НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Радіотехнічний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ _____
(підпис) (ініціали, прізвище)
“___”_____20__р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 8.0509203 Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки
(код і назва)

на тему: Наноелектронні пристрої обробки сигналів

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи РІ-31м
(шифр групи)

Хатян Дмитро Володимирович _____
(прізвище, ім'я по батькові) (підпис)

Науковий керівник д.т.н., професор Нелін Е.А. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант Охорона праці к.т.н, доц. Каштанов С.Ф. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2015 року

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

Інститут (факультет) Радіотехнічний факультет
(повна назва)

Кафедра Конструювання та виробництво радіоелектронної апаратури
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 8.05090203 Інтелектуальні технології мікросистемної техніки
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ _____
(підпис) (ініціали, прізвище)
«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Хатяну Дмитру Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Наноелектронні пристрої обробки сигналів,
науковий керівник дисертації Немій Євген Андрійович, професор, д.т.н.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом по університету від «___»_____ 20__ р. №_____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження пристрої на основі штучних вуглеевих структур

4. Предмет дослідження характеристики пристроїв

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1) Аналітичний огляд 2) Моделювання характеристик типового пристрою 3) Проаналізувати характеристики, визначити недоліки та переваги

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу Електронна презентація в обсязі 10 слайдів за матеріалами роботи.

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Каштанов С.Ф. к.т.н, доц.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Підбір науково-технічних джерел. Огляд пристроїв для штуч. вулк. струк.	10.09.13 – 20.12.13	
2	Аналітичний огляд результатів досліджень. Розробка ТЗ	21.12.13 – 03.04.14	
3	Аналіз та моделювання характеристик типового пристрою	05.04.14 – 27.10.14	
4	Отримання та обробка результатів досл.	01.11.14 – 20.02.15	
5	Оформлення пояснювальної записки	22.02.15 – 18.05.15	

Студент _____ (підпис) Д.В. Хатян (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації _____ (підпис) _____ (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

Д. В. Хатян, КВРА 2015

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки становить 100 сторінок, яка включає в себе 4 розділи, 50 ілюстрацій, 2 додатки і 48 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

Розглянуто актуальне питання дослідження пристроїв на основі штучних вуглецевих структур. Мета роботи полягала в дослідженні пристроїв на основі штучних алотропних форм вуглецю: моделювання та аналіз характеристик. Проаналізовано існуючі пристрої обробки сигналів, визначено їх недоліки та переваги. Досліджено формування зонної діаграми напівпровідникових надґрат.

В результаті проведення аналітичного огляду літератури, науково-технічних статей та електронних джерел отримано висновок щодо пристроїв, які працюють на основі штучних алотропних форм вуглецю. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізую математичну модель. Отримано характеристики типових пристроїв та проведено їх аналіз.

Фулерен та пристрої на його основі, вуглецеві нанотрубки та пристрої на їх основі, графен та пристої на його основі, штучні алотропні форми вуглецю, пристрої обробки сигналів, надґрати, імпедасна модель періодичної структури.

Д. В. Хатян, КВРА 2015

ABSTRACT

Volume explanatory note is 100 pages, which includes 4 sections, 50 illustrations, 2 annexes and 48 names on the list of bibliographical references.

Actual research questions of devices based on artificial carbon structures. The purpose of the study was to devices based on synthetic allotropic forms of carbon: modeling and analysis features. The existing signal processing devices, defined their advantages and disadvantages. Investigated the formation of the band diagrams of semiconductor superlattice.

As a result of the analytical literature review, scientific, technical articles and electronic sources received opinion on devices that run on synthetic allotropic forms of carbon. The software that implements a mathematical model. Characteristics of typical devices and conducted their analysis.

Fullerene and devices based on it, carbon nanotubes and devices based on them, and graphene devices, based on artificial allotropic forms of carbon, signal processing devices, superlattice, impedasn model periodic structures.

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи (магістерської дисертації)

на тему: Наноелектронні пристрої обробки сигналів

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Київ — 2015 року

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 9
ВСТУП 10
1 ШТУЧНІ АЛОТРОПНІ ФОРМИ ВУГЛЕЦЮ 13
1.1 Фулерен та пристрої на його основі 13
1.2 Вуглецеві нанотрубки та пристрої на їх основі 16
1.3 Графен та пристої на його основі 23
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 40
2 ПРИСТРОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ 41
2.1 Вертикальний графеновий транзистор 41
2.2 Перемикач на основі вуглецевих нанотрубок 44
2.3 Комп'ютер на вуглецевих нанотрубках 46
2.4 Графеновий біосенсор 51
2.5 Електронні пристрої на основі вуглецевих нанотрубок 58
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 62
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТИПОВОГО ПРИСТРОЮ 63
3.1 Періодичні наноелектронні структури. Надґрати 63
3.2 Імпедасна модель періодичної структури 64
3.3 Тестовий розрахунок 67
3.4 Дослідження формування зонної діаграми напівпровідникових надґрат 68
3.4.1 Імпедансні характеристики необмежених надґрат 68
3.4.2 Імпедасні характеристики обмежених надґрат 69
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 76
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 77
4.1 Визначення основних потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів 77
4.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії 78
4.2.1 Організації робочих місць обладнаних ВДТ ПЕОМ 78
4.2.2 Електробезпека 80

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

4.2.3 Вимоги до приміщень в яких розміщені ЕОМ 82
4.2.4 Відповідність параметрів мікроклімату в робочій зоні санітарним нормам 84
4.2.5 Освітлення робочих місць користувачів ВДТ ЕОМ 87
4.2.5 Заходи щодо нормалізації умов праці 89
4.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях 89
4.4.1 Вимоги до систем оповіщення персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації 90
4.4.2 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС 91
4.4.3 Пожежна безпека 92
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 95
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 96

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВДТ — Відеодисплейний термінал

ВНТ — Вуглецеві нанотрубки

ГТБА — Гідроокис тетрабутиламонію

ДНК — Дезоксирибонуклеїнова кислота

ЕОМ — Електронно-обчислювальна машина

КМОП — Комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник

ЛД — Люмінесцентна лампа

НҐ — Надґрати

НОЦ — Науково-освітній центр

НРВ — Наявність іонізуючого рентгенівське випромінювання

НС — Надзвичайна ситуація

ПБЕ — Правила будови електроустановок

ПЕОМ — Персональна електронно-обчислювальна машина

ПТЕ — Правил технічної експлуатації

ПУЕ — Правил улаштування електроустановок

ТФ — Трансверсальний фільтр

CNFETs — Carbon nanotube field-effect transistors

CVD — Chemical vapor deposition

FETs — Field-effect transistors

HBN — Hexagonal boron nitride

LR — Low radiation

MEMS — Microelectromechanical systems

MIPS — Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages

NI — Non – interlaced

OLEDs — Organic light-emitting diodes

OTFTs — Organic thin film transistors

PMOS — P-type metal-oxide-semiconductor

VLSI — Very-large-scale integration

Д.В.Хатян, КІВРА 2015

ВСТУП

Магістральний напрямок сучасного науково – технічного розвитку пов’язаний з нанодіапазоном. Характерною рисою сучасної науки та технологій є створення нових багатофункціональних наноматеріалів з надзвичайними властивостями. Надмалий розмір частинок, по-перше, стає незалежним фізичним параметром, який визначає суттєву зміну їх індивідуальних властивостей у порівнянні з масивними об’єктами, а по-друге, зумовлює квантові ефекти, в яких наночастинки відіграють ключову роль. Важливою особливістю, що притаманна наноматеріалам, є їх здатність до самоорганізації, зокрема під час створення складних систем. Наноматеріали становлять основу наноелектронних напівпровідникових пристроїв обробки сигналів. Ключову роль в сучасній науці та технологіях відіграють фулерени, нанотрубки, графен та надґрати. Їхні унікальні фізичні властивості відкривають нові можливості для новітніх нанотехнологій, які змінюють сучасний світ. Все це обумовлює високу актуальність досліджень цього циклу робіт.

Дисертація складається з трьох розділів. В першому розділі представлено журнальні і оглядові статті по пристроям на основі штучних алотропних форм вуглецю, експерименти та властивості наноматеріалів. Розглянуто фулерен та пристрої на його основі: проведено моделювання одного або декількох протонів, розглянуто дослід створення квантової точки на основі молекул фулерена.

Розглянуто вуглецеві нанотрубки та пристрої на їх основі: перший по Тьюрингу комп'ютер на вуглецевих нанотрубках, прототип мікроелектронного логічного пристрою з рекордно низьким рівнем енергоспоживання, використання напівпровідникових вуглецевих нанотрубок, суперконденсатори з гетерогенних плівок, тонкі транзистори, дисплеї великої площи, сонячні батареї, органічні світловипромінюючі діоди і датчики.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Розглянуто графен та пристої на його основі: лист графена шириною 23 см і довжиною 100 метрів, графенові нанострічки, функціональний радіочіп, «вертикальний» графеновий транзистор.

У другому розділі розглянуто пристрої обробки сигналів. Один з таких пристроїв є вертикальний графеновий транзистор. Саме використання графена має величезний потенціал для того, щоб замінити кремнієві технології. Вони здатні працювати на дуже високих частотах і вигідно відрізняються тим, що їх поперечні розміри можна знизити до ~ 10 нм. Також відносять перемикач на основі вуглецевих нанотрубок. Використання вуглецевих нанотрубок в конструкції логічного перемикача дозволило довести необхідну для роботи пристрою потужність до декількох десятих часток нВт. Наступним пристроєм є комп'ютер на вуглецевих нанотрубках — прототип першого повного по Тьюрингу комп'ютера. Створення прототипу стало можливим завдяки одночасному використанню двох підходів: розробці нової технології орієнтування нанотрубок на підкладці і сильному спрощенню логічної архітектури пристрою. Іншим пристроєм є графеновий біосенсор. Вчені виявили, що графен захищає ДНК від руйнування ферментами, подібними до тих, які знаходяться в біологічних рідинах організму — особливість, яка робить ДНК-графенові біосенсори дуже довговічними. ДНК-графеновий біосенсор визначає хвороби.

В третьому розділі розглянуто моделювання типового пристрою. А саме Надґрати (НҐ) — періодично – шаруваті структури, які складаються з шарів напівпровідників. Ці структури становлять основу наноелектронних напівпровідникових пристроїв обробки сигналів. Особливості проектування наноелектронних пристроїв пов'язані з аналізом і синтезом НҐ з складним потенціалом і заданими характеристиками. НҐ застосовують в лазерах (як активну область), оптичних перемикачах, резонансних тунельних транзисторах та інших приладах. Розглянута імпедасна модель періодичної структури та зроблено тестовий розрахунок. Також проведено дослідження формування зонної діаграми напівпровідникових надґрат.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Основні результати дослідження викладені в статті “Формування зонної діаграми напівпровідникових надґрат” та передані для публікації у Вісник НТУУ “КПІ”.

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

1 ШТУЧНІ АЛОТРОПНІ ФОРМИ ВУГЛЕЦЮ

1.1 Фулерен та пристрої на його основі

Фулерен — одна з кількох алотропних модифікацій карбону. Найвідоміший фулерен — молекула C_{60}, яка має ідеальну форму футбольного м'яча.

Термін "Фулерен" застосовують до широкого класу сполук із мінімально можливою будовою у 60 атомів вуглецю, що поєднані ковалентним зв'язком у сферичну молекулу, де кожен атом вуглецю поєднаний із трьома іншими, утворюючи п'ятикутники та шестикутники на поверхнях. Найбільша молекула фулерену складається із 560 атомів вуглецю. Найбільш вивченою молекулою фулерену є молекула C_{60}. C_{60} найменший фулерен, що відповідає правилу ізольованого пентагону і тому він є найменшим стійким фулереном. Вміст C_{60} найвищий у зазвичай експериментально отримуваній суміші фулеренів, хоча C_{60} термодинамічно є найменш стабільним серед стійких фулеренів.

Для перевірки гіпотези колективом науково-освітнього центру» були виконані складні розрахунки [1]. Як і в історії з відкриттям фулерену, в нашому дослідженні комп'ютерне моделювання передувало експериментам. Моделювання можливості проникнення протона в фулерен і розподілу заряду в такій системі вироблялося на основі теорії функціонала щільності. Це широко використовуваний інструмент квантово-хімічних розрахунків, що дозволяє обчислювати властивості молекул з високою точністю.

При моделюванні одного або декількох протонів, які поміщали за фулерен (рис. 1.1), а потім проводився розрахунок оптимальної конфігурації — такої, при якій повна енергія системи буде мінімальною. Результати розрахунків показали: протони можуть проникати всередину фулерену. Виявилося, всередині молекули С60 може накопичуватися до шести протонів одночасно, а ось сьомий і наступні вже не зможуть проникнути всередину і будуть відштовхуватися — річ у тому, що «заряджений» протонами фулерен

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

здобуває додатній заряд (а, як відомо, однойменно заряджені частинки відштовхуються).

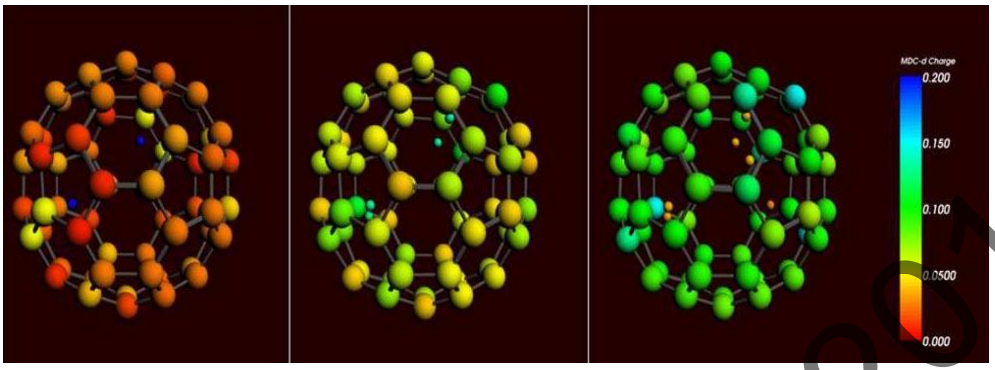


Рисунок 1.1 Розподіл додатнього заряду всередині системи «фулерен + протони»

Відбувається це тому, що проникаючі всередину фулеренові «кульки» протони відтягують на себе електронні хмари атомів вуглецю, що призводить до перерозподілу заряду в системі «протони + фулерен». Чим більше протонів проникає всередину, тим сильніше додатній заряд на поверхні фулерену, тоді як протони, навпаки, все сильніше наближаються до нейтральних значень. Коли кількість протонів всередині сфери перевищує 4, вони стають нейтральними (жовто-оранжевий колір), ну а поверхня фулерену все сильніше «синіє». Спочатку розрахунки були виконані тільки в системі «фулерен + протони» (без урахування впливу інших молекул). Але ж в клітці фулерен знаходиться не в вакуумі, а у водному середовищі, заповненої безліччю з'єднань різного ступеня складності [2]. Тому на наступному етапі моделювання фізики додали до системи 47 молекул води, що оточують фулерен, і перевірили, чи не вплине їхня присутність на взаємодію з протонами. Однак і в присутності води модель діяла успішно.

