становить 1,5 еВ, а у твердому розчині $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ вона росте з ростом x . Так, при $x=1$, тобто в сполуці AlAs, ширина забороненої зони дорівнює 2,2 еВ. Щоб виростити квантову яму, необхідно під час росту змінити хімічний склад атомів, які летять на зростаючий шар. Спочатку потрібно виростити шар напівпровідника з широкою забороненою зоною, тобто $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, потім шар

вузькозонного матеріалу GaAs і, нарешті, знову шар $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Енергетичну схему приготовленої в такий спосіб квантової ями ми бачимо на (рис. 2.3). На відміну від показаної на рис. 2.1 ця яма має кінцеву глибину (трохи десятих часток електрон-вольта). У ній перебувають тільки два дискретних рівні, а хвильові функції на границі ями не звертаються в нуль. Виходить, електрон можна виявити й за межами ями, в області, де повна енергія менше потенційної [47]¹⁾. Звичайно, такого не може бути в класичній фізиці, а у квантовій фізиці це можливо.

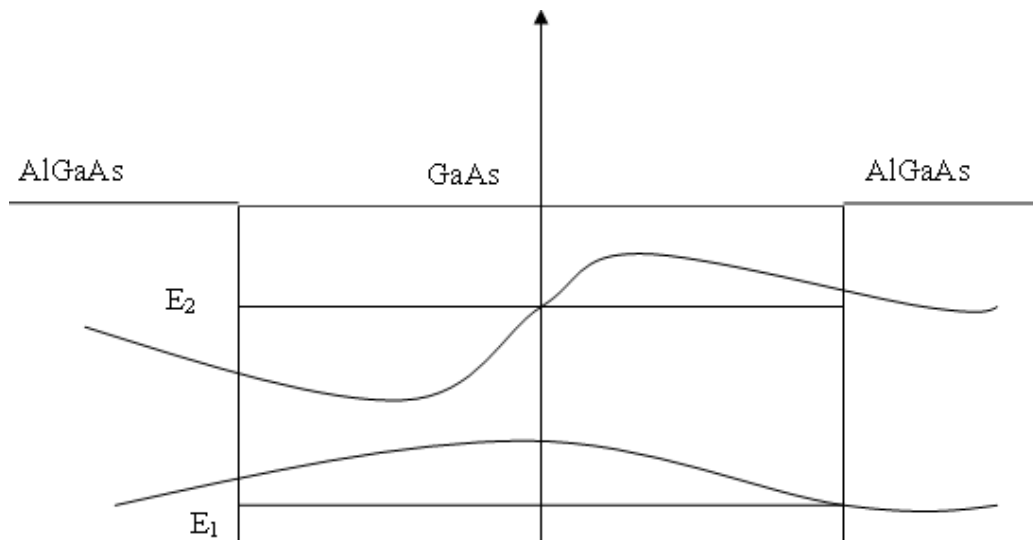


Рисунок 2.3 – Квантова яма, сформована в шарі напівпровідника з вузькою забороненою зоною, укладеному між двома напівпровідниками, які володіють більше широкою забороненою зоною

Технологи розробили кілька способів одержання квантових точок і ниток. Ці структури можна сформувати, наприклад, на границі роздягнула два напівпровідника, де перебуває двовимірний електронний газ. Це можна зробити, якщо нанести додаткові бар'єри, які обмежують рух електронів ще в одному або двох напрямках. Квантові нитки формуються в нижній точці V-образної лунки, утвореної на напівпровідниковій основі. Якщо в підставу цієї

¹⁾ [47] Gershenfeld N.A., Chuang I.L. Bulk spin resonance quantum computation / Science, 1997. V. 275. P. 350-356.

канавки осадити напівпровідник з меншою шириною забороненої зони, тоді електрони цього напівпровідника будуть замкнені у двох напрямках.

На (рис. 2.4) показано квантові точки, створені на границі розглянутого арсеніду галію й арсеніду алюмінію-галію. В процесі росту в напівпровідника AlGaAs були введені додаткові домішкові атоми. Електрони з цих атомів ідуть до напівпровідника GaAs, тобто в область з меншою енергією. Але вони не можуть піти занадто далеко, тому що притягаються до покинутих ними атомами домішки, які отримали позитивний заряд [48]¹⁾. Практично всі електрони зосереджуються в самій гетерограниці з боку GaAs і утворюють двовимірний газ. Процес формування квантових точок починається з нанесення на поверхню AlGaAs ряду масок, кожна з яких має форму кола. Після цього утворюється глибоке травлення, при якому віддаляється весь шар AlGaAs і частково шар GaAs (це видно на рис. 2.4). В результаті електрони виявляються замкненими в циліндрах, які утворилися (рис. 2.4 область, де перебувають електрони). Діаметри циліндрів мають порядок 500нм.

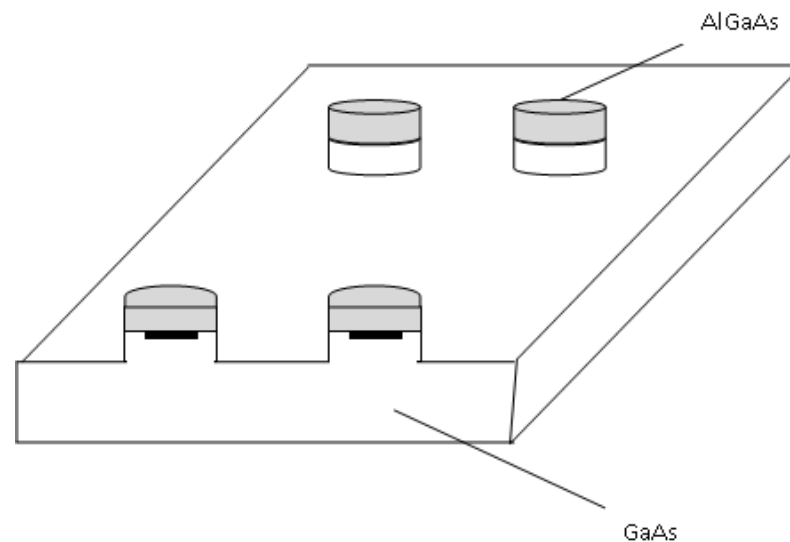


Рисунок 2.4 – Квантові точки, сформовані у двовимірному електронному газі на границі двох напівпровідників

¹⁾ [48] Cirac J.I., Zoller P. Quantum Computations with Cold Trapped Ions / Phys. Rev. Lett. 1995. №20. P. 4091 ^094.

У квантовій точці рух обмежений у трьох напрямках і енергетичний спектр повністю дискретний, як в атомі. Тому квантові точки називають ще штучними атомами, хоча кожна така точка складається з тисяч або навіть сотень тисяч справжніх атомів. Розміри квантових точок (можна говорити також про квантові ящики) порядку декількох нанометрів. Подібно справжньому атому, квантова точка може містити один або кілька вільних електронів. Якщо один електрон, тоді це як би штучний атом водню, якщо два – атоми гелію і так далі.

Крім простого нанесення рисунка на поверхню напівпровідника і травлення для створення квантових точок можна використовувати природну властивість матеріалу утворювати маленькі острівці в процесі росту. Такі острівці можуть, наприклад, мимовільно утворитися на поверхні зростаючого кристалічного шару. Існують і інші технології готування квантових ям, ниток і точок, які на перший погляд здаються дуже простими. Не потрібно, однак, забувати, що мова йде про незвичайні масштаби – всі розміри, які фігурують тут, значно менше довжини світлової хвилі.