Наукова група з Сінгапуру створила квантові точки на основі молекул фулерена [3]. Квантовою точкою може служити будь-який досить маленький фрагмент напівпровідника, обмежений за всіма трьома просторовими вимірами. Як відомо, при русі електрона в обмеженій області його енергія має суворо певні значення; це властивість — дискретність енергетичного

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

спектра, що дозволяє порівнювати квантову точку з атомом. Подібно справжньому атому, точка може містити один або декілька вільних електронів, імітуючи водень, гелій та інші елементи. Область застосування квантових точок обов'язково буде розширюватися, але вже зараз зрозуміло, що їх можна використовувати при виготовленні транзисторів, світлодіодів і дисплеїв. Точки також розглядаються як кандидати на роль кубітів в майбутніх квантових комп'ютерах. Фулерени, відкриті в 80-х роках минулого століття, мають форму опуклих замкнутих багатогранників, утворені атомами вуглецю [4]. Першим (і, зрозуміло, найбільш відомим і повно вивченим) представником сімейства став фулерен С60, що складається з 20 шестикутників і 12 п'ятикутників структура, яка нагадує футбольний м'яч (рис. 1.2).

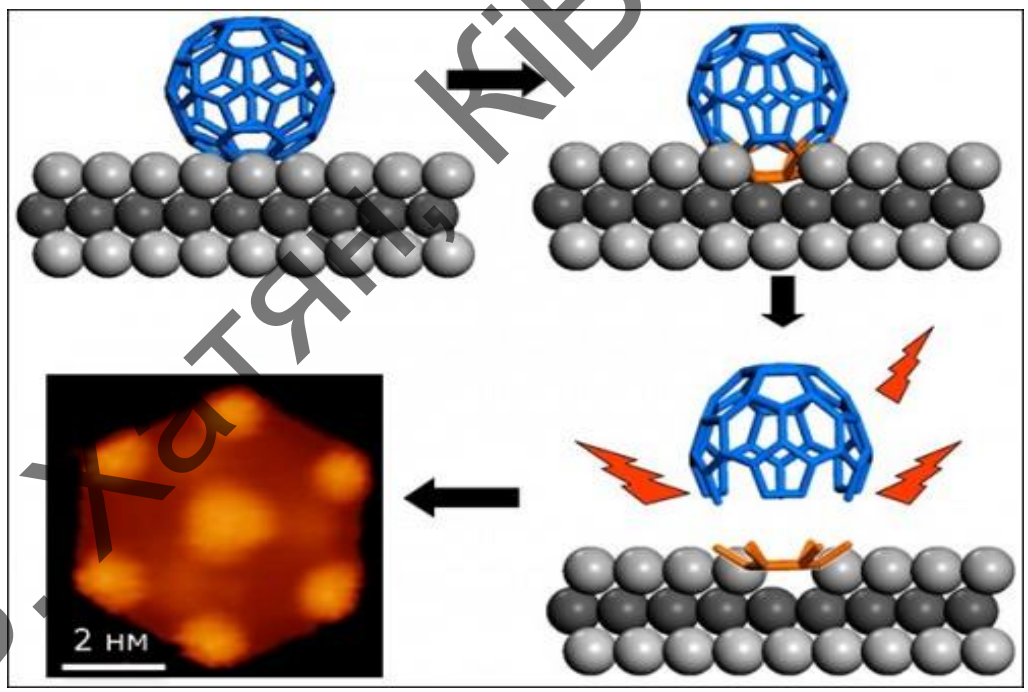


Рисунок 1.2 Спрощена схема досліду

Перетворення молекул С60 в квантові точки розміром менше 10 нм автори виконували на рутенієвій поверхні. На першій стадії процесу взаємодія С60 і Ru призводить до формування поверхневих вакансій (точкових дефектів кристалічної структури) і молекули фулерену «вбудовуються» в поверхню. З ростом температури та за сприяння рутенію,

Д. В. Хатянц, КІВРА 2015

що виконує функцію каталізатора, захоплені молекули розпадаються на вуглецеві кластери. Ретельно контролюючи умови досвіду, науковці досягли об'єднання цих кластерів в акуратні гексагональні квантові точки при температурі близько 825 К [5]. Отримані квантові точки можна назвати графеновими, оскільки вони побудовані з вуглецевих молекулах. На відміну від «чистого» графена з нульовою шириною забороненої зони, квантові точки мають сформовану енергетичну щілину, ширина якої залежить від їх розміру (рис. 1.3).

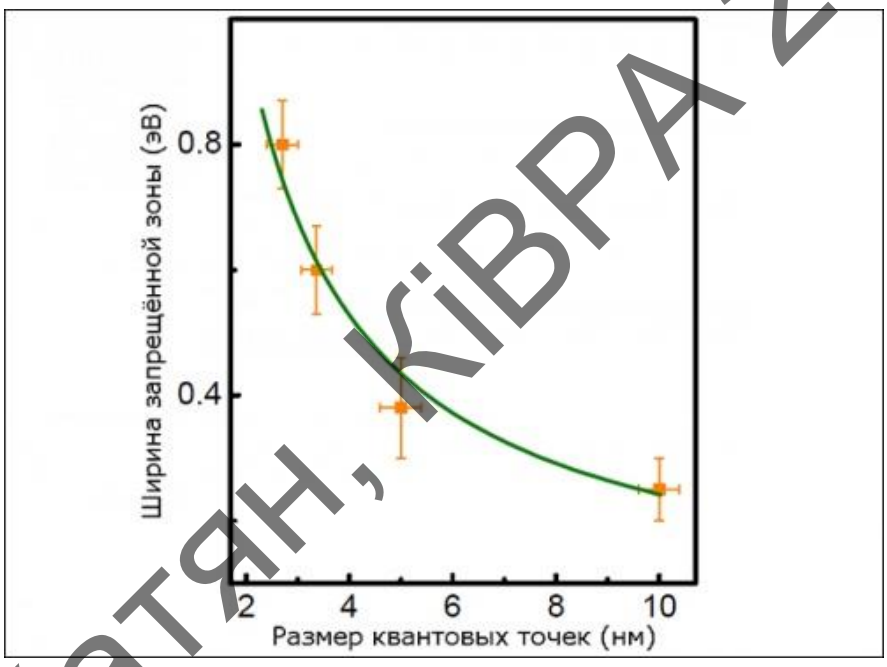


Рисунок 1.3 Збільшення ширини забороненої зони при зменшенні розміру графенових квантових точок

1.2 Вуглецеві нанотрубки та пристрої на їх основі

Вуглецеві нанотрубки — протяжні циліндричні структури діаметром від одного до декількох десятків нанометрів і завдовжки до декількох мікрон складаються з однієї або декількох згорнутих в трубку гексагональних графітових площин (графенів) і закінчуються зазвичай півсферичною головкою.

Вуглецеві нанотрубки — трубчасті наноутворення вуглецю Бувають одно – і багатошарові. Відповідно діаметр цих трубок знаходиться у межах

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

0,4 — 500 нм, а довжина від 1 мкм до декількох десятків мікрометрів (при синтезі довгих волокон — і до десятків см). Утворюються при розкладанні вуглецевмісних газів (CH_4, C_2H_4, C_2H_2, CO, парів C_6H_6 і т.д.) на каталітично активних поверхнях металів (Fe, Co, Ni тощо). Головна особливість цих вуглецевих наноструктур (як і фулеренів) — їх каркасна форма.

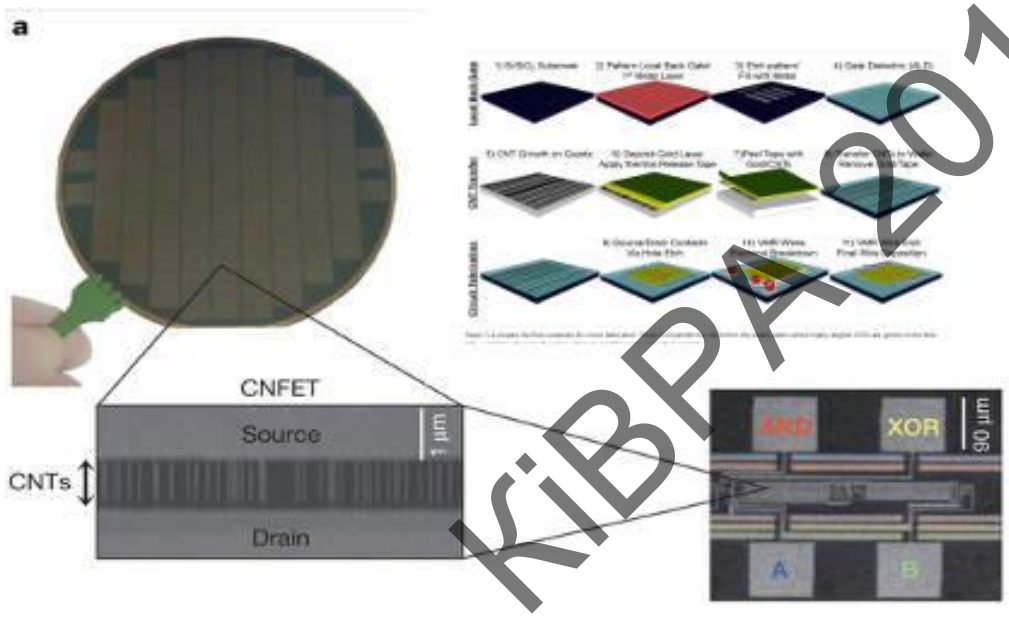


Рисунок 1.4 Схема комп'ютера на вуглецевих нанотрубках

Вчені зі Стенфордського університету створили прототип першого повного по Тьюрингу комп'ютера на вуглецевих нанотрубках (рис. 1.4). Опис прилада опубліковано в журналі Nature [6], короткий обзор дослідження приводится в редакціонній статті видавництва. Створення прототипу стало можливим завдяки одночасному використанню двох підходів: розробці нової технології орієнтування нанотрубок на підкладці і сильному спрощенню логічної архітектури пристрою. При цьому після нанесення нанотрубок на підкладку учені спочатку видаляли ті з них, які володіли металевими, а не напівпровідниковими властивостями і тільки потім формували транзистори. Середній розмір останніх становив близько 8 мкм.

При розробці схеми пристрою вчені звернулися до архаїчної PMOS-логіці. Вона використовувалася при створенні транзисторів переважно в середині минулого століття до того, як її замінили більш енергоефективні і

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

просунуті напівпровідникові пристрої КМОП [7]. Ці схеми відрізняються насамперед тим, який струм подається на керуючий затвор транзистора і як проводиться його перемикання. Рішення авторів використовувати застарілу архітектуру було пов'язано не з особливостями нанотрубок (з них можна зібрати і КМОП-процесор), а з тим, що в такому разі виготовлення проводиться за вдвічі меншу кількість етапів, а, отже, нижче можливісті помилки. Комп'ютер на нанотрубках здійснює всього одну логічну операцію — SUBNEG, тобто віднімає одне число з іншого і в разі негативної різниці записує його в третю комірку. При цьому за один цикл обчислення проводяться всього над одним бітом інформації. Проте, за словами авторів, процесор володіє повнотою по Тьюрингу, тобто здатний виконувати всі алгоритмічно розв'язні завдання, на які йому просто потрібно набагато більше часу, ніж 32-або 64-бітному сучасному пристрою.

За словами вчених з Мюнхенського технологічного інституту [8], наскільки масштабованою і перспективною виявиться технологія, поки не ясно. Це буде залежати від того, наскільки точно вчені зможуть управляти орієнтацією нанотрубок на підкладці Недавно вчені змогли досягти рекордної щільності укладки вуглецевих нанотрубок на підкладці, однак чи можна буде застосувати цю технологію для створення транзисторів, поки не ясно.

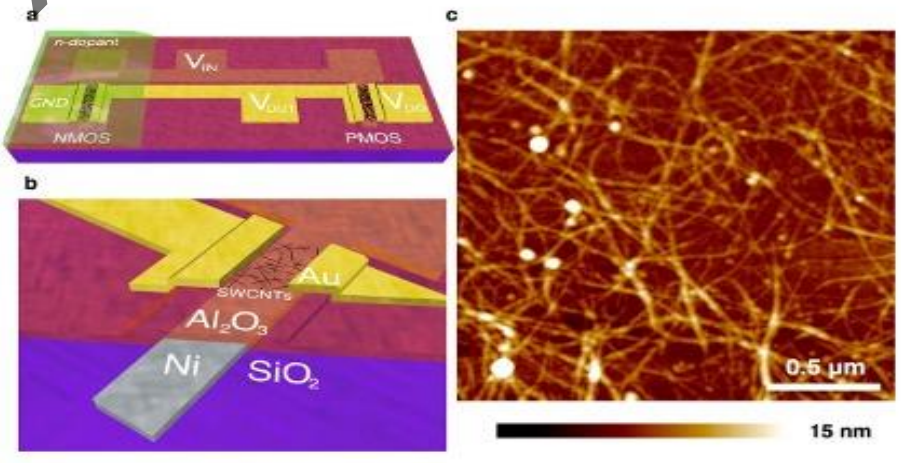


Рисунок 1.5 Інтегральна схема КМОП

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Дослідники з університету Іллінойсу та університету Міннесоти в США представили прототип мікроелектронного логічного пристрою з рекордно низьким рівнем енергоспоживання. Використання вуглецевих нанотрубок в конструкції логічного перемикача дозволило довести необхідну для роботи пристрою потужність до декількох десятих часток нВт [9,10].

Дослідники продемонстрували невелику інтегральну, виконану за схемою КМОП (рис. 1.5), побудувавши логічний інвертор на двох транзисторах. (a) Взявши ізолюючу підкладку з оксиду кремнію, вчені розмістили на ній доріжки із золота та оксиду алюмінію, а потім помістили в проміжки між ними вуглецеві нанотрубки для створення транзисторних затворів (b). За винятком цих елементів увесь інший чіп був виготовлений стандартними методами на зразок пошарового атомного осадження (c), тому, як пишуть автори прототипу, йдеться не про абсолютно новій елементній базі, а про розширенні вже існуючої технології.

Виміри показали, що пристрій в статичному (тобто при перебуванні його в одному з двох станів, «закритому» або «відкритому») режимі споживає близько однієї десятої частки нВт: цей показник підтвердився і при випробуванні більш складних логічних пристроїв, що поєднують інвертер з логічними елементами «І» та «АБО». В момент перемикання, тобто на піку потужності, споживання енергії досягло десяти нВт: чіп з мільярдом таких елементів витратить близько десяти ват в припущенні, що потужність витрачається тільки на перемикання логічних елементів і не розсіюється за рахунок електричного опору провідників.