2.2. Технічна реалізації квантових розрахунків

Для реалізації квантових розрахунків необхідно вирішити декілька важливих практичних завдань. Перш за все потрібно ізолювати квантову систему від довкілля на якийсь час, достатнє для виконання розрахунку. Навіть невелика взаємодія з зовнішнім середовищем може привести до пошкодження кубітів (проблема декогерентності). Квантовий комп'ютер може бути реалізований відразу на декількох варіантах елементної бази. В даний час це є одним з основних перешкод в побудові квантових комп'ютерів. Виключно чутливі до подібних процесів зчеплені стани кубітів, оскільки одна-єдина дія на будь-якій з них зможе зруйнувати весь стан [49]¹⁾.

¹⁾ [49] Kane В.Е. A silicon based nuclear spin quantum computer / Nature. № 395. 1998. 14 May.

Не дивлячись на те, що квантова система має бути ізольована від довкілля, необхідно мати можливість взаємодіяти з системою, щоб переводити її в потрібне квантовий стан. Крім того, необхідно розробити механізми для реалізації квантових логічних операцій, а також методи, які дозволяють визначати стан квантової системи після закінчення обчислень. Всі ці проблеми вирішуються в рамках експериментів, що проводяться у всьому світі. Одним з напрямів досліджень є вживання для організації квантових регістрів іонних пасток, керованих лазерним спалахом.

Кожен іон є кубіт. Основне і збуджений стан іона відповідають значенням 0 і 1. Інша можливість – використовувати кремнієвий кристал точковий впровадженими атомами, спини яких є кубіти квантового комп'ютера. У такому кристалі не буде електричного струму: взаємодіючи один з одним, атоми передаватимуть повідомлення від одного до іншого відповідно до законів квантової логіки. Найбільш перспективним вважається використання ядерного магнітного резонансу (ЯМР) в рідині, що містить велику кількість однотипних молекул.

Кубіти кодуються за допомогою спину ядра кожного атома молекули. Завдяки природній ізоляції від довкілля, ядерні спини є особливо хорошими кубітами. В даний час є експериментальні реалізації квантових алгоритмів за допомогою ЯМР. Зокрема, здійснена найпростіша версія квантового алгоритму Дейча-Джозеса, який визначає, чи є деяка невідома функція збалансованою [50]¹⁾.

Для квантового комп'ютера збільшення числа не створює таких проблем, оскільки додаткові розряди уповільнюють його роботу на фіксований час. У медицині створена програма Квантова терапія: Квантова терапія призначена для складання індивідуального рецепту терапії конкретному пацієнтові з врахуванням всіх особливостей стану здоров'я на поточний період.

¹⁾ [50] Loss D., Vincenzo D.P. Quatum Computation with Quantum Dots /Phys. Rev. 1998. № 1. P. 120–126.

2.3. Використання квантових структур у електроніці

Фізики завжди думають про те, як використовувати нові ідеї і явища в техніку. Навчившись створювати зроблені напівпровідникові структури – квантові ями й бар'єри, у яких рух електронів підкоряється законам квантової механіки, – вони відразу ж приступили до розробки нових електронних приладів. І хоча ці квантові прилади ще не замінили звичайні діоди, транзистори, їхні потенційні можливості оцінюються дуже високо. Розглянемо принцип дії двох основних приладів сучасної квантової електроніки.

Квантова механіка пророкує зовсім несподіване поведіння часток, що налітають на потенційні бар'єри. Якщо повна енергія частки менше потенційної енергії в області бар'єра, тоді ця частка відбивається і потім рухається у зворотньому напрямку. У тому випадку, коли повна енергія перевищує потенційну, бар'єр буде переборений. Квантова частка поводить інакше: вона переборює бар'єр подібно хвилі. Навіть якщо повна енергія менше потенційної, ймовірність перебороти бар'єр [51]¹⁾. Це квантове явище одержало назву "тунельний ефект". Воно використовується в резонансному тунельному діоді. Енергетична схема цього приладу показана на (рис. 2.5).

Він складається з двох бар'єрів, розділених областю з малою потенційною енергією. Область між бар'єрами – це як би потенційна яма, в якій є один або кілька дискретних рівнів. Характерна ширина бар'єрів і відстань між ними становлять кілька нанометрів. Області ліворуч і праворуч від подвійного бар'єра відіграють роль резервуарів електронів провідності, до яких примикають контакти.

Електрони займають тут досить вузький енергетичний інтервал. У приладі використовується наступна особливість подвійного бар'єра: його прозорість має яскраво виражений резонансний характер, припустимо, що прозорість кожного бар'єра мала.

¹⁾ [51] Cirac J.I. et al. Quantum state transfer and entanglement distribution among distant nodes of a quantum network / Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. P. 3221.

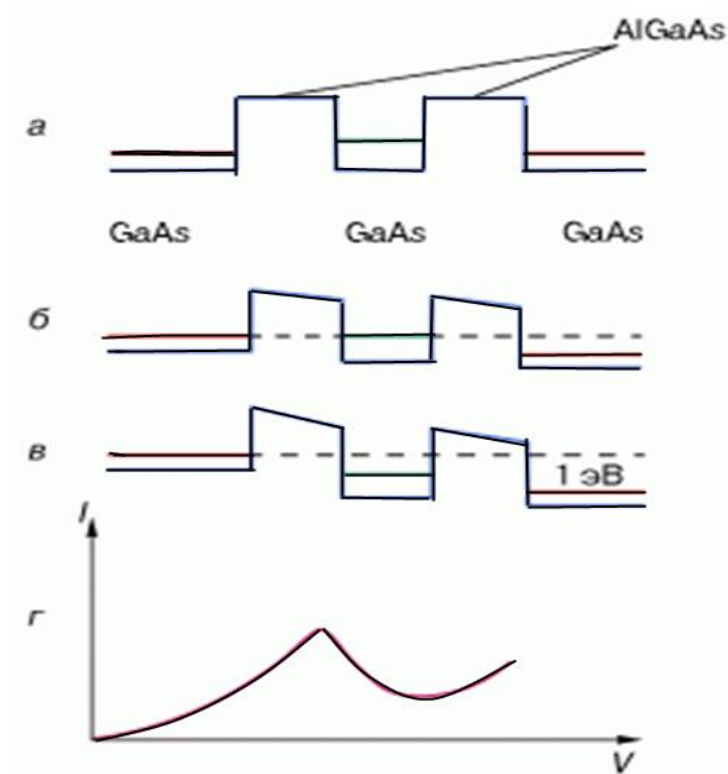


Рисунок 2.5 – Схема роботи і вольт-амперна характеристика резонансного тунельного діода: а – різниця потенціалів дорівнює нулю; б – на прилад подане резонансна напруга, при якому струм максимальний; в – напругу більш резонансна; г – вольт-амперна характеристика. Показаний енергетичний рівень в області між двома бар'єрами (AlGaAs), рівні електронів в області контактів (до першого імпульсу та після останнього)

Однак, не означає, що одночасно буде мала ймовірність тунелювання через подвійний бар'єр. Виявляється, що в тому випадку, коли енергія електронів, які налітають на бар'єри, дорівнює енергії дискретного рівня, тунельна прозорість різко зростає. Механізм резонансного тунелювання такий: електрон, що проникнув в область між бар'єрами, надовго затримується там, в результаті багаторазового відбиття від лівого й правого бар'єрів істотно зростає ймовірність тунелювання. Одночасно можна сказати, що при резонансі через інтерференції хвиль у внутрішній області гаситься хвиля, яка відбивається від подвійного бар'єра. Отже, хвиля, яка впала ліворуч, повністю проходить праворуч.