На думку дослідників, це дозволяє говорити про практичну реалізованость мікроелектроніки з використанням нанотрубок, причому в рамках найбільш широко використовуваної схемотехніки. КМОП-схеми набули широкого поширення в 90-і роки XX століття і зараз на їх основі виконана велика частина комерційних пристроїв. Основними перевагами КМОП (скорочення від «комплементарний металооксидний напівпровідник») є низьке енергоспоживання і технологічність виробництва;

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

описаний в новій роботі прототип дозволяє ще більше знизити енергоспоживання, зберігши при цьому можливість масового виробництва.

Як активна частина електронних пристроїв, вуглецеві нанотрубки (ВНТ) були використані для контролю їх електричних властивостей. Таким чином, вуглецеві нанотрубки можуть реалізовувати електронні пристрої, такі як діоди, транзистори, випрямлячі Шоткі, суперконденсатори, сонячні батареї і органічні світловипромінюючі діоди, шляхом об'єднання напівпровідникових і металевих властивостей. Різні стратегії і топологій були запропоновані з метою поліпшення їх продуктивності. Транзистори і випрямлячі Шоткі можуть бути отримані за допомогою металевих напівпровідникових переходів.

В цьому розділі аналізуються експлуатаційні характеристики, топології і додатки електронних пристроїв, виготовлені за допомогою вуглецевих нанотрубок з акцентом на VLSI. Це пояснюється тим, що вибір матеріалу має вирішальне значення для успішного застосування з високим виступом в електронних пристроях, таких як польові транзистори, p-n діоди, суперконденсатори, сонячні елементи і органічні світловипромінювальні діоди.

Розвиток ВНТ в польових транзисторах (CNFETs) було обумовлено історичною мотивацією, знизити або зробити незначну дію короткого каналу та для поліпшення продуктивності транзисторів в цих масштабах довжини. Використання напівпровідникових ВНТ є стратегічним, враховуючи, що металеві нанотрубки не можуть бути повністю відключені [11]. Основні переваги цього типу транзисторів: балістичний електронний транспорт протягом його довжини, більш висока щільність струму, низьке енергоспоживання по кремнієвій версії і більш висока швидкість роботи. Існують чотири основних топології проектувати ВНТ польових транзисторів: 1) назад закритого CNTFETs, 2) наверх закритого CNTFETs, 3) оберніть навколо CNTFETs, 4) підвісні CNTFETs (рис. 1.6).

У разі зворотніх закрито CNTFETs, основні недоліки, знайдені для його

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

використання є “бідними” контактами між діелектриком затвора і ВНТ, важке перемикання між станами включення і виключення, коли низька напруженість, бар'єр Шоткі між ВНТ і стоком. У разі топ закритого CNTFETs, вони мають ряд переваг в порівнянні з бек закритого типу CNTFETs, але це процес виготовлення є більш складним.

У разі зважених CNTFETs шукається скорочення між підкладкою і оксидом затвора, і тому, він зменшує розсіювання на інтерфейсі ВНТ-підкладки з недоліком обмежує його використання в додатках, де високі ставлення ON / OFF потрібні.

В CNTFETs можуть бути класифіковані в два типи: CNTFETs 1) n-типу, коли електрони є основними носіями для додатніх напружень на затворі і 2) CNTFETs p-типу, коли отвори будуть збільшувати кількість носії для від’ємних напруг на затворі.

Чотири електричні режими транспортування можуть бути знайдені в транзисторах на основі вуглецевих нанотрубок, які відрізняються, відповідно до довжини нанотрубки в порівнянні з їх довжиною вільного пробігу і за типом контакту між нанотрубками та витоком / стоком металу: 1) омічного контакту, коли впорскування заряду реалізується витоком і стоком контактів в вуглецевих нанотрубоках і навпаки, виробляючи великий потік; 2) омічний контакт дифузна, коли двонаправлений перенос заряду страждає розсіюванням між джерелом і ВНТ з обмеженим потоком; 3) бар'єру Шоткі — дифузна, коли поєднання напруг затвору і стоку, зменшує бар'єр Шоткі і переносить заряд.

В даний час, на основі ВНТ польові транзистори (FETs) мають експлуатаційні характеристики, які співставні з тими пристроями, які на основі кремнію [12]. Активною частиною в польових транзисторах є електричний канал, який встановлюється за допомогою вуглецевої нанотрубки в підкладці з'єднувальних каналів між витоком і стоком.

При температурі навколишнього середовища, напівпровідникові ВНТ в цілому показують однополярну поведінку p-типу. За додаванням калія,

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

однополярну поведінку p-типу може бути переключено на одно полярну поведінку n-типу.

В суперконденсаторах є електрохімічний конденсатор з відносно високою щільністю енергії, малий розмір і вага (в сотні разів більше, ніж у електролітичних конденсаторів).

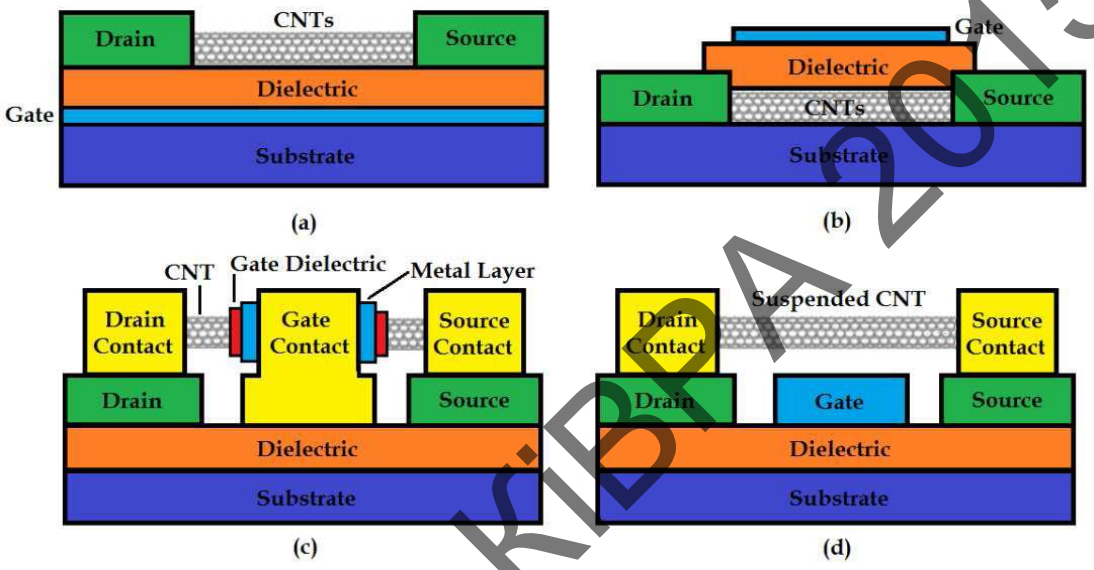


Рисунок 1.6 Перетини різних геометрій вуглецевих нанотрубок польових транзисторів: (а) назад закритого CNTFETs, (б) топ закритого CNTFETs, (в) оберніть навколо CNTFETs, (d) підвісні CNTFETs

Вуглецеві нанотрубки з керамічних матеріалів можуть бути використані для створення суперконденсаторів з гетерогенних плівок. Використання керамічних матеріалів дозволяє збільшити їх електричну енергію. Суперконденсатори мають електроди з великою площою поверхні, які можуть бути отримані за допомогою наборів вуглецевих нанотрубок, що діють як електричні провідні мережі. Ці електроди повинні бути здатні підтримати високу потужність і щільність енергії, з пониженим внутрішнім електричним опором.

Гнучка електроніка стала тепер реальністю завдяки успішному розвитку органічної електроніки, працюючи в низькому температурному режимі. Такі пристрої, як органічні тонкі транзистори (OTFTs), дисплеї великої площи,

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

сонячні батареї, органічні світловипромінюючі діоди (OLED) і датчики можуть бути реалізовані на основі ВНТ. Електричні властивості поліпшені з використанням вуглецевих нанотрубок. В транзистора поліпшені шпаруватість, порогова напруга і крутизна. ВНТ можуть бути використані для виготовлення прозорих тонких плівок, які використовуються як отвір вприскування електродів для органічних світловипромінювальних діодів (органічні світлодіоди) або для жорсткого скла або гнучких підкладок. Використання ВНТ в полімерних матрицях для розробки світлодіодів дозволяє змінити електричні характеристики полімеру завдяки тому, що ВНТ працюють як "допінг" матеріали.

Інтеграція гібридних матеріалів, що утворюють гетеропереходи дозволяє поліпшити ефективність сонячних батарей за допомогою зменшення внутрішнього опору, яка безпосередньо пов'язано з фактором заповнення, транспортування і розділення зарядів, які є корисними для оптимальної продуктивності.

Якщо вуглецеві нанотрубки використовуються як прозорі електроди в сонячних елементах, то вони збирають електричні носії заряду. Основною стратегією є використання декількох нанотрубок, що працюють паралельно або індивідуально є контроль струму, що йде від мкА до мА [13]. Таким чином, це дуже корисно для розробки методологій для виробництва масивних нанотрубок з хорошими характеристики з метою отримання високопродуктивних додатків.

1.3 Графен та пристої на його основі

Графен (рис. 1.14), що складається з атомів вуглецю, з'єднаних у вигляді дротяної сітки, — фундаментальний елемент для графіту і фулеренів. Графіт (нижній лівий малюнок), знайомий кожному у вигляді стрижня олівця, — це крихкий матеріал, який можна представити як багатошаровий торт зі слабко пов'язаними листами графена. Коли графен згортається в трубку або сферу, то виходять фулерени.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Вони підрозділяються на циліндричні, називаються вуглецевими нанотрубками (внизу в центрі), і структури у формі футбольного м'яча (внизу справа), іноді називаються в честь їх першовідкривача кулями Бакминстера. Однак існують і інші графітові форми.

Графен все більш привабливий для дослідників. Якщо в 2007 році вийшло 797 статей, присвячених графену, то за перші 8 місяців 2008 року - вже 801 публікація. Які ж найбільш значущі дослідження і відкриття останнього часу в області графенових структур і технологій?

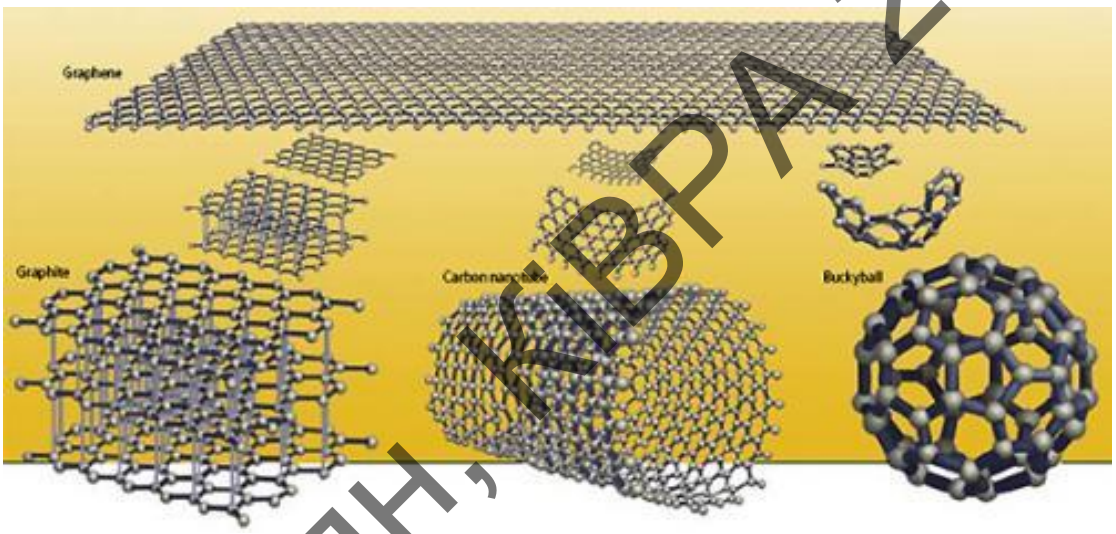


Рисунок 1.14 Схема графена

На сьогоднішній день графен — найтонший матеріал, відомий людству, товщиною всього в один атом вуглецю. Він увійшов в підручники з фізики та в нашу реальність в 2004 році, коли дослідники з Манчестерського університету Андре Геймом і Костянтин Новосьоловим зуміли його отримати, використовуючи звичайну стрічку-скотч для послідовного відділення шарів від звичайного кристалічного графіту, знайомого нам у вигляді стрижня олівця. Чудовий той факт, що графеновий лист, поміщений на підкладку з оксидованого кремнію, можна розглянути в хороший оптичний мікроскоп. І це при його товщині всього в декілька ангстрем (1Å = 10-10 м) .

Популярність графена серед дослідників та інженерів зростає день від дня, оскільки він володіє незвичайними оптичними, електричними,

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

механічними та термічними властивостями. Багато експертів пророкують в недалекому майбутньому можливу заміну кремнієвих транзисторів економічнішими і швидкодіючими графеновим .

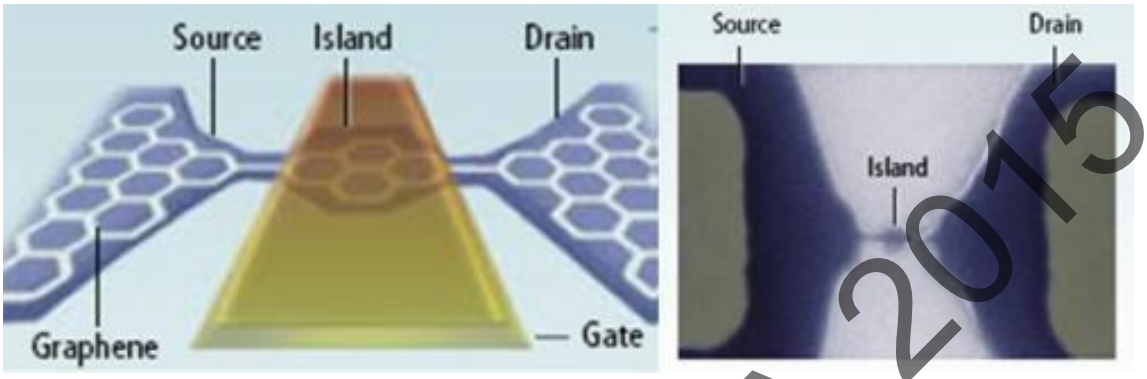


Рисунок 1.15 Застосування графена в якості транзистора

Так як графен вперше був отриманий лише чотири роки тому, то це цілком природно, що в даний час поки ще немає працюючих пристроїв на його основі, хоча список перспективних технологій досить обширний. На (рис. 1.15) наведено приклад можливої реалізації одноелектронного транзистора на базі графену. Зліва показана схема транзистора, що складається з графенових витоку (source) і стоку (drain), з'єднаних острівцем (island) з провідного матеріалу або з квантової точки, шириною близько 100 нм. Праворуч показаний тестовий транзистор, зображення якого збільшено в 40 000 разів. Острівець транзистора настільки малий, що здатний вмістити тільки один електрон в один момент часу. Якщо до острівця підходять нові електрони, то вони відкидаються електростатичною силою. Будь-який електрон з витоку квантово-механічно тунелює (є відмінна від нуля, ймовірність його проходження через енергетичний бар'єр) до острівця, після чого «зникає», просочуючись до витоку. Напруга, прикладена до третього електроду — затвору (не показаний на мікрознімку), — управляє входом і виходом електрона з острівця, таким чином реєструючи або логічний 0 (на острівці немає електрона) або 1 (електрон на острівці).

Незважаючи на те, що механічне відшарування за допомогою скотча

Д. В. Хатян. КІВРА 2015

дозволяє отримувати графенові шари високої якості для фундаментальних досліджень, а епітаксійний спосіб вирощування графена може забезпечити найкоротший шлях до електронних мікросхем, хіміки намагаються отримати графен з розчину. На додаток до низької вартості і високої продуктивності, цей метод відкриває дорогу до багатьох широко використовуваним хімічним технікам, які дозволили б впроваджувати графенові шари в різні наноструктури або інтегрувати їх з різними матеріалами для створення нанокомпозитів. Однак при отриманні графена хімічними методами є деякі труднощі, які повинні бути подолані: по – перше, необхідно досягти повного розшарування графіту, поміщеного в розчин; по-друге, зробити так, щоб відшарований графен в розчині зберігав форму листа, а не згортався і не злипався.

В престижному журналі Nature були опубліковані дві статті незалежно працюючих наукових груп, в яких авторам вдалося подолати згадані вище труднощі і отримати графенові листи хорошої якості, підвішені в розчині.

Перша група вчених зі Стенфордського університету (Каліфорнія, США) і Пекінського інституту фізики (Китай) — впроваджувала сірчану і азотну кислоти між шарами графіту і потім швидко нагрівала зразок до 1000 ° С. Вибуховий випаровування молекул — інтеркалянтов виробляє тонкі (товщиною в кілька нм) графітові «пластівці», які містять безліч графенових шарів. Після цього в простір між графеновим шарами хімічно впроваджували дві речовини — олеум і гідроокис тетрабутиламонію (ГТБА). Оброблений ультразвуком розчин містив як графіт, так і графенові листи. Після цього методом центрифугування проводили відділення графена (рис. 1.16).

(a) Схематичне зображення графіту, розшаровується молекулами сірчаної кислоти, впровадженими в міжплощинний простір. (b) Зображення інтеркальованого графіту з впровадженими молекулами ГТБА (сині сфери). (c) Обробка графіту, вміщеного в хімічний розчин, ультразвуком для формування графенових листів. В посудині показаний розчин, в якому знаходяться графенові листи після центрифугування. (d) Зображення

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

графенових «лусочок» розміром кілька сотень нанометрів, отримане атомно-силової мікроскопії [14].

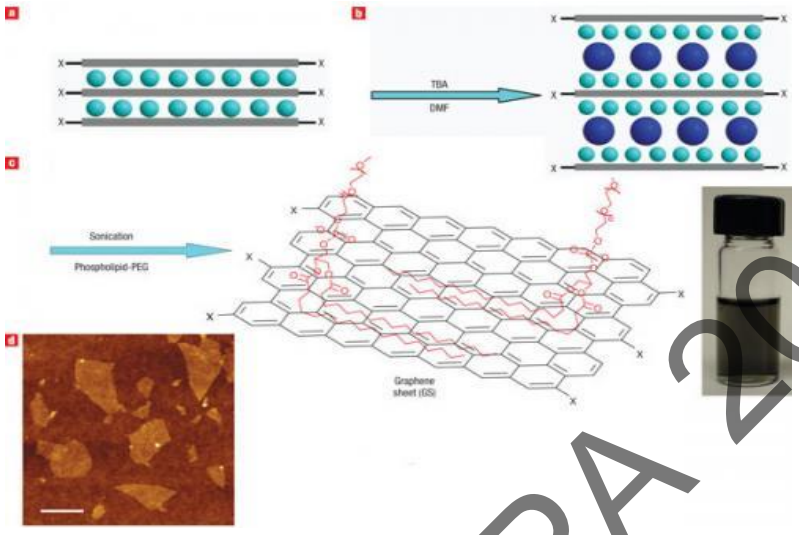


Рисунок 1.16. Графенові листи, хімічно отримані з розчину

В той же час друга група вчених з Дубліна, Оксфорда і Кембриджа - запропонувала іншу методику для отримання графена з багатошарового графіту – без використання інтеркалянтів. Головне, за словами авторів статті, використовувати «правильні» органічні розчинники, такі як N-метил-пірролідон. Для отримання високоякісного графена важливо підібрати такі розчинники, щоб енергія поверхневої взаємодії між розчинником і графеном була такою ж, як для системи графен – графен (рис. 1.17).

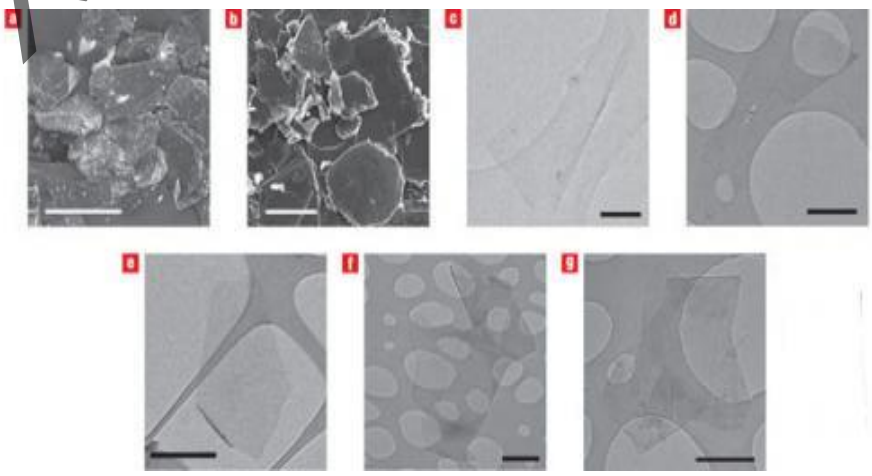


Рисунок 1.17 Зображення графіту і графена, отримані електронною мікроскопією

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

(a) Графіт, використовуваний для отримання графена. Шкала — 500 мкм. (b) Графітовий осад після центрифугування. Шкала — 25 мкм. (c-g) Зображення графенових листів, отримані просвічуючою електронною мікроскопією при використанні різних розчинників. Шкала — 500 нм.

Успіх обох експериментів заснований на знаходженні правильних інтеркалянтів і розчинників. Звичайно, існують і інші методики для отримання графена, такі як перетворення графіту в оксид графіту. В них використовується підхід, називається «оксидування-розшарування-відновлення», в ході якого базисні площини графіту покриваються ковалентно-пов'язаними функціональними групами кисню. Цей окислений графіт стає гідрофільним (або попросту вологолюбні) і може легко розшаровуватися на окремі графенові листи під дію ультразвуку, перебуваючи у водяному розчині. Отриманий графен володіє чудовими механічними і оптичними характеристиками, але його електрична провідність на кілька порядків нижче, ніж провідність графену, отриманого за допомогою «скотч-методу». Відповідно, такий графен навряд чи зможе знайти застосування в електроніці.

Як виявилося, графен, який був отриманий в результаті двох вище зазначених методик, більш високої якості (містить меншу кількість дефектів в решітці) і, як результат, має більш високу провідність.

До речі довелося ще одне досягнення для дослідників з Каліфорнії, які недавно повідомили про (дозвіл до 1Å) електронну мікроскопію з низькою енергією електронів (80 кВ) для прямого спостереження за окремими атомами і дефектами в кристалічній решітці графена. Вченим вперше в світі вдалося отримати зображення атомної структури графена високої чіткості , на яких можна своїми очима побачити сіткову структуру графена (рис. 1.18).Ще далі пішли дослідники з Корнельського університету. З аркуша графена їм вдалося створити мембрану товщиною всього в один атом вуглецю, і надути її, як повітряну кульку. Така мембрана виявилася достатньо міцною для того, щоб витримувати тиск газу в кілька атмосфер.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Експеримент полягав у наступному. На підкладку з оксидованого кремнію з попередньо витравленими осередками були поміщені листи графена, які за рахунок ван-дер-ваальсових сил щільно прикріпились до поверхні кремнію.

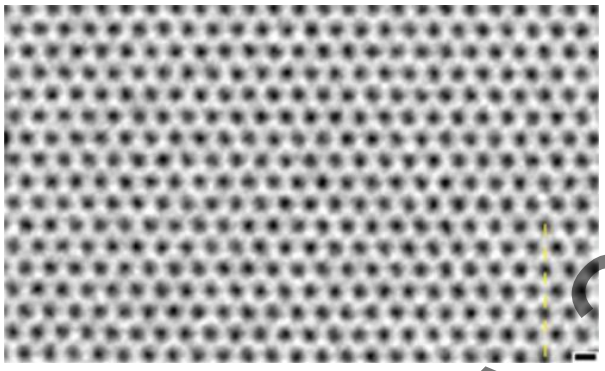


Рисунок 1.18 Зображення кристалічної решітки самої тонкої речовини на Землі. Довжина масштабної лінійки — 2 Å

Таким чином були утворені мікрокамери, в яких можна було утримувати газ. Після цього вчені створювали різницю тисків всередині і зовні камери. Використовуючи атомно-силовий мікроскоп, що вимірює величину відхиляючої сили, яку кантилевер з голкою відчуває при скануванні мембрани на висоті всього кількох нанометрів від її поверхні, дослідникам вдалося спостерігати ступінь увігнутості – вигнутості мембрани при зміні тиску до декількох атмосфер (рис. 1.19).

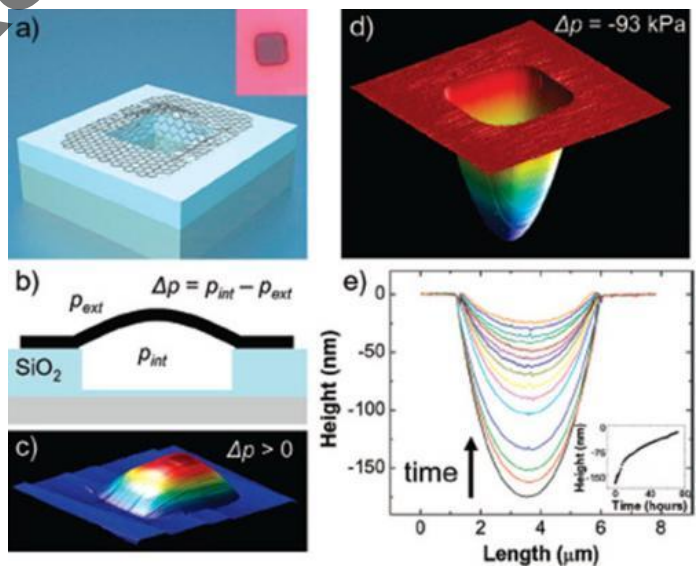


Рисунок 1.19 Схематичне зображення мікрокамери

Д. В. Хатян, КВРА 2015

(a) Схематичне зображення мікрокамери, «запечатаній» графеном. (b) Поперечний розріз мікрокамери з щільно прилягає мембраною. (c) Зображення вигнутою мембрани при зменшенні зовнішнього тиску по відношенню до тиску газу всередині камери. (d) Зображення увігнутої мембрани при збільшенні зовнішнього тиску. (e) Зміна глибини прогину мембрани з часом. Найменша глибина відповідає тимчасовому проміжку 71,3 год., найбільша (175 нм) — 40 хв з моменту початку експерименту (тобто після того як мікрокамеру вийняли з вакууму).

Після цього мембрана була використана в ролі мініатюрного барабана для вимірювання частоти її вібрацій при зміні тиску. Було встановлено, що гелій залишається в мікрокамері навіть при високому тиску. Однак оскільки графен, використаний в експерименті, був не ідеальний (мав дефекти кристалічної структури), то газ потроху просочувався через мембрану. Протягом усього експерименту, який тривав понад 70 годин, спостерігалося неухильне зменшення натягу мембрани.

Автори дослідження вказують, що подібні мембрани можуть мати найрізноманітніші застосування — наприклад, використовуватися для вивчення біологічних матеріалів, поміщених в розчин. Для цього буде достатньо накрити такий матеріал графеном і вивчати його крізь прозору мембрану мікроскопом, не побоюючись за витік або випаровування розчину, підтримуючого життєдіяльність організму. Також можна зробити проколи атомного розміру в мембрані і потім спостерігати, вивчаючи дифузійні процеси, як окремі атоми або іони проходять крізь отвір. Але найголовніше — дослідження вчених з Корнельського університету ще на крок наблизило науку до створення одноатомних сенсорів. Стрімке зростання кількості досліджень на графені показує, що це дійсно дуже перспективний матеріал для широкого кола застосувань, але до втілення їх у життя ще слід побудувати чимало теорій і провести не один десяток експериментів.

Для створення і спостереження самого тонкого матеріалу на нашій планеті вам знадобляться чисті умови (наприклад, фізико-хімічна

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

лабораторія, хоча підійде і звичайна кімната з хорошою вентиляцією), чисті руки, бажано в рукавичках, і чисті помисли.

Спочатку підготуйте підкладку, на яку ви будете поміщати графен для спостереження в мікроскопі. Для цього потрібно взяти кремнієву підкладку з природним оксидом на поверхні, яку перед дослідженням варто очистити. Найкраще для цього підійде розчин соляної кислоти і перекису водню в співвідношенні 1: 3. Помістіть пластину в розчин на 30 секунд, а потім просушіть стисненим азотом.

Прикладіть відшарований шматочок графіту до стрічки-скотч, використовуючи пінцет. Акуратно складіть стрічку навпіл, накривши графіт липкою стороною. Несильно притисніть стрічку до графіту з обох сторін і неквапливо розкрийте скотч, щоб можна було спостерігати розшарування графіту на дві частини.

Повторіть попередній етап раз десять. Чим тонше будуть ставати шари графіту, тим складніше буде це робити.

Дуже обережно помістіть стрічку-скотч з графітом на поверхню кремнієвої підкладки. Використовуючи пластиковий пінцет, видаліть повітряні бульбашки між стрічкою і підкладкою. Пройдіться по поверхні зразка пінцетом, несильно його придавлюючи до підкладки протягом десяти хвилин. Потім дуже повільно зніміть стрічку, притримуючи підкладку.

Навіть в «домашніх» умовах можливо провести дослідження: помістіть ваш зразок під 50 –, а краще 100 – кратну лінзу мікроскопа. Ви побачите безліч графітових «лусочок» різних розмірів і форми, що переливаються всіма кольорами веселки. Якщо вам пощастить, ви помітите графен: майже прозору, кристалічну форми «лусочку», безбарвність якої буде сильно відрізнятися від яскравих кольорів «товстих» графітових побратимів [15]

Sony Corp. розробила машину, яка з допомогою рулонної технології (рис. 1.7) зможе виготовляти листи графена шириною 23 см і довжиною 100 метрів.