Подивимося тепер, як працює резонансний діод. Струм, який протікає через подвійний бар'єр, залежить від величини прикладеної напруги. Помітимо, що потенціал в нашому приладі падає головним чином в область подвійного бар'єра, тому що області ліворуч і праворуч від нього мають високу провідність. Якщо прикладена напруга мала та енергія електронів, які налітають на бар'єр ліворуч, менше енергії дискретного рівня, тоді прозорість бар'єра, яка протікає через струм буде мала. Струм досягає максимального значення при таких напругах, коли енергія електронів дорівнює енергії дискретного рівня (рис. 2.5, б). При більш високих напругах енергія електронів, які налітають, стане більше енергії дискретного рівня та тунельна прозорість бар'єра зменшиться (рис. 2.5, в). При цьому струм також зменшиться. Вольт-амперная характеристика резонансного тунельного діода показана на (рис. 2.5, г). Ми бачимо, що на вольт-амперній характеристиці є максимум (якщо в області між бар'єрами не один, а кілька дискретних рівнів, тоді і максимумів буде менше). Праворуч від максимуму крива $I(V)$ має падаючу ділянку, де струм убуває з ростом напруги. Можна ще сказати, що на вольт-амперній характеристиці є ділянка негативного дифференціального опору. Завдяки цьому в електронних схемах резонансний діод може використовуватися не тільки як випрямляч, але й виконувати найрізноманітніші функції. Якщо до центральної області резонансного діода підвести контакт, через який можна управляти положенням дискретного рівня, вийде новий прилад – транзистор. З таких транзисторів, очевидно, і будуть будуватися інтегральні схеми нових поколінь [52]¹⁾.

Резонансний тунельний діод – це перший реальний пристрій з квантовою ямою та бар'єрами. Він був створений Лео Есаки і Чангом в 1974 році. Ідея приладу була запропонована раніше. Це зробив Л. Югансен в 1963 році.

Найбільше успішно квантові структури використовуються для створення лазерів. Вже сьогодні ефективні лазерні пристрої на квантових ямах

¹⁾ [52] Shnirman A., Schon G., Herman Z. Quantum Manipulations of Small Josephson Junctions /Phys. Rev. Lett., 1997. V. 79. P. 2371–2374.

дійшли до ринку та застосовуються у волоконно-оптичних лініях зв'язку. Подивимося, як влаштовані і працюють ці прилади. По-перше, нагадаємо, що для роботи будь-якого лазера необхідно створити інверсну посиленість енергетичних рівнів. Інакше кажучи, на більше високому рівні повинне перебувати більше електронів, чим на низькому, у той час як у стані теплової рівноваги ситуація зворотна. По-друге, кожному лазеру необхідні оптичний резонатор або система дзеркал, що замикає електромагнітне випромінювання в робочому об'ємі. Для того щоб квантову яму перетворити в лазер, потрібно її приєднати до двох контактів, через які електрони можуть безупинно надходити в робочу область. Нехай через один контакт електрони надходять у зону провідності. Далі, роблячи перегони з зони провідності у валентну зону, вони будуть випромінювати кванти, тобто порції електромагнітного випромінювання (рис. 2.6).

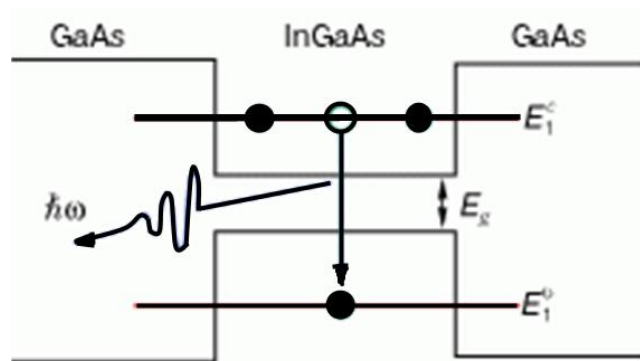


Рисунок 2.6 – Енергетична схема лазера на квантовій ямі

Потім через валентну зону носії токи повинні йти на інший контакт. У квантовій механіці доводиться, що частота випромінювання ω визначається у вигляді

$$\hbar\omega = E_g + E_1^c + E_2^v, \quad (2.5)$$

де E_1^c і E_2^v – енергії перших енергетичних рівнів відповідно в зоні провідності й валентній зоні,

E_g – ширина забороненої зони.

Електромагнітне випромінювання, генеруєме лазером, потрібно сконцентрувати в центральній, робочій області приладу. Для цього показник переломлення внутрішніх шарів повинен бути більше, ніж зовнішніх. Можна ще сказати, що внутрішня область відіграє роль хвилеводу. На межах цього хвилеводу нанесені дзеркала, які утворять резонатор [53]¹⁾.

Лазери на квантових ямах мають переваги в порівнянні з звичайними напівпровідниковими лазерами. Дуже важливо, що ці прилади можна перебудовувати, управляючи параметрами енергетичного спектра. Так, при зменшенні розмірів ями мінімальні енергії електронів λ у зоні провідності й λ у валентній зоні збільшуються, відповідно до формул (2.4) і (2.5), частота, яка генерує лазером, зростає. Підбираючи товщину квантової ями, можна домогтися, щоб загасання хвилі в оптичній лінії зв'язку, у яку надходить випромінювання, було мінімальним. Крім того, у двовимірному електронному газі легше створити інверсну населеність. Тому лазери на квантових структурах дуже ощадливі, вони живляться меншим струмом, ніж інші напівпровідникові лазери, і дають більше світла на одиницю споживаної енергії – до 60% електричної потужності перетвориться у світло. Останнім часом у багатьох лабораторіях миру ведуться роботи з створення лазерів на квантових точках.

¹⁾ [53] Shnirman A., Schon G., Herman Z. Quantum Manipulations of Small Josephson Junctions /Phys. Rev. Lett., 1997. V. 79. P. 2371–2374.

3 СТРУКТУРА КВАНТОВОГО КОМП'ЮТЕРА, НАНОТЕХНОЛОГІЇ, НАНОМЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ

3.1. Структура квантового комп'ютера й регістра

Розглянуте нами перетворення стану суперпозиції квантової системи, що складається з L кубітів, по суті, являє собою модель квантового комп'ютера. Розглянемо, більш простий приклад реалізації квантових обчислень. Допустимо, є система з L кубітів, кожний з яких ідеально ізольований від зовнішнього світу. У кожний момент часу ми можемо вибрати довільні два кубіта та подіяти на них унітарною матрицею розміром 4×4 . Послідовність таких впливів – це свого роду програма для квантового комп'ютера. Щоб використовувати квантову схему для обчислення, потрібно вміти вводити вхідні дані, виконувати обчислення і зчитувати результат. Тому принципова схема (рис 3.1) будь-якого квантового комп'ютера повинна включати наступні функціональні блоки: квантовий регістр для введення даних, квантовий процесор для перетворення даних і пристрій для зчитування даних.

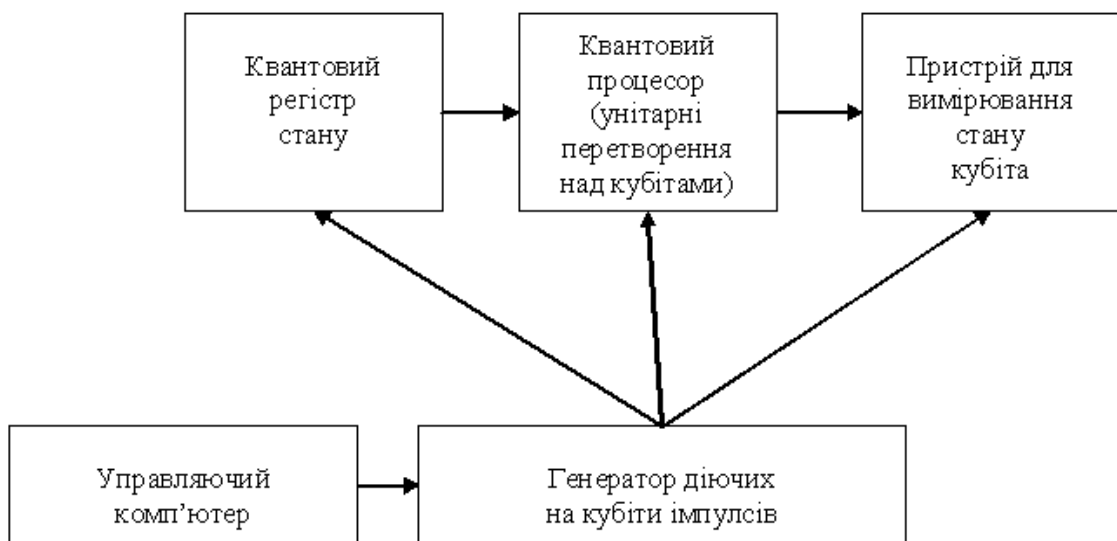


Рисунок 3.1 – Схематична структура квантового комп'ютера

Квантовий реєстр являє собою сукупність деякого числа L кубітів. До введення інформації в комп'ютер всі кубіти квантового реєстра повинні бути наведені в базисні стани $|0\rangle$. Ця операція називається підготовкою, або ініціалізацією [54]¹⁾. Далі певні кубіти (не всі) піддаються селективному зовнішньому впливу (наприклад, за допомогою імпульсів зовнішнього електромагнітного поля, керованих класичним комп'ютером), що змінює значення кубітів, тобто з стану $|0\rangle$ вони переходять у стан $|1\rangle$. При цьому стан усього квантового реєстра перейде в суперпозицію базисних станів $|n\rangle$, тобто стан квантового реєстра в початковий момент часу буде визначатися функцією:

$$|\psi(0)\rangle = \sum_{n=0}^{2^n-1} c_n |n\rangle \quad (3.1)$$

Зрозуміло, що даний стан суперпозиції можна використовувати для бінарного (двійкового) подання числа n .

У квантовому процесорі введені дані піддаються послідовності квантових логічних операцій, які з математичної точки зору описуються унітарним перетворенням λ , яке діє на стан всього реєстра. В результаті через деяку кількість тактів роботи квантового процесора вихідний квантовий стан системи стає новою суперпозицією та набуває вигляду:

$$|\psi(t)\rangle = \sum_{nm=0}^{2^n-1} c_n \hat{U}_{mn} |n\rangle \quad (3.2)$$

Говорячи про квантовий процесор, потрібно зробити одне важливе зауваження [55]²⁾. Виявляється, для побудови будь-якого обчислення досить всього двох базових логічних булевих операцій. За допомогою базових квантових операцій можна імітувати роботу звичайних логічних елементів, з яких

¹⁾ [54] Ioffe L.B. et al. Quest SDS Josephson Junctions for Quantum Computing / cond-mat/9809116, v. 2, Jan. 1999.

²⁾ [55] Adami C., Cerf N.J. Quantum Computation with Linear Optics / quant-ph/9806048, 14 June 1998.

зроблені комп'ютери. Оскільки закони квантової фізики на мікроскопічному рівні є лінійні і оборотними, тоді і відповідні квантові логічні пристрої, які утворюють операції з квантовими станами окремих кубітів (квантові вентиля), виявляються логічно та термодинамічно оборотними. Квантові вентиля аналогічні відповідним оборотним класичним вентилям, але, на відміну від них, здатні робити унітарні операції над суперпозиціями станів. Виконання унітарних логічних операцій над кубітами передбачається здійснювати за допомогою відповідних зовнішніх впливів, якими управляють класичні комп'ютери.

Після реалізації перетворень у квантовому комп'ютері нова функція суперпозиції являє собою результат обчислень у квантовому процесорі. У підсумку утвориться послідовність нулів і одиниць, причому, у силу ймовірного характеру вимірювань, вона може бути. Таким чином, квантовий комп'ютер може з деякою ймовірністю дати будь-яку відповідь. При цьому квантова схема обчислень вважається правильною, якщо правильна відповідь виходить з ймовірністю, досить близької до одиниці. Повторивши обчислення кілька разів і обравши ту відповідь, якою зустрічається найбільш часто, можна знизити ймовірність помилки до якої завгодно малої величини [56]¹⁾.

Для того щоб зрозуміти, чим розрізняються в роботі класичний і квантовий комп'ютери, давайте згадаємо, що класичний комп'ютер зберігає в пам'яті L біт, які за кожний такт роботи процесора піддаються зміні. У квантовому комп'ютері в пам'яті (регістр стану) зберігаються значення L кубітів, однак квантова система перебуває в стані, яка є суперпозицією всіх базових $2L$ станів, і зміна квантового стану системи, утворена квантовим процесором, стосується всіх $2L$ базових станів одночасно. Відповідно у квантовому комп'ютері обчислювальна потужність досягається за рахунок реалізації паралельних обчислень, причому теоретично квантовий комп'ютер може перетворитися в експонентне число швидше, ніж класична схема.

¹⁾ [56] Chuang I.L. et al. Experimental realization of a Quantum algorithm / Nature, 1998. V. 393. P. 143–146.

Вважається, що для реалізації повномасштабного квантового комп'ютера, який перевершує по продуктивності будь-який класичний комп'ютер, на яких би фізичних принципах він не працював, варто забезпечити виконання наступних основних вимог:

- фізична система, яка представляє собою повномасштабний квантовий комп'ютер, повинна містити досить велике число $L > 10^3$ добре помітних кубітів для виконання відповідних квантових операцій;
- необхідно забезпечити максимальне придушення ефектів руйнування суперпозиції квантових станів, обумовлених взаємодією системи кубітів з навколишнім середовищем, у результаті чого може стати неможливим виконання квантових алгоритмів. Час руйнування суперпозиції квантових станів (час декогерентизації) повинне принайні в 10^4 рази перевищувати час виконання основних квантових операцій (час такту). Для цього система кубітів повинна бути досить слабко пов'язана з оточенням;
- необхідно забезпечити вимірювання з досить високою надійністю стану квантової системи на виході. Вимірювання кінцевого квантового стану є однією з основних проблем квантових обчислень.

3.2 Квантова корекція помилок у квантовому комп'ютері

На самому початку розвитку ідей про квантовий комп'ютер фізики виявили найбілього супротивника цієї машини. Ім'я цього супротивника – декогерентизація. Кубіти комп'ютера не можна повністю ізолювати від зовнішнього миру: кубіти працюють в умовах шумового впливу зовнішнього середовища [57]¹⁾. Флуктуації напруги на електродах, шумові струми, неточності виконання самих імпульсних впливів на кубіти в ході обчислювального процесу – все це вносить неконтрольовані помилки у фази і амплітуди станів

¹⁾ [57] Jones J.A., Mosca M., Haasen R.S. Implementation of a Quantum search algorithm on a quantum computer / Nature, 1998. V. 393. P. 344-346.

кубітів в ході обчислювального процесу. Після закінчення часу, рівному часі декогерентизації квантових станів системи кубітів, контрольований обчислювальний процес припиниться, еволюція квантового комп'ютера набуде випадковий (дифузійний) характер. Час декогерентизації, як правило, буде менше часу, необхідного для виконання складного алгоритму, який складається з великого числа (10^9) вентилів.