Це найбільші за площею листи графена в світі. Досі в розробці великих

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

пластин графена лідирували виробники і науково-дослідницькі інститути з Південної Кореї [16]. Але використання ними у виробничому процесі високих температур (1000°C) не дозволяло застосувати рулонну технологію, щоб виробляти графен великої площі.

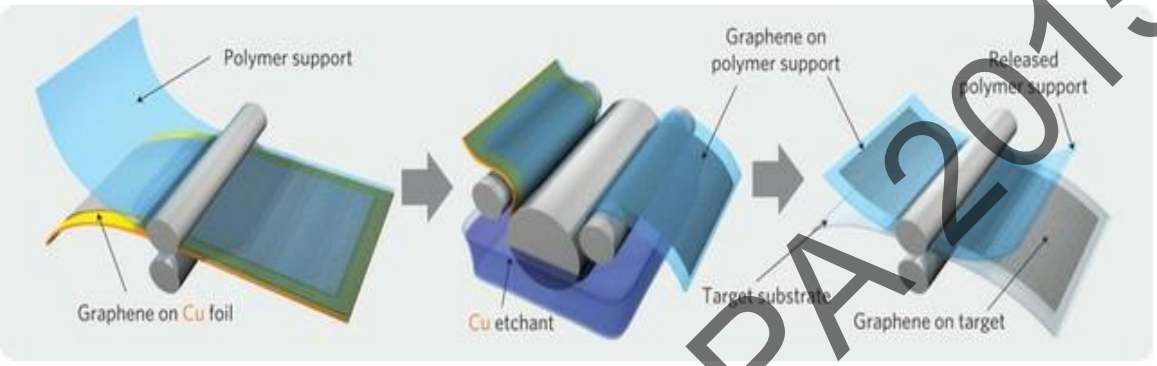


Рисунок 1.7 Технолігія виготовлення рулонового листа графена

З іншого боку, японський Національний інститут передової промислової науки і технології розробив CVD-метод, який використовує плазму температурою 300-400 °C, що дозволяє застосовувати рулонну технологію виготовлення графена. Але цей метод не завжди дає одношарового графена і дозволяє виробляти шматки графена лише дуже маленьких розмірів.

Sony розробила технологію, що поєднує обидва методу (CVD і рулонний) без зміни температури процесу до 1000 °C. У неї застосовується мідна фольга, яка є каталізатором графена і підкладкою для методу CVD. Те, що тільки фольга нагрівається, дозволяє різко скоротити теплове навантаження на всю машину [17].

• Графен (graphene) — двовимірна кристалічна решітка, утворена шаром атомів вуглецю. Має великий механічної жорсткістю і гарною теплопровідністю, а максимальна серед усіх відомих матеріалів рухливість електронів робить графен перспективним матеріалом для наноелектроніки і можливої заміни кремнію в інтегральних мікросхемах.

• CVD (chemical vapor deposition, хімічне парофазного осадження),

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

процес, який використовується для отримання високочистих твердих матеріалів.

• Рулонна технологія (roll-to-roll processing) — процес виготовлення електронних компонентів на рулонах гнучкого пластику або металевої фольги.

Вчені з Фінляндії та США показали [18], що графенові нанострічки при скручуванні без особливих проблем перетворюються у вуглецеві нанотрубки.

Щоб оцінити ефективність скручування, автори провели моделювання методом квантової молекулярної динаміки, розглянувши вплив на нескінченно довгуна нострічку шириною у 24 Å. Етапи процессу характеризувалися безрозмірним параметром τW, де τ - кут закручування у перерахунку на одиничну довжину, а W — ширина. У звичайної нанострічки, наприклад, $\tau W=0$, тоді як стрічці, що робить повний оберт на довжині у $2\pi W$, відповідає $\tau W = 1$.

На початку скручування поперечний переріз стрічки залишався плоским, але зізбільшенням τW до 0,83 він набував U-подібної форми. Подальший вплив змушував краї зразка зближатися і згодом (на $\tau W \approx 1,62$) вони починали хімічно взаємодіяти й утворювати зв'язки. Незабаром після цього скручена стрічка перетворювалася у трубку з перетином, який лише трохи відрізнявся від кругового.

Новий спосіб виготовлення нанотрубок добре проявив себе і у додатковій серії розрахунків, де ширина вихідних стрічок змінювалась [19]. До переваг методу скручування також відноситься те, що він дозволяє задавати потрібну хіральність — одну з найважливіших структурних характеристик нанотрубки, обумовлену взаємною орієнтацією її поздовжньої осі та гексагональної сітки графену (рис. 1.8).

Щоб підтвердити результати обчислень, у центральній частині підвішеної стрічки вчені хочуть жорстко закріпити невелику пластину, після чого на розташовані поруч електроди буде подаватися напруга. Ці сигнали змусять пластину обертатися, а разом із нею почне скручуватися і

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

нанострічка.

Найпростіша демонстрація того, як скручування стрічки приводить до утворення трубки (рис. 1.9).

Графен являється одним з найтонших наноматеріалів в світі. Він має унікальні електричні, оптичні, механічні і теплові властивості. Фактично пласт графена представляє собою двохмірний лист товщиною в один атом. Атоми вуглицю в графені побудовані у виді шестигранного стільника.

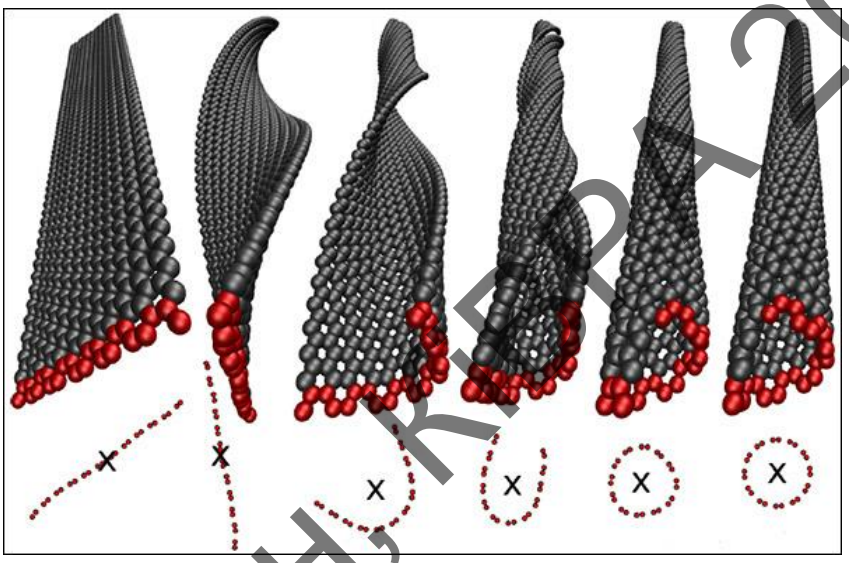


Рисунок 1.8 Етапи скручування нанострічки

Рисунок 1.9 Скручена нанострічка

Тепер інженери із компанії IBM створили функціональний радіочіп, взявши за основу сполучення кремнієвої пластини і графенових транзисторів.

Д. В. Хатян, КБРА 2015

За словами винахідників, цей пристрій повинен провести революцію в технології бездротової комунікації.

Більше всього фізики цінують графен не стільки за міцність, скільки за високу температурну и електричну продуктивність. Легкі і гнучкі елементи із графена можуть колись повністю замінить кремнієві чіпи, які є у всій сучасній електроніці. Нові досліди показують [20], що аналогові схеми, такі як радіочіпи, можна також створювати із графена. Це в перспективі може привести до появи бюджетних і набагато більш ефективних бездротових пристроїв.

До цих пір змусити бездротові чіпи (забезпечуючі зв‘язок через Wi-Fi і Bluetooth) працювать з графеновими транзисторами було майже не можливо, оскільки делікатний графен неможливо було вдержать на стандартній кремнієвій базі. В цьому інженери із IBM переконались на особистому досвіді.

В 2011 году вони побудували мініатюрний радіочіп з графеновими транзисторами (рис. 1.10), нажаль додати інші елементи схеми, такі як резистори і котушки, вже не вдалось. Вони пошкодили структуру графена і він втратив можливість підсилювати напругу.

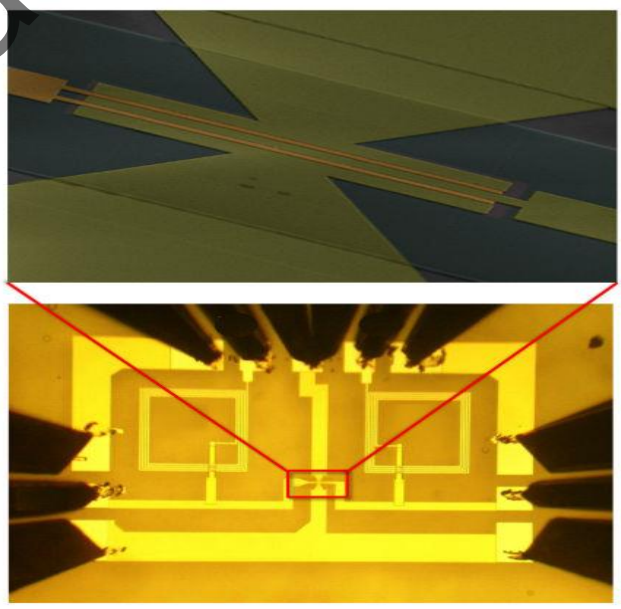


Рисунок 1.10 Схема радіочіпа з графеновими транзисторами

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

"З тих пір нашою головною задачею стала модифікація складання таким образом, щоб із графена можна було будувати функціональні схеми і не пошкоджувать матеріал", — розказує співавтор досліджування Супратик Гуха, матеріалознавець із компанії IBM.

Як правило, деякі структурні компоненти чіпа ставляться поверх транзисторів, але цей метод, як ми вже згадували, виявився не працюючим. Тому Гуха і його команда вирішили з конструювати чіп навпаки: спочатку покласти металічні компоненти, а потім добавить графенові транзистори. "Зворотня методика побудови чіпа дозволила збільшить продуктивність транзисторів в 10 тисяч разів з порівнянням із попередньою моделью" (рис. 1.11), — повідомлює автор дослідження Шу-Цзень Хань.

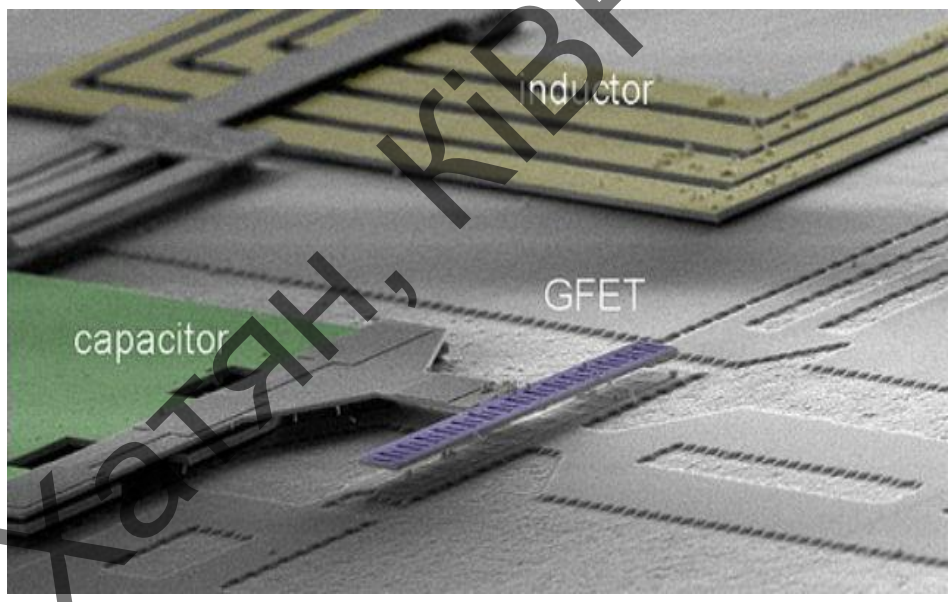


Рисунок 1.11 Схема графенового транзистора

Щоб перевірити работу мікросхеми, дослідники відправили радіосигнал, який мав три букви — I, B і M — назва рідної корпорації. Як повідомляється в пресс-релізі компанії, пристрій успішно приняло цей сигнал. Більще того, вчені помітили, що висока провідність графена сприяла низькому енергоспоживанню ланцюгу, що робить пристрій набагато більш вигідним, чим аналогові радіочіпи.

Агентство по перспективним оборонним науково-дослідницьким

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

розробкам США прийняло участь в фінансуванні даного дослідницького проекта і тепер розраховує на те, що армія США в ближайші роки буде використовувать бюджетний і ефективний бездротовий зв’язок.

Група фізиків з Великобританії, Нідерландів, Росії, Португалії та США, очолювана лауреатами Нобелівської премії Андрієм Геймом і Костянтином Новосельцевим [21], виготовила графеновий транзистор незвичайного «вертикального» компонування (рис. 1.12). До помітних особливостей графена, нагадаємо, належать металева провідність в точці нейтральності, де стикаються залежності енергій електронів і дірок від квазіімпульса, що мають форму конусів, і безперешкодний перенос електронів через потенційні бар'єри за рахунок клейновського тунелювання.

При створенні транзисторів такі властивості обмежують співвідношення струмів у відкритому і закритому станах, не дозволяючи йому підніматися вище ~10^3; в умовах кімнатної температури це співвідношення поки не доходило навіть до 10.

Можливим вирішенням проблеми було б створення забороненої зони шляхом використання двохшарового і тришарового графена, нанострічках або графана (продукту взаємодії графена з воднем).

Роботи в цьому напрямку вже розгорнуті, проте їх результати поки не вражають: відкриття забороненої зони зазвичай призводить до зниження «якості» графена — скажімо, помітного зменшення рухливості носіїв заряду.

У нових експериментах, навпаки, використовувався самий звичайний графен, але структуру транзистора постаралися зробити оригінальною. На стандартну пластину окисленого кремнію дослідники нанесли порівняно товстий шар гексагонального нітриду бору (HBN), який зіграв роль високоякісної атомарно-гладкої підкладки.

Поверх HBN вчені поклали графен, закритий тонкою прокладкою з гексагонального нітриду, що виконує функції ізолюючого бар'єра, і ще одним монослоєм атомів вуглецю. Останнім елементом складної конструкції, що нагадує сендвіч, став другий товстий шар HBN.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

При випробуваннях пристрою з таким «вертикальним» компонуванням фізики прикладали управляючу напругу Vg між кремнієвою підкладкою і нижнім графеновим електродом GrB, спостерігаючи за тим, як це вплине на величину тунельного струму I. У результаті з'ясувалося [22], що струм чітко слідує за змінами Vg, причому відносини значень тунельної провідності σ = I / Vb (Vb - напруга зсуву, що прикладається між моношарами атомів вуглецю GrB і GrT), виміряної на різних Vg, доходили до ~ 50. Вольт-амперні характеристики транзисторів, зняті при температурі рідкого гелію і в кімнатних умовах, практично збігалися (рис. 1.13). На думку авторів дослідження, транзистори нового типу дуже перспективні: вони здатні працювати на дуже високих частотах і вигідно відрізняються тим, що їх поперечні розміри можна знизити до ~ 10 нм.