Вихід з цієї ситуації був знайдений у застосуванні методів квантової корекції помилок [58]¹⁾. Методи корекції помилок добре відомі з теорії звичайних (класичних) комп'ютерів. Зміст їх у тому, що логічні $|0\rangle$ і $|1\rangle$ кодуються більшим числом бітів, аналіз кодових комбінацій дозволяє знайти і видалити помилку. Ці методи вдалося розробити у квантовому варіанті, де помилки можуть бути фазовими і амплітудними. З'ясувалося, якщо ймовірність помилки при виконанні однієї елементарної операції нижче деякого граничного рівня, обчислювальний процес можна ділити як завгодно. Це означає, що операції квантової корекції помилок видаляють з комп'ютера більше помилок, ніж вносять. Цей висновок дуже важливий по суті, він має силу теореми існування повномасштабного квантового комп'ютера.

3.3. Нанотехнології, нанометрологія, стандартизація

Нанотехнології у своєму розвитку поставили ряд завдань, обумовлених малими розмірами елементів і структур. Всі країни, які вступили в нанотехнологічний прорив, прекрасно представляють необхідність стрімкого розвитку метрології в цій області, тому що рівень точності і вірогідності вимірювань здатний стимулювати її розвиток, або бути стрімким фактором.

У нанотехнологіях приладо-аналітична і технологічна складові працюють на межі можливостей, що збільшує ймовірність помилки, особливо пов'язаної з людським фактором.

¹⁾ [58] Cory D.G. et al. Experimental Quantum Error Correction /quant-ph/9802018 6 Feb. 1998.

У цьому зв'язку однією з першочергових завдань стає стандартизація параметрів і властивостей матеріалів, об'єктів, елементів і структур нанотехнологій. При міжгалузевому і міждисциплінарному характері нанотехнологій рішення цього завдання несе в собі об'єднуючий початок. До неї впритул примикає необхідність стандартизації термінів і визначень, спрямованої на рішення проблем спілкування і взаєморозуміння не лише в середині однієї країни, але в рамках обміну інформацією між країнами. Звідси закономірний наслідок – необхідність атестованих і стандартизованих методик вимірювань, калібрування і перевірки засобів вимірювань, які застосовуються в нанотехнологіях, і багато чого іншого, що визначається потребами розвитку інфраструктури наноіндустрії [59]¹⁾.

Особливий аспект стандартизації – рішення завдань забезпечення здоров'я і безпеки осіб, взаємодіючих з продукцією нанотехнологій на всіх етапах її виробництва, досліджень і застосувань, а також екологічної безпеки навколишнього середовища [60]²⁾.

"Найбільша статистична вага" доводиться на метрологію, оскільки саме вона є кількісним базисом стандартизації і сертифікації. Специфіка нанотехнологій привела до розвитку нового напрямку – нанометрології, з якою зв'язані теоретичні і практичні аспекти метрологічного забезпечення єдності вимірювань. З визначення нанотехнології потрібна першочерговість вимірювання геометричних параметрів об'єкта, яка спричиняється необхідністю забезпечення єдності лінійних вимірювань в нанометровому діапазоні. Нанометрологія є у неявному вигляді в переважній більшості методів і засобів забезпечення єдності вимірювань фізико-хімічних параметрів і властивостей об'єктів нанотехнологій, причому часто необхідно прецизійне позиціонування зонда вимірювального пристрою в місце необхідного знімання інформації. Діапазон лінійного сканування по кожній координаті може

¹⁾ [59] Hughes R.J. et al. The Los Alamos Trapped Ion Quantum Computer Experiment / Fortschr. Phys. 1998. № 4-5. P. 329-361.

²⁾ [60] Wineland D.J. et al. Experimental issues in coherent quantum-state manipulation of trapped ions / J. Res. Natl. Inst. Stand. Tech. 1998, № 103. P. 259.

простиратися від одиниць нанометра до сотень і більше мікрометрів, а необхідна точність виставлення координати становити десяті частки нанометра.

Настільки велика увага в нанометрології приділяють проблемі реалізації лінійної шкали в нанометровому і прилягаючому до нього діапазонах по наступних причинах:

- забезпечення єдності вимірювання геометричних параметрів наоб'єкта опирається на метрологію лінійних вимірювань;
- вимірювання механічних, електричних, магнітних, оптичних і інших властивостей об'єктів нанотехнології пов'язані з необхідністю позиціонування зонда вимірювального пристрою в задане місце з найвищою точністю.

Забезпечення єдності вимірювань фізико-хімічних параметрів і властивостей об'єкта вимагає прив'язки засобу вимірювань до еталона, що відтворює одиницю даної фізичної величини (наприклад, провідності – до еталонного опору), а в нанотехнологіях у більшості випадків – ще й до базисного еталона одиниці довжини. Цим не обмежується унікальність базисного еталона (рис.3.2). Видно, що діапазон вимірюванню довжини від одиниць нанометрів до сотень мікрометрів перекриває більше п'яти порядків значень вимірюваної величини при точності у всьому діапазоні в десяті одиниці нанометра.

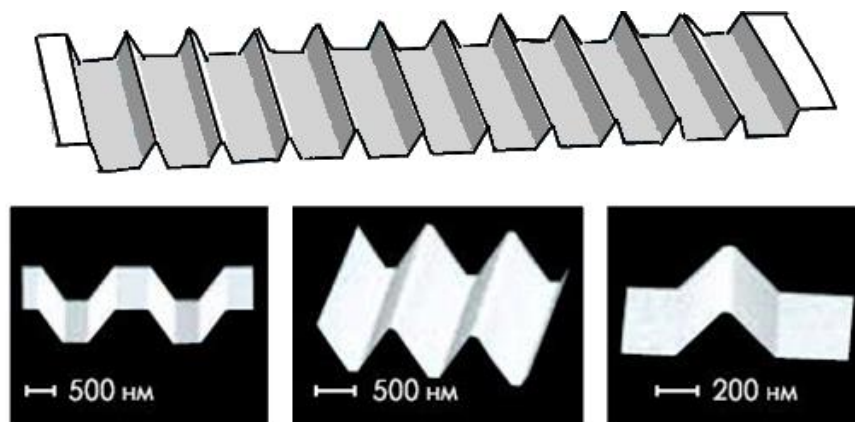


Рисунок 3.2 – Зображення еталона порівняння в атомно-силовому мікроскопі

Спектр об'єктів наноіндустрії простирається від ультрадисперсних середовищ до наноструктурованих багат шарових матеріалів і кристалів, включаючи квантоворозмірні структури з розмірностями локалізації: один – "квантові ями", два – "квантові дроти" або нитки, три – "квантові точки". Особливості фізичних ефектів і процесів, які протікають, визначаються характерним розміром, причому в тому самому матеріалі різні ефекти, пов'язані з розміром, проявляються по-різному [61]¹⁾.

Більшість методів досліджень нанооб'єктів – прозора, растрова електронна, сканувально зондова, іонно-польова мікроскопічна, фотоемісійна і рентгенівсько спектрометрійна, рентгенівсько дифрактометрійна – вимагають калібрування засобів вимірювання по стандартних зразках сполуки, структури, властивостей з відомими геометричними характеристиками.

Один з способів визначення розмірів ультрадисперсних часток полягає у вивченні розсіювання світла на них, що залежить від співвідношення розмірів часток, довжини хвилі падаючого випромінювання та поляризації. Для цього, як правило, використовується лазерне випромінювання, але для калібрування такого способу вимірювання необхідний набір ультрадисперсних часток з дискретним рядом точно заданих розмірів [62]²⁾.

При контролі процесів створення багат шарових тонкоплівкових структур, у тому числі гетероструктур, необхідне залучення рентгенодіагностичних методів контролю схованих шарів і, відповідно, наявність для калібрування багат шарових стандартних зразків сполуки й структури. Прямі вимірювання фізико-хімічних параметрів речовин і матеріалів нанотехнології, елементів і пристроїв нанотехніки вимагають розуміння закономірностей взаємодії зонда вимірювального засобу з об'єктом. Особливу важливість здобувають питання стандартизації таких вимірів, метрологічного

¹⁾ [61] Steane A. Multiple particle interference and quantum error correction / Proc. Roy. Soc. London, 1996. P. 2551–2577.