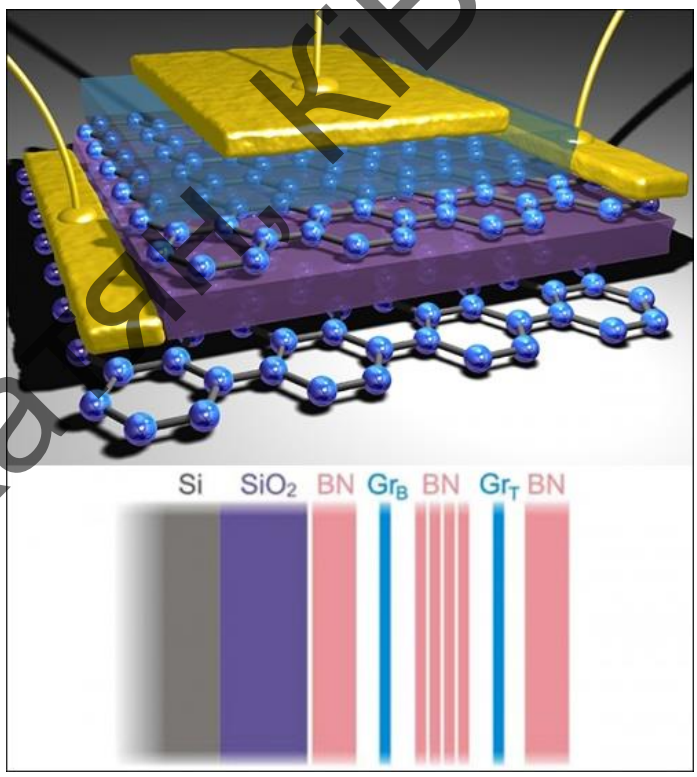


Рисунок 1.12 Спрощена тривимірна модель «вертикального» транзистора і повна схема розташування шарів в його структурі

Оскільки ніяких жорстких обмежень на величину відношення струмів у відкритому і закритому стані немає, в майбутньому, при оптимізації

Д. В. Хаєян, КІВРА 2015

структури та використанні більш якісних діелектриків (заміні SiO2), вона також повинна помітно піднятися.

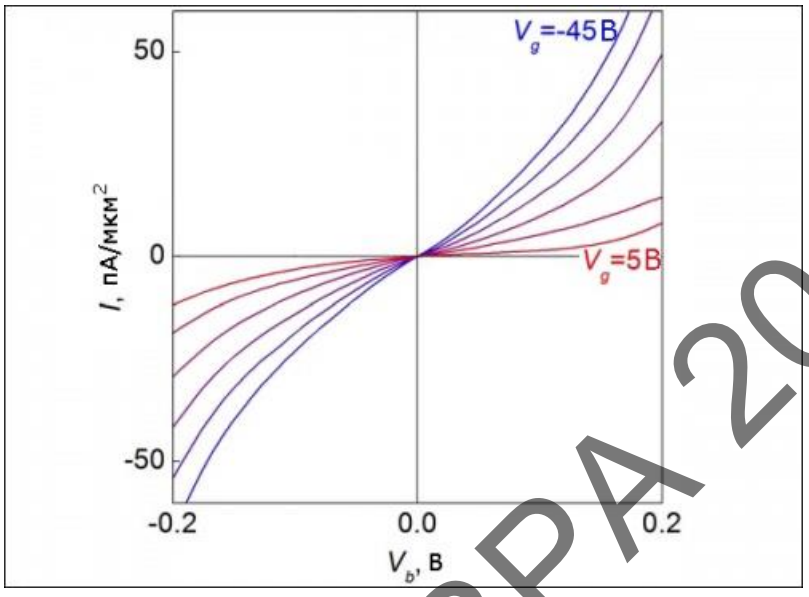


Рисунок 1.13 Вплив керуючої напруги транзистора, яка змінюється з кроком в 10 В, на величину тунельного струму

Д. В. Хатян, КВРА 2015

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ

1. Проведено інтенсивні науково – дослідні роботи за напрямом штучних алотропних форм вуглецю.

2. Унікальні фізичні властивості штучних алотропних форм вуглецю відкривають нові можливості для новітніх нанотехнологій.

3. Пристрої на основі штучних алотропних форм вуглецю бувають такі: комп'ютер на вуглецевих нанотрубках, мікроелектронний логічний пристрій з рекордно низьким рівнем енергоспоживання, суперконденсатори, функціональний радіочіп, вертикальний графеновий транзистор, графеновий біосенсор.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

2 ПРИСТРОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

2.1 Вертикальний графеновий транзистор

Новий польовий тунельний транзистор, виготовлений на основі графена, був розроблений командою вчених Манчестерського університету, очолюваної Лауреатами Нобелівської премії професорами Андрієм Геймом і Костянтином Новоселовим. Використання графена в якості ключового матеріалу транзисторів і інших напівпровідникових приладів має величезний потенціал для того, що б графен можна було розглядати як гідну заміну кремнієвим технологій. Саме цей потенціал і перспективи привертають увагу таких виробників напівпровідникової продукції, як IBM, Samsung, Texas Instruments і Intel. І деякі групи вчених вже успішно створили графенові транзистори, здатні працювати на частотах від 100 до 300 ГГц [23].

До помітних особливостей графена належать металева провідність в точці нейтральності, де стикаються залежності енергій електронів і дірок від квазіімпульса, що мають форму конусів і безперешкодний перенос електронів через потенційні бар'єри за рахунок клейновського тунелювання.

При створенні транзисторів такі властивості обмежують співвідношення струмів у відкритому і закритому станах, не дозволяючи йому підніматися вище ~10^3; в умовах кімнатної температури це співвідношення поки не доходило навіть до 10 [24].

Можливим вирішенням проблеми було б створення забороненої зони шляхом використання двохшарового і тришарового графена, нанострічках або графана (продукту взаємодії графена з воднем).

Роботи в цьому напрямку вже розгорнуті, проте їх результати поки не вражають: відкриття забороненої зони зазвичай призводить до зниження «якості» графена — скажімо, помітного зменшення рухливості носіїв заряду.

У нових експериментах, навпаки, використовувався самий звичайний графен, але структуру транзистора постаралися зробити оригінальною (рис.

Д.В. Хатян, КІВРА 2015

2.1). На стандартну пластину окисленого кремнію дослідники нанесли порівняно товстий шар гексагонального нітриду бору (hBN), який зіграв роль високоякісної атомарно-гладкої підкладки (рис. 2.2) [25].

Поверх HBN вчені поклали графен, закритий тонкою прокладкою з гексагонального нітриду, що виконує функції ізолюючого бар'єра, і ще одним монослоєм атомів вуглецю. Останнім елементом складної конструкції, що нагадує сендвіч, став другий товстий шар HBN.

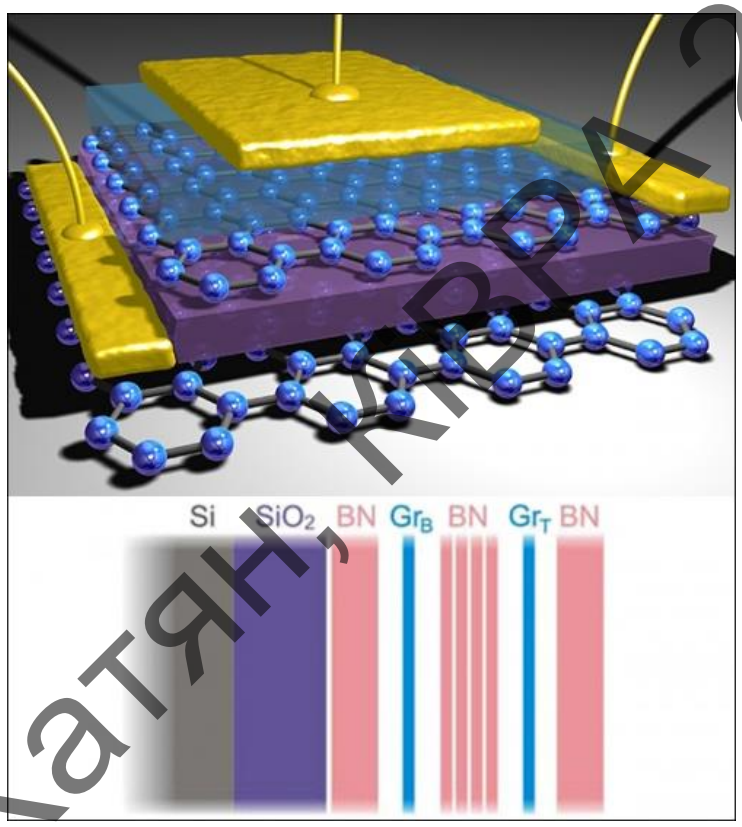


Рисунок 2.1 Спрощена тривимірна модель «вертикального» транзистора і повна схема розташування шарів в його структурі

При випробуваннях пристрою з таким «вертикальним» компонуванням фізики прикладали управляючу напругу Vg між кремнієвою підкладкою і нижнім графеновим електродом GrB, спостерігаючи за тим, як це вплине на величину тунельного струму I. У результаті з'ясувалося, що струм чітко слідує за змінами Vg, причому відносини значень тунельної провідності σ = I / Vb (Vb - напруга зсуву, що прикладається між моношарами атомів вуглецю

Д. В. Хатян, КВРА 2015

GrB і GrT), виміряної на різних Vg, доходили до ~ 50. Вольт-амперні характеристики транзисторів, зняті при температурі рідкого гелію і в кімнатних умовах, практично збігалися (рис. 2.3).

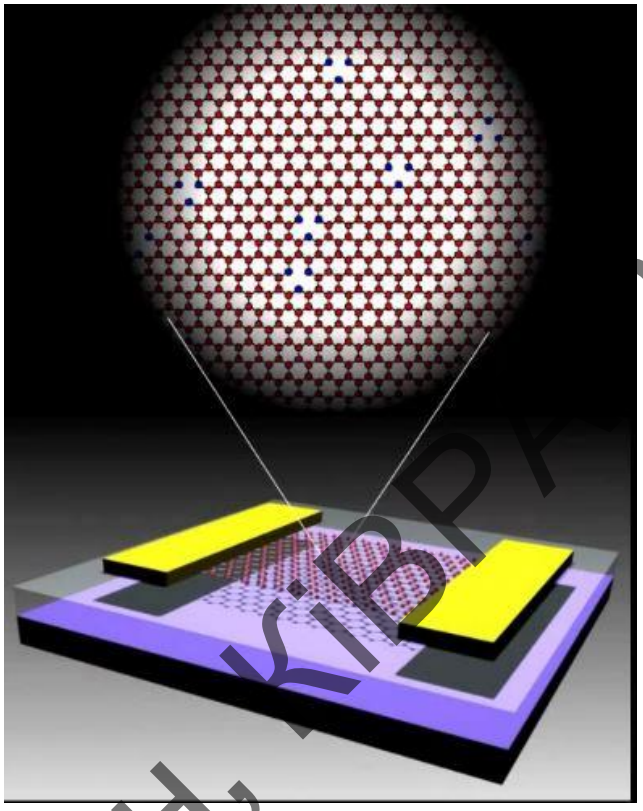


Рисунок 2.2 Графеновий транзистор з тунельною структурою

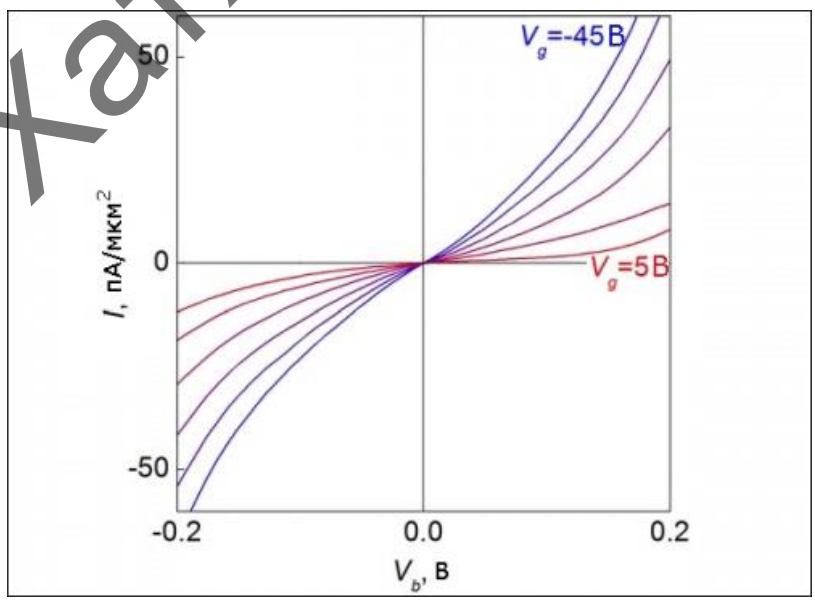


Рисунок 2.3 Вплив керуючої напруги транзистора, яке змінюється з кроком в 10 В, на величину тунельного струму

Д. В. Хатян, КВРА 2015

На думку авторів дослідження, транзистори нового типу дуже перспективні: вони здатні працювати на дуже високих частотах і вигідно відрізняються тим, що їх поперечні розміри можна знизити до ~ 10 нм [26]. Оскільки ніяких жорстких обмежень на величину відношення струмів у відкритому і закритому стані немає, в майбутньому, при оптимізації структури та використанні більш якісних діелектриків (заміні SiO2), вона також повинна помітно піднятися.

2.2 Перемикач на основі вуглецевих нанотрубок

Дослідники з університету Іллінойсу та університету Міннесоти в США представили прототип мікроелектронного логічного пристрою з рекордно низьким рівнем енергоспоживання. Використання вуглецевих нанотрубок в конструкції логічного перемикача дозволило довести необхідну для роботи пристрою потужність до декількох десятих часток нВт [27].