²⁾ [62] Titlel W., Rihordy G., Gisin N. Quantum cryptography / Physics World. 1998. March. P. 41-45.

забезпечення, передачі розміру одиниці фізичної величини в нанометровий діапазон.

Першорядним завданням стрімкого розвитку нанометрології фахівці вважають необхідність реалізації наношкали в нанометровому і прилягаючому до нього діапазонах. Досягнення граничних можливостей при вимірюваннях довжини в нанометровому діапазоні пов'язане з використанням високодозволяючих методів растрової електронної і скануючої зондової мікроскопії (РЕМ і СЗМ) у сполученні з лазерною інтерферометрією і рентгівівської дифрактометрією при збереженні абсолютної прив'язки до первинного еталона метра (рис. 3.3).

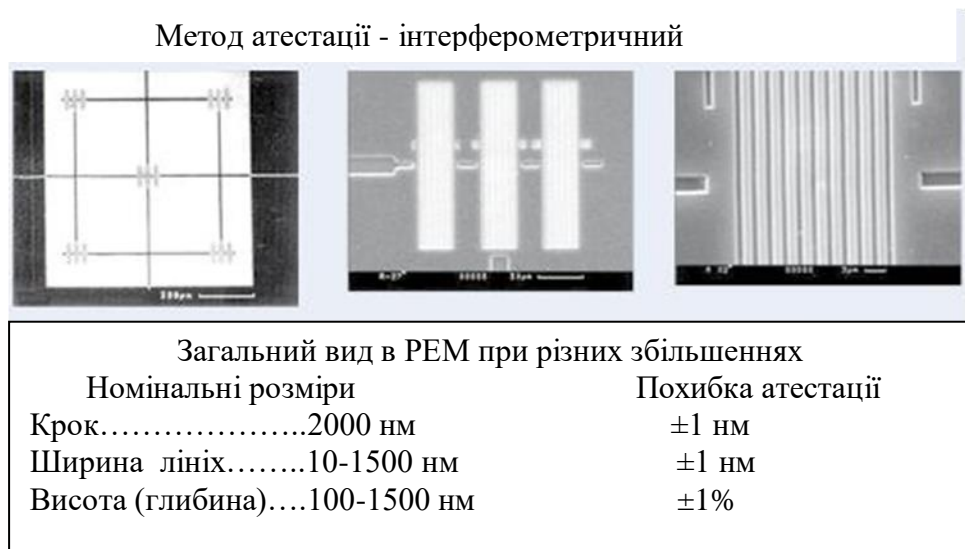


Рисунок 3.3 – Еталон порівняння – лінійна міра

У Росії концептуально вирішене завдання створення основ метрологічного забезпечення вимірювання довжини в діапазоні від 1 нм до 1000 нм. Розроблена методологія забезпечення єдності вимірювань у цьому діапазоні довжин, заснована на перерахованих вище принципах: еталонний комплекс засобів вимірювань, що забезпечує відтворення та передачу розміру одиниці довжини речовинним мірам довжини в зазначеному діапазоні з погрешністю 0,5 нм; покоління мір малої довжини для калібрування засобів вимірювань у досліджуваному діапазоні, у тому числі міри нанорельєфа поверхні; мето-

дологія та алгоритми вимірювання параметрів профілю елементів мікро- і наноструктур і пакет комп'ютерних програм для автоматизації вимірювань.

Найважливішим етапом у рішенні завдань метрологічного забезпечення лінійних вимірювань у нанометровому діапазоні з'явилося створення речовинних носіїв розміру мір з програмуванням нанорельєфом поверхні, що забезпечують калібрування засобів вимірювань з найвищою точністю (рис.3.4).

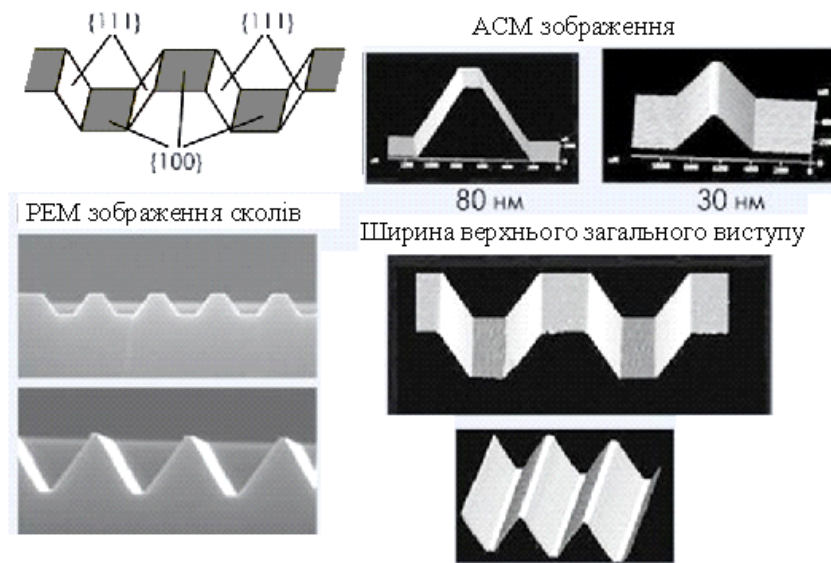


Рисунок 3.4 – Профіль еталона порівняння

Саме такі тривимірні міри малої довжини, або еталони порівняння, – матеріальні носії розміру, які дозволяють здійснювати комплексне калібрування і контроль основних параметрів РЕМ і СЗМ, призначені для їхнього перекладу з розряду пристроїв для візуалізації досліджуваного об'єкта в розряд приладів для вимірювань лінійних розмірів об'єктів дослідження, які забезпечують прив'язку вимірюваних величин у нанометровій області до первинного еталона одиниці довжини – метру.

Атестація еталонів порівняння здійснюється з використанням тривимірної інтерферометричної системи вимірювань нанопереміщень.

Атестуються як крок міри та розміри верхніх і нижніх підстав виступів і канавок (ширина лінії), а також висота (глибина) рельєфу. При тому самому кроці структури можливе виготовлення еталонів порівняння з шириною ліній у діапазоні від 10 нм до 1500 нм і висотою рельєфу від 100 нм до 1500 нм.

Міра дозволяє по одному її зображенню в РЕМ (навіть по одному сигналу) виконати калібрування мікроскопа (рис. 3.5), визначити його збільшення, лінійність шкал і діаметр електронного зонда. При необхідності можна контролювати параметри РЕМ безпосередньо в процесі вимірювань розмірів досліджуваного об'єкта, який є додатковою гарантією їхньої високої якості. Міра дозволяє легко автоматизувати лінійні вимірювання і створювати на основі РЕМ автоматизовані вимірювальні комплекси. Зокрема створений такий комплекс на основі РЕМ JSM-6460LV для лінійних вимірювань в області розмірів від 1 нм до 100 мкм [63]¹⁾.

Аналогічним чином по заданих параметрах міри проводяться калібрування і контроль таких характеристик атомно-силових мікроскопів (АСМ), як ціна розподілу і лінійності шкал по трьох координатах, ортогональність систем сканування, радіус зонда (кантилевера), налаштування параметрів і вихід у робочий режим.