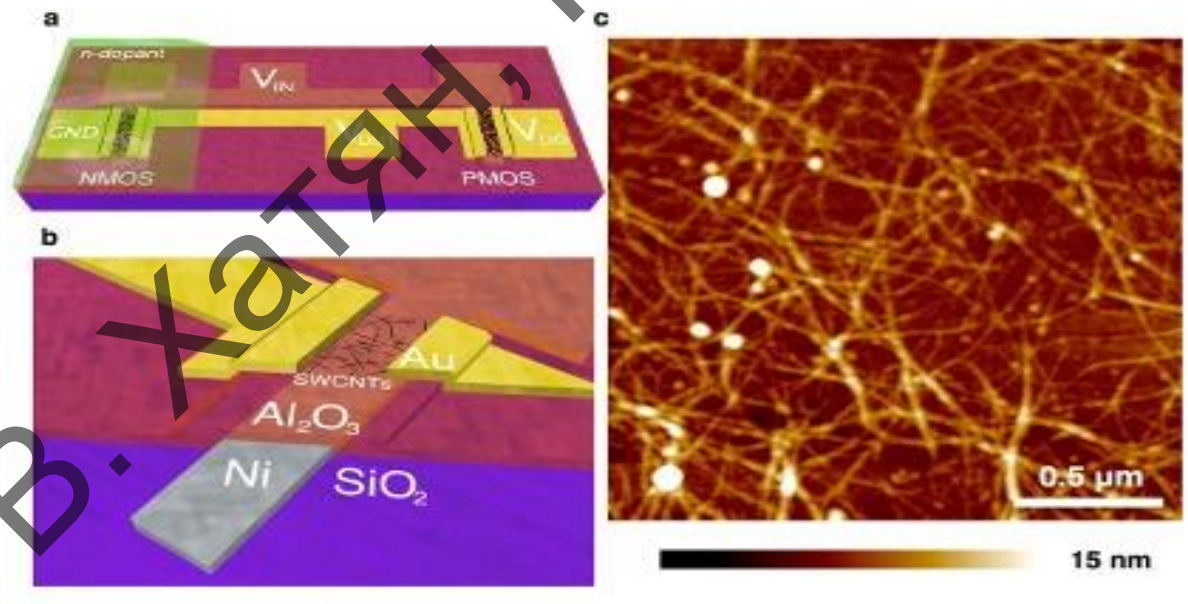


Рисунок 2.4 Інтегральна схема КМОП

Дослідники продемонстрували невелику інтегральну, виконану за схемою КМОП (рис. 2.4), побудувавши логічний інвертер на двох транзисторах. (а) Взявши ізолюючу підкладку з оксиду кремнію, вчені

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

розмістили на ній доріжки із золота та оксиду алюмінію, а потім помістили в проміжки між ними вуглецеві нанотрубки для створення транзисторних затворів (b). За винятком цих елементів увесь інший чіп був виготовлений стандартними методами на зразок пошарового атомного осадження (c), тому, як пишуть автори прототипу, йдеться не про абсолютно новій елементній базі, а про розширенні вже існуючої технології [28].

Виміри показали, що пристрій в статичному (тобто при перебуванні його в одному з двох станів, «закритому» або «відкритому») режимі споживає близько однієї десятої частки нВт: цей показник підтвердився і при випробуванні більш складних логічних пристроїв, що поєднують інвертер з логічними елементами «І» та «АБО». В момент перемикання, тобто на піку потужності, споживання енергії досягло десяти нВт: чіп з мільярдом таких елементів витратить близько десяти Вт в припущенні, що потужність витрачається тільки на перемикання логічних елементів і не розсіюється за рахунок електричного опору провідників.

На думку дослідників, це дозволяє говорити про практичну реалізованость мікроелектроніки з використанням нанотрубок, причому в рамках найбільш широко використовуваної схемотехніки [29]. КМОП-схеми набули широкого поширення в 90-і роки XX століття і зараз на їх основі виконана велика частина комерційних пристроїв. Основними перевагами КМОП (скорочення від «комплементарний металооксидний напівпровідник») є низьке енергоспоживання і технологічність виробництва; описаний в новій роботі прототип дозволяє ще більше знизити енергоспоживання, зберігши при цьому можливість масового виробництва.

На електроди, з'єднані з кожною нанотрубкою, було подано певну напругу. Одна нанотрубка («витік») була заземлена, тоді як друга («стік») була додатньо заряджена [30]. Третя нанотрубка, яка розташовувалася близько до стоку, служила в якості затвора. При підвищенні напруги на затворі сила електростатичного відштовхування приводила до відхилення нанотрубки «стоку» у бік нанотрубки «витоку». При їх зіткненні через

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

пристрій починав протікати струм.

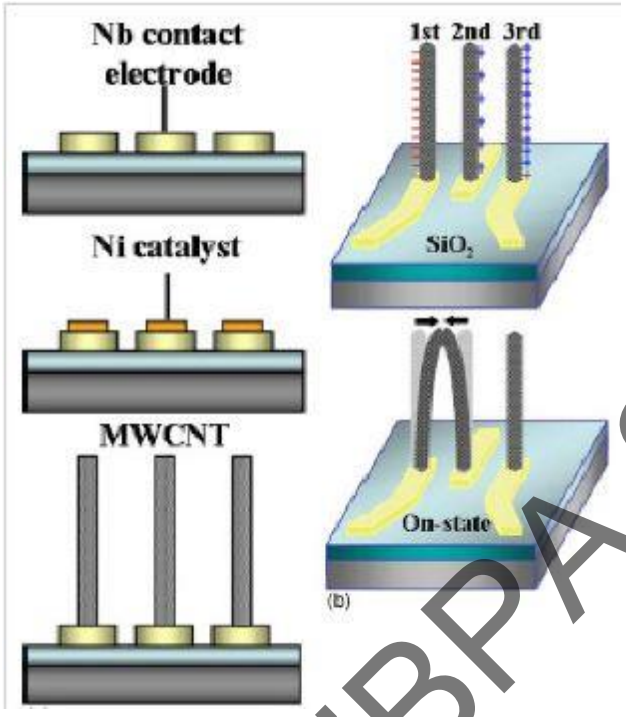


Рисунок 2.5 Схема наноперемикача

В залежності від довжини нанотрубок, вони можуть продовжувати залишатися в замкнутому стані (через сили Ван дер Ваальса) або розімкнуться, коли напруга на затворі стане менше порогової (рис. 2.5).

2.3 Комп'ютер на вуглецевих нанотрубках

Вчені зі Стенфордського університету створили прототип першого повного по Тьюрингу комп'ютера на вуглецевих нанотрубках. Створення прототипу стало можливим завдяки одночасному використанню двох підходів: розробці нової технології орієнтування нанотрубок на підкладці і сильному спрощенню логічної архітектури пристрою. При цьому після нанесення нанотрубок на підкладку учені спочатку видаляли ті з них, які володіли металевими, а не напівпровідниковими властивостями, і тільки потім формували транзистори [31]. Середній розмір останніх становив близько 8 мкм (рис. 2.6).

Мініатюризація електроніки — головна рушійна сила комп'ютерної

Д.В. Хатян, КіВРА 2015

революції, вона дозволила добитися нинішньої потужності та енергоефективності комп'ютерів. І хоча прогрес в кремнієвих мікросхемах ще триває, але з'являються і більш досконалі технології виробництва електроніки (рис. 2.7).

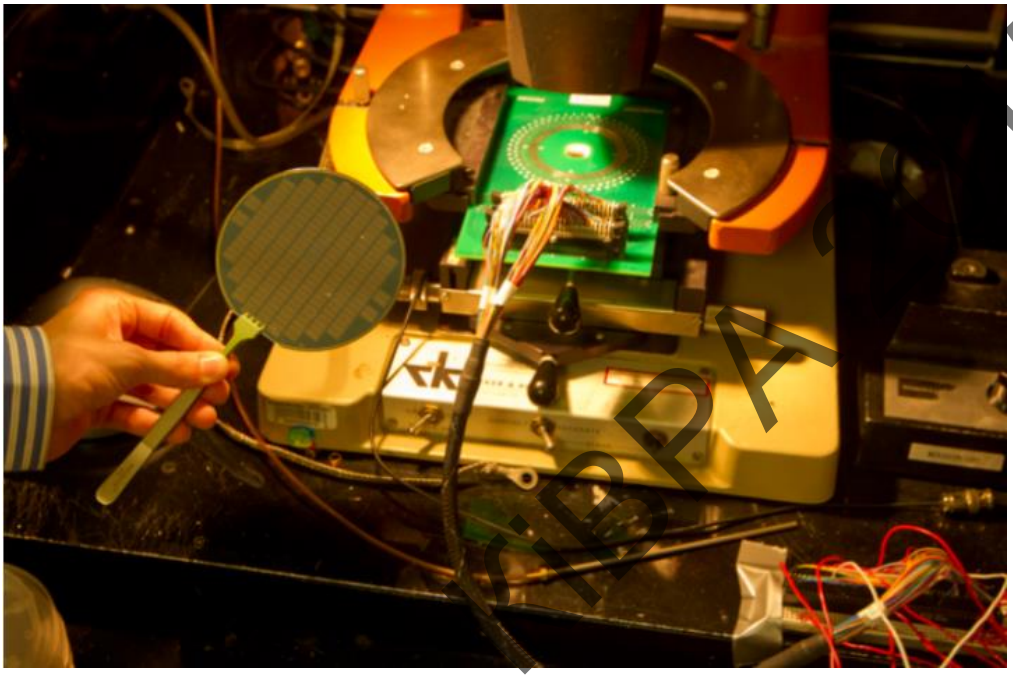


Рисунок 2.6 Комп’ютер на базі процесора із вуглеводних нанотрубок

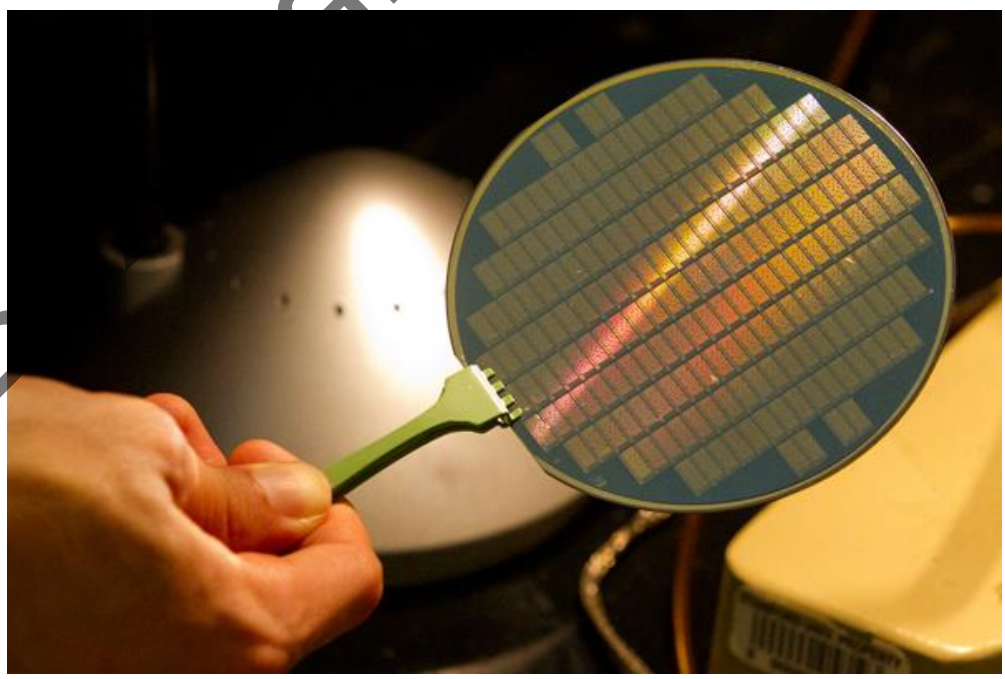


Рисунок 2.7 4 — дюймова пластина містить мікропроцесори із вуглецевих нанотрубок

Постійна робота над зменшенням розмірів логічних елементів в мікросхемах була і досі залишається головним напрямком розвитку напівпровідникової промисловості. Саме вона лежить в основі зростання продуктивності та підвищення енергоефективності чипів кожного нового покоління [32]. Очевидно, це не може тривати нескінченно в силу технічних причин і фізичних обмежень.

Віце-президент компанії Intel і директор відділу технічних досліджень Майкл Мейберрі (Michael C. Mayberry) зазначає, що новим бар'єром стане техпроцес з нормами 7 нм. Перейти на більш тонкий завадять вже недоліки самого кремнію. Єдиний вихід — використовувати замість нього щось інше.

Уже багато років особлива увага приділяється штучно створюваним напівпровідниковим матеріалам, здатним замінити кремній у мікросхемах. З появою нанотехнологій вуглецеві нанотрубки (ВНТ) стали розглядатися в якості однієї з найбільш перспективних структур для мікроелектроніки. Однак до цього дня всі пов'язані з ними наукові роботи були демонстраціями одиничних елементів [33].

Групі під керівництвом ад'юнкт-професора Субхасіша Мітри (Subhasish Mitra) вдалося домогтися перших практичних результатів. Сорок чотири роки пройшло між появою першого кремнієвого мікротранзистора і його більш досконалого аналога вуглецевої природи. Ще п'ятнадцять років знадобилося на доопрацювання технології виробництва ВНТ та об'єднання розрізнених елементів з них в логічну схему — процесор, злегка перевершує за своїми можливостями рівень концепції (рис. 2.8).

Такий довгий період був зумовлений низкою складних проблем, головною з яких стали властивості самих ВНТ. Формально вуглецеві нанотрубки — напівпровідник, але в реальному макрообразі завжди виходить домішка нанотрубок з властивостями провідника. До того ж у процесі їх виробництва вкрай важко домогтися відсутності бічних розгалужень і впорядкованого розташування, однорідності їх розмірів і структури. Порушення взаємної орієнтації створюють паразитні з'єднання, а довжина і

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

структура прямо впливають на фізичні властивості [34].