Системи калібрування і атестації АСМ успішно впроваджуються на підприємствах, які спеціалізуються на створенні встаткування для нанотехнологій.

$$Z_x = \frac{m_x}{m_z} \frac{S_L - S_R}{2H} \quad (3.3)$$

Радіус кантилевера

$$Q(\varphi) = 2 \left(\frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi} \right) = \sqrt{6} - \sqrt{2} = 1,0353 \quad (3.4)$$

¹⁾ [63] ГОСТ 23089.13-86 «Микросхемы интегральные. Методы измерения частоты среза и частоты единичного усиления операционных усилителей»

$$r = \frac{m_x U_p - u_p}{Q(\varphi)} = \frac{m_x B_p - b_p}{Q(\varphi)} = \frac{u_t - m_x U_t}{Q(\varphi)} = \frac{b_t - m_x B_t}{Q(\varphi)} \quad (3.5)$$

Розвиток нанотехнологій посилює вимоги до вимірювальних систем, погрішності вимірювань які повинні бути порівнянні з міжатомними відстанями, що вимагає серйозного відношення до забезпечення єдності лінійних вимірювань у нанометровому діапазоні.

РЕМ і СЗМ лише тоді можуть вважатися засобами вимірювань, коли їхні параметри відповідним чином атестовуються, калібруються і контролюються, причому останнє здійснюється безпосередньо в процесі вимірювань. Тривимірні міри або еталони порівняння - матеріальні носії розміру своєрідний міст між об'єктом вимірювань і еталоном метра та ідеальний засіб для здійснення таких операцій. Культура вимірювання вимагає, щоб будь-який РЕМ або СЗМ був укомплектований мірами, які забезпечують калібрування і контроль їхніх параметрів. Лише тоді утворені вимірювання можуть претендувати на вірогідність [64]¹⁾.

Використання методів і засобів калібрування і атестації дасть можливість виробникам РЕМ і СЗМ створювати нові прилади з кращими характеристиками, які, у свою чергу, дозволять просування на шляху розвитку нанотехнологій.

Для забезпечення нормативної бази нанометрології розроблені та впроваджені сім російських стандартів.

Для єдності вимірювань у нанотехнологіях необхідно здійснити ряд науково-методичних, технічних і організаційних заходів. В першу чергу це стосується створення яке виключає багат шаровість нової структурної схеми передачі розміру одиниць фізичних величин від первинних еталонів робочим засобам вимірювань. У цей комплекс заходів входять також: дослідження механізмів взаємодії зондів вимірювальних систем з об'єктом вимірювання;

¹⁾ [64] ГОСТ 26949-86 «Микросхемы интегральные. Методы измерения электрических параметров непрерывных стабилизаторов напряжения»

нові алгоритми вимірювань і відповідне математичне забезпечення, яке враховує вплив взаємодії засобу вимірювань з вимірюваним об'єктом; створення нових мір – матеріальних носіїв розміру, які володіють властивостями, аналогічними властивостям вторинного еталона і вимірюваного об'єкта; створення стандартних зразків сполуки, структури та рельєфу поверхні й стандартизованих методик вимірювань, які забезпечують спостережливість передачі розміру одиниці фізичної величини від еталона робочим засобам вимірювань для їхньої атестації, калібрування і перевірки в нанометровий діапазон без істотної втрати точності [65]¹⁾.

Досягнення даної мети цілком реально, оскільки фундамент рішення зазначеної проблеми заснований на концепції базисного еталона, у якому реалізована наношкала. Цей еталон – основа для передачі одиниць фізичних величин у нанометровий діапазон. Необхідна гармонізована система стандартних зразків сполуки, структури і властивостей, які служать потребам нанотехнологій. Все це створює передумови та закладає основи прискореного розвитку нанотехнологій.

¹⁾ [65] ГОСТ 28814-90 «Микросхемы интегральные. Методы измерения электрических параметров схем управления импульсными стабилизаторами напряжения»

ВИСНОВКИ

В ході дослідження була підтверджена актуальність роботи. Кількість публікацій по квантовим обчисленням і квантовій теорії передачі інформації в даний час набула лавиноподібного характеру. Це сприяло, з одного боку, глибшому осмисленню фізичних основ самої квантової теорії, її зв'язку з квантовою теорією інформації, а з іншого боку, стимулювало зусилля по реалізації як нового перспективного напрямку в обчислювальній техніці – квантових комп'ютерів, так і абсолютно нових квантових технологій, які створюються на стику, абсолютно різних наук.

Були вирішені важливі завдання, які раніше були не доступні сучасним класичним комп'ютерам і вирішення яких можна було б чекати від квантового комп'ютера, відзначимо завдання тонкого моделювання багато-частинкових квантових систем, до яких можна віднести складні молекули, біологічні об'єкти, а також елементи сучасної наноелектроніки. Це можуть бути і такі квантові системи, де поряд з іншими квантовими властивостями істотну роль відіграє суперпозиція, заплутаність станів, особливості квантової динаміки.

Отже, вже зараз потреба в квантових комп'ютерах існує з появою нових завдань вона, поза сумнівом, зростатиме.

В даній кваліфікаційній магістерській роботі ми намагалися систематично викласти як математичні, так і фізичні основи квантових обчислень і принципів роботи квантових комп'ютерів. Привели необхідні поняття квантової теорії інформації, описали основні квантові логічні операції і квантові алгоритми; обговорили обмеження, які з'являються на шляху до повномасштабних квантових обчислень, і можливі шляхи їх подолання; детально розглянули окремі варіанти вже реалізованих прототипів квантових комп'ютерів і досі нереалізованих пропозицій, а також аналізували їх переваги, недоліки і проблеми реалізації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гавриленко В., Новиков Ю., Озерин Ю., Раков А., Тодуа П. Российский прототип международного тест-объекта нанорельефа для РЭМ и АСМ.– Наноиндустрия, 2008, №6, с. 22–26.
2. Тодуа П.А., Быков В.А., Волк Ч.П., Горнев Е.С., Желкобаев Ж., Зыкин Л.М., Ишанов А.Б., Календин В.В., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Прохоров А.М., Раков А.В., Саунин С.А., Черняков В.Н. Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию. – Микросистемная техника, 2004, № 1, с.38–44; № 2, с. 24–39; № 3, с. 25–32.
3. Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. Metrology in linear measurements of nanoobject elements. – Proceedings of SPIE, 2006, vol.6260, p.626013-1–626013-8.
4. Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Ozerin Yu.V., Rakov A.V., Todua P.A. Silicon test object of linewidth of nanometer range for SEM and AFM. – Proceedings of SPIE, 2007, vol. 6648, p. 66480R-1–66480R-11.
5. Todua P.A., Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V. Check of the quality of fabrication of test objects with a trapezoidal profile. – Proceedings of SPIE, 2008, vol.7042, p. 704209-1–704209-8.
6. Данилова М.А., Митюхляев В.Б., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Раков А.В., Тодуа П.А. Тест-объект с тремя аттестованными размерами ширины линии для растровой электронной микроскопии. – Измерительная техника, 2008, № 9, с. 49–51.
7. Gavrilenko V.P., Filippov M.N., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. Measurements of linear sizes of relief elements in the nanometer range using a scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2007, vol.6648, p. 66480T-1–66480T-12.

8. Novikov Yu.A., Darznek S.A., Filippov M.N., Mityukhlyayev V.B., Rakov A.V., Todua P.A. Nanorelief elements in reference measures for scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7025, p. 702511-1–702511–10.

9. Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V., Todua P.A. Measurements of the parameters of the electron beam of a scanning electron microscopy. – Proceedings of SPIE, 2008, vol.7042, p.70420C-1–70420C-12.

10. Волк Ч.П., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Калибровка растрового электронного микроскопа по двум координатам с использованием одного аттестованного размера. – Измерительная техника, 2008, № 6, с. 18–20.

11. Todua P.A., Filippov M.N., Gavrilenko V.P., Novikov Yu.A., Rakov A.V. Measurement of linear sizes of relief elements in the nanometer range using an atomic force microscopy. – Proceedings of SPIE, 2007, vol. 6648, p. 66480S-1–66480S–12.

12. Novikov Yu.A., Filippov M.N., Lysov I.D., Rakov A.V., Sharonov V.A., Todua P.A. Direct measurement of the linewidth of relief elements of AFM in nanometer range. – Proceedings of SPIE, 2008, vol. 7025, p. 702510-1–702510–10.

13. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Геометрия формирования изображения в сканирующей зондовой микроскопии. – Микроэлектроника, 2008, т. 37, №6, с. 448–469.

14. Раков А.В., Тодуа П.А. Измерение линейности сканирования в атомно-силовом микроскопе. – Измерительная техника, 2008, № 6, с. 12–14.

15. Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Прямое измерение ширины линии на атомно-силовом микроскопе. –Измерительная техника, 2008, № 5, с. 10–12.

16. Гавриленко В.П., Лесновский Е.Н., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А., Филиппов М.Н. Первые российские стандарты в нанотехнологиях. – Известия РАН, сер.физич., 2009, т. 73, №4, с. 454–462.

17. Ландау Д., Лифшиц И. Статистическая физика. Часть 1. Наука, М 1976. 235 с.
18. Леонтович М.А.. Введение в термодинамику. Статистическая физика. Москва, Наука, 1983. – 416с.
19. Кадомцев Б.Б.. Динамика и информация. УФН, 164, №5, 449 (1994). 190 с.
20. Холево А.С. Введение в квантовую теорию информации. Москва, 2002. МЦНМО, 2002. 228 с.
21. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежда и реальность. Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. 315 с.
22. Клышко Д.Н.. Физические основы квантовой электроники. Москва, Наука, 1986. 293с.
23. Бом Д.. Квантовая теория, Москва, "Постмаркет", 2002. 175 с.
24. Клышко Д.Н. Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения. УФН, 168, №9, 975–1016 (1998). 236 с.
25. Клышко Д.Н.. Квантовая оптика: квантовые, классические и метафизические аспекты. УФН, т.164, № 11, 1187–1214 (1994). 212 с.
26. Боумейстер Д., Экерт А., Цайлингер А.. Физика квантовой информации. Москва, "Постмаркет", 2002. 376 с.
27. Горбачев В.Н., Жилиба А.И. Физические основы современных информационных процессов. Ст.-Петербург, Издательство "Петербургский институт печати", 2004. 410 с.
28. Елютин П.В.. Теоретические основы квантовой радиофизики. Изд-во МГУ, 2003.187 с.
29. Cirac J. and Zoller P. Quantum Computations with Cold Trapped Ions. Phys.Rev.Lett. 74, 4091 (2001). – 260 с.
30. Shor P. Introduction to Quantum Algorithms. Quant-ph/000503. – 342 с.
31. Shor P. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on Quantum Computer. Quant-ph/9508027. – 257 с.

32. Feynman R.. Quantum mechanical computers, *Found.Phys.* 16, 507–531(2002). 301 с.
33. Feynman R. Simulating physics with computers, *Internat. J. Theoret. Phys.* 21, 467 – 488 с.
34. Gisin N. Quantum Cryptography. *Quant-ph/0101098*. 620 с.
35. Bennett Ch.H. , *Phys. Rev. Lett.* 68, 3121 (2004).159 с.
36. Wiesner S. , *SIGACT News* 15, 78; original manuscript written circa 2006. 407 с.
37. Vaidman L. and N.Yordan. Methods for reliable teleportation, 2000. 215 с.
38. Bennet Ch. Quantum Information and Computation. *Physics Today*, October 24 (1998). 363 с.
39. Напівпровідникові прилади : Підручник / Л. Д. Васильєва, Б. І. Медведенко, Ю. І. Якименко . – К.: Кондор, 2008. – ISBN 978–966–622–103–9.
40. Терещук Р. М., Терещук К. М., Седов С. А. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства. – К.: Наукова думка, 1988. С. 183 – 191.
41. *Shumacher B.W.* Quantum coding /*Phys. Rev.* 1995. P. 2738-2747.
42. *Feinman R.P.* Quantum Mechanical Computer /*Foundations of Physics*, 1986. № 16(6). P. 507–531.
43. *Shor P.W.* Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring /*Proc. 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (IEEE Press)*, 1994. P. 124–134.
44. *Zalka C.* Simulating quantum systems on a quantum computer//*Proc. Roy. Soc. London.* 1998. P. 313–322.
45. *Ozhigov Y.* Quantum Computer Can Not Speed Up Iterated Applications of a Black Box /*quant/ph/9712051*, 1997.
46. *Cory D.G., Fahmy A.F., Havel T.F.* Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy: an experimentally accessible paradigm for quantum computing // *Proc. of the 4th Workshop on Physics and Computation (Complex Systems*

Institute, Boston, New England), 1996.

47. *Gershenfeld N.A., Chuang I.L.* Bulk spin resonance quantum computation /Science, 1997. V. 275. P. 350-356.
48. *Cirac J.I., Zoller P.* Quantum Computations with Cold Trapped Ions /Phys. Rev. Lett. 1995. №20. P. 4091 ^094.
49. *Kane B.E.* A silicon based nuclear spin quantum computer // Nature. № 395. 1998. 14 May.
50. *Loss D., Vincenzo D.P.* Quantum Computation with Quantum Dots // Phys. Rev. 1998. № 1. P. 120–126.
51. *Cirac J.I. et al.* Quantum state transfer and entanglement distribution among distant nodes of a quantum network /Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. P. 3221.
52. *Shnirman A., Schon G., Herman Z.* Quantum Manipulations of Small Josephson Junctions /Phys. Rev. Lett., 1997. V. 79. P. 2371–2374.
53. *Averin D.V.* Adiabatic Quantum Computation with Cooper pairs // Solid State Commun. 1998. № 105. P. 659–664.
54. *loffe L.B. et al.* Quest SDS Josephson Junctions for Quantum Computing / cond-mat/9809116, v. 2, Jan. 1999.
55. *Adami C., Cerf N.J.* Quantum Computation with Linear Optics // quant-ph/9806048, 14 June 1998.
56. *Chuang I.L. et al.* Experimental realization of a Quantum algorithm / /Nature, 1998. V. 393. P. 143–146.
57. *Jones J.A., Mosca M., Haasen R.S.* Implementation of a Quantum search algorithm on a quantum computer // Nature, 1998. V. 393. P. 344-346.
58. *Cory D.G. et al.* Experimental Quantum Error Correction // quant-ph/9802018 6 Feb. 1998.
59. *Hughes R.J. et al.* The Los Alamos Trapped Ion Quantum Computer Experiment // Fortschr. Phys. 1998. № 4-5. P. 329-361.
60. *Wineland D.J. et al.* Experimental issues in coherent quantum-state manipulation of trapped ions // J. Res. Natl. Inst. Stand. Tech. 1998, № 103. P. 259.

61. *Steane A.* Multiple particle interference and quantum error correction // Proc. Roy. Soc. London, 1996. P. 2551–2577.

62. *Titlel W., Rihordy G., Gisin N.* Quantum cryptography // Physics World. 1998. March. P. 41-45.

63. ГОСТ 23089.13-86 «Микросхемы интегральные. Методы измерения частоты среза и частоты единичного усиления операционных усилителей»

64. ГОСТ 26949-86 «Микросхемы интегральные. Методы измерения электрических параметров непрерывных стабилизаторов напряжения»

65. ГОСТ 28814-90 «Микросхемы интегральные. Методы измерения электрических параметров схем управления импульсными стабилизаторами напряжения»