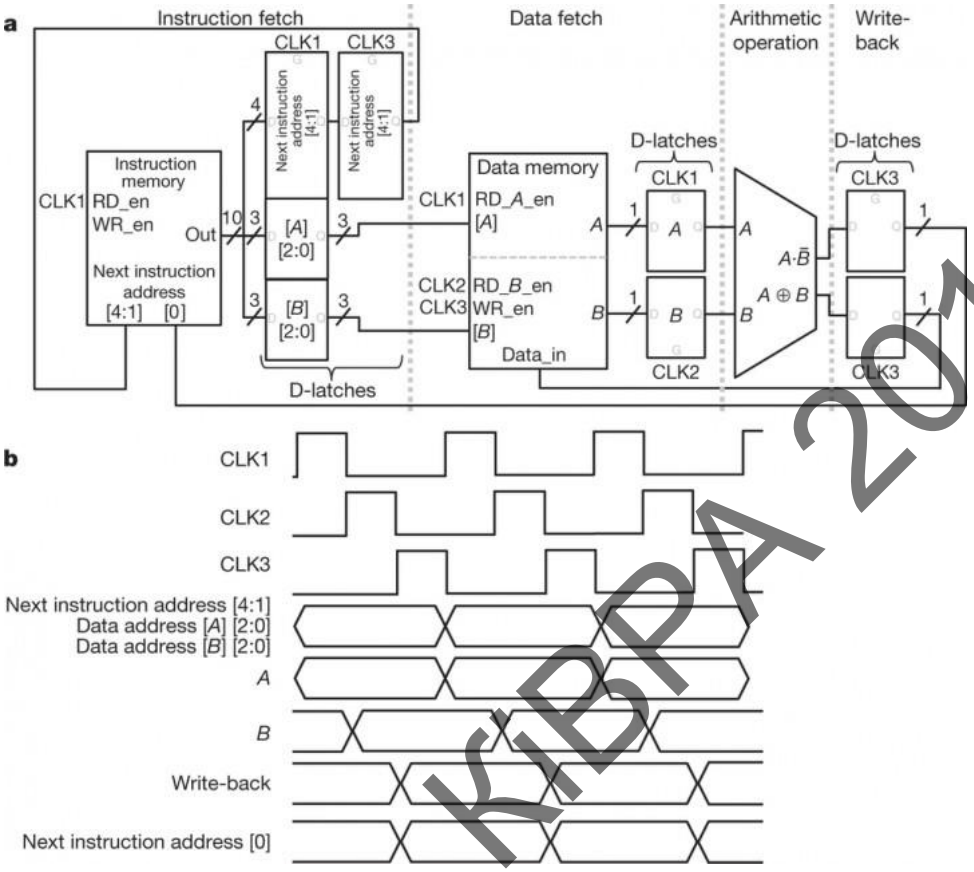


Рисунок 2.8 Схема процесора з вуглецевих нанотрубок

Колектив зі Стенфордського університету вирішив тимчасово пожертвувати розміром транзисторів заради перевірки самої ідеї створення процесора з ВНТ. Для експерименту було вибрано нанотрубки діаметром близько десяти нанометрів. Такий розмір зіставимо з роздільною здатністю сучасного обладнання для фотолітографії, однак при інших рівних ВНТ володіють більшою рухливістю електронів, забезпечуючи кращу енергоефективність.

Для підвищення однорідності зразка та збереження впорядкованості розташування нанотрубки вирощували на підкладці з кварцу. Потім на місце кожного майбутнього транзистора помістили їх суміш, яка містить сотні вуглецевих нанотрубок з властивостями провідника і напівпровідника. Далі дефектні ВНТ, що володіють занадто високу електропровідність, випалювали струмом певної сили, величина якої підбиралася емпірично. Провідний автор

Д. В. Хатян. КІВРА 2015

дослідження Макс Шулакер (Max M.Shulaker).

Досягнута таким чином ступінь чистоти зразка ВНТ була оцінена в 99,5%. Негативний вплив залишився одиничним дефектом нанотрубок, усунутий за рахунок адаптації програмного алгоритму. Зрештою кожен логічний елемент був сформований з 10 – 200 нанотрубок, що володіли тільки потрібними властивостями. З таких окремих елементів вдалося зібрати мікропроцесор, що складається зі ста сімдесяти восьми транзисторів [35].

В якості демонстрації багатозадачності на створеному процесорі одночасно виконувалися підрахунок і сортування цілих чисел. Критерій повноти по Тьюрингу (можливість реалізувати будь-яку обчислювана функція) був показаний на прикладі роботи логічної функції SUBNEG (рис. 2.9). Вона зчитує значення за однією адресою, віднімає його з числа, що зберігається за іншою адресою, і записує результат операції. Якщо він вийшов негативним, то процедура повторюється для числа з третього адреси.

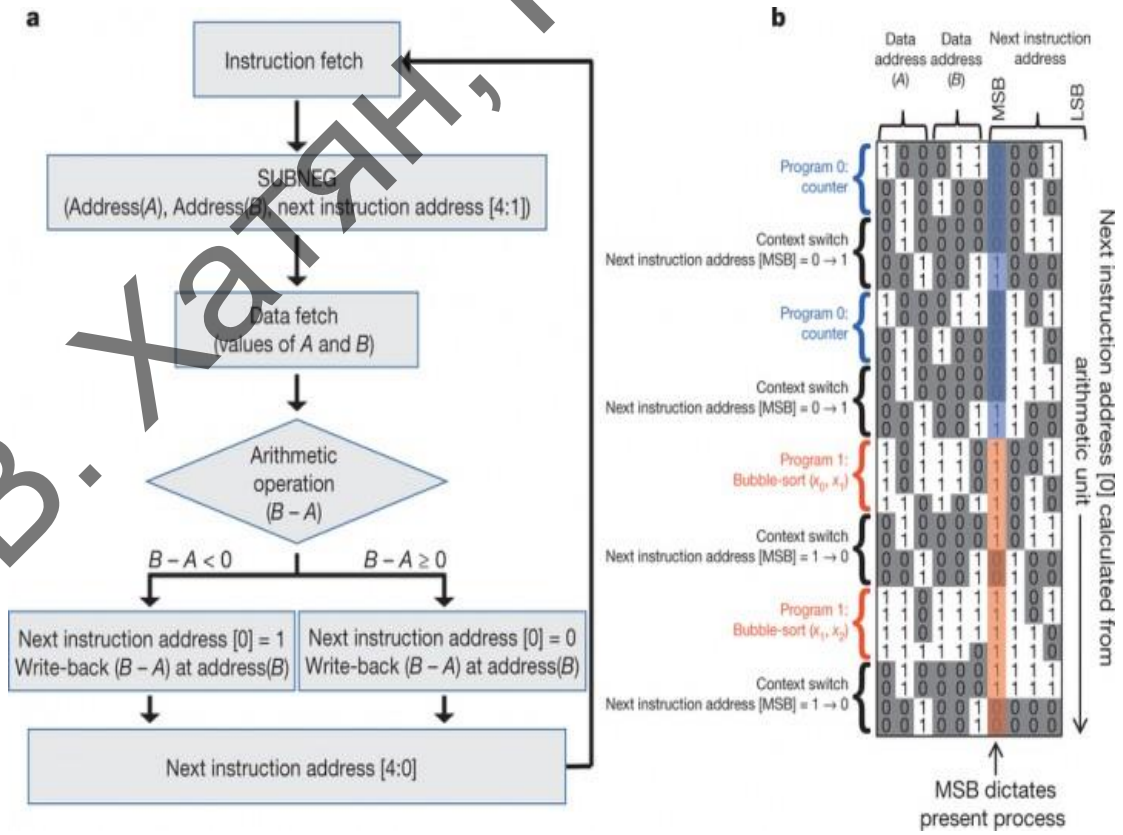


Рисунок 2.9 Алгоритм роботи функції SUBNEG і його реалізація на процесорі з ВНТ

Д. В. Хаїян, КІВРА 2015

Як і перші в історії лампові ЕОМ, цей процесор володіє зовсім слабкими технічними характеристиками і смішною продуктивністю. Фактично, він виконує арифметичні операції навіть повільніше, ніж чоловік.

Частота процесора всього 1 кГц (зате він двухпоточний). Але це все одно принципово важливе концептуальне досягнення, яке відкриває нову сторінку в історії комп'ютерної техніки [36].

Звичайно, поки розроблений процесор з вуглецевих нанотрубок — це всього лише демонстраційний зразок. Його тактова частота становить 1 кГц. Він не підтримує сучасні набори інструкцій (замість них реалізовано тільки 20 базових інструкцій MIPS для виконання цілочисельних операцій) і виконує лише одну логічну команду за такт (рис. 2.10).

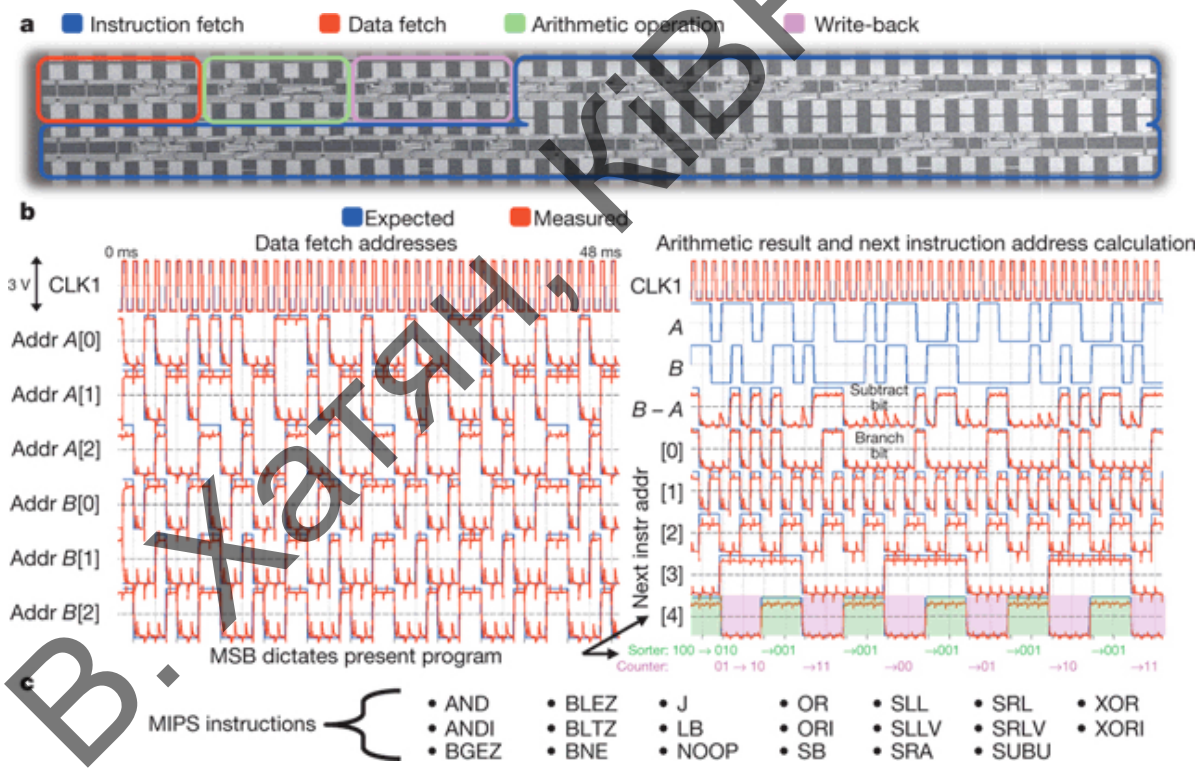


Рисунок 2.10 Виконання алгоритму “бульбашкового” сортування

2.4 Графеновий біосенсор

Вчені Тихоокеанської північно-західної національної лабораторії (Pacific Northwest National Laboratory) Міністерства енергетики США (Department of Energy) і Прінстонського університету (Princeton University) показали, що

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

одноланцюгова ДНК міцно зв'язується з графеном, наноматеріали з шару вуглецю товщиною в один атом. Вони також виявили, що графен захищає ДНК від руйнування ферментами, подібними до тих, які знаходяться в біологічних рідинах організму — особливість, яка робить ДНК-графенові біосенсори дуже довговічними. Вчені вивчають потенціал наноматеріалів — найдрібніших частинок розміром в одну мільярдну частину метра — кілька десятиліть [37]. Все більша кількість дослідників фокусують свою увагу на графені, так як він проявляє властивості надпровідності, виключно готується і має велику площу поверхні. У порівнянні з іншими наноматеріалами, такими як вуглецеві нанотрубки, його легше одержувати і використовувати. Нанотехнології можуть допомогти у створенні нових лікарських препаратів, засобів їх доставки і в розробці діагностичних біосенсорів.

ДНК-графеновий біосенсор визначає хвороби, «відловлювання» пов'язані з ними молекули. Як черв'яка на гачок, вчені поміщають на шматочок графена ДНК гена, що вносить вклад у розвиток захворювання. Тоді вони опускають «гачок» біосенсора у досліджувану кров, слину чи іншу рідину організму. Якщо ДНК викликав хвороба гена знаходиться в рідині і «хапає приманку», біосенсор видає сигнал, що виявляється вченими. Дволанцюжкова природа ДНК наших генів робить таку «риболовлю» цілком можливою. Нормальна дволанцюжкова ДНК виглядає як гвинтові сходи. Але одноланцюгова ДНК нагадує гребінь: вона складається з послідовності букв ДНК, або азотистих основ, які стирчать з «хребта» макромолекули і шукають компліментарні їм підстави для утворення пари. Коли компліментарні послідовності одноланцюгової ДНК зустрічаються, пари основ утворюють ступені гвинтових сходів.

Щоб сконструювати ДНК-графеновий біосенсор, вчені повинні розуміти, як ДНК і графен взаємодіють один з одним. Щоб простежити за молекулами ДНК, вільно плаваючими в пробірці, Лін і його колеги, включаючи провідного автора Джівень Тана, прикріпили до них світяться флуоресцентні молекули. Потім вони змішали флуоресцирующе ДНК з

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

графеном. Вступивши в контакт з графеном одноланцюговим ДНК — тьмяніли [38]. Але яскравість дволанцюжкових ДНК при тих же умовах зменшувалася дуже незначно. Подальший аналіз за допомогою декількох спектроскопічних методів показав, що зв'язок графена з одноланцюговим ДНК набагато міцніше, ніж з її двухланцюговим. Учені навіть висловили припущення, що графен змінює структуру одноланцюгового ДНК. Щоб з'ясувати, чи можна розірвати зв'язок одноланцюгового ДНК з графеном, зробивши її двухланцюговим, дослідники додали просту одноланцюгову ДНК, що має компліментарну послідовність нуклеотидів. Помічені флуоресцентними молекулами одноланцюгові ДНК засвітилася яскравіше. Це означало, що спочатку містяться в рідині одноланцюгової молекули з'єдналися з доданими комплементарними ланцюгами і утворили дволанцюжкові ДНК, що відокремилися від поверхні графену.

Потім учені перевірили, як одноланцюгова ДНК на поверхні графену взаємодіє з «партнерами». Вони помістили ДНК-графенові біосенсори в дві різні пробірки. В одну вони додали компліментарну ланцюжок, підстави якої ідеально підходили в ланцюжку ДНК, вже пов'язаної з графеном. В іншу — компліментарну ланцюжок, в якій одна підстава не відповідало оригінальної ланцюжку ДНК на поверхні графену. Після введення компліментарної ДНК обидві пробірки стали світитися сильніше. Але світло з пробірки з ідеально відповідними один одному ланцюжками був в два рази яскравіше, ніж з пробірки зі злегка незбіжними ДНК. Здатність розпізнавати мішені-ланцюжки ДНК в межах невідповідності одного нуклеотиду — звана високою специфічністю — повинна зробити ДНК-графенові біосенсори більш точними, ніж інші, звичайні лінійні біосенсори, вважають учені. Дослідники також дійшли висновку, що графен допомагає зробити ДНК більш стійкою. Вони помістили в пробірки два види одноланцюгових ДНК — один був пов'язаний з графеном, а інший вільно плавав в рідині. Потім вони додали ДНК — руйнує ДНК фермент — в обидві пробірки і виявили, що вільні ланцюжка ДНК зруйновані, в той час як ДНК-графенові

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

наноструктури залишаються інтактними протягом як мінімум 60 хвилин. Вчені припускають, що такий захист робить ДНК-графенові платформи дуже підходящими для візуалізації та доставки генів в організм пацієнта.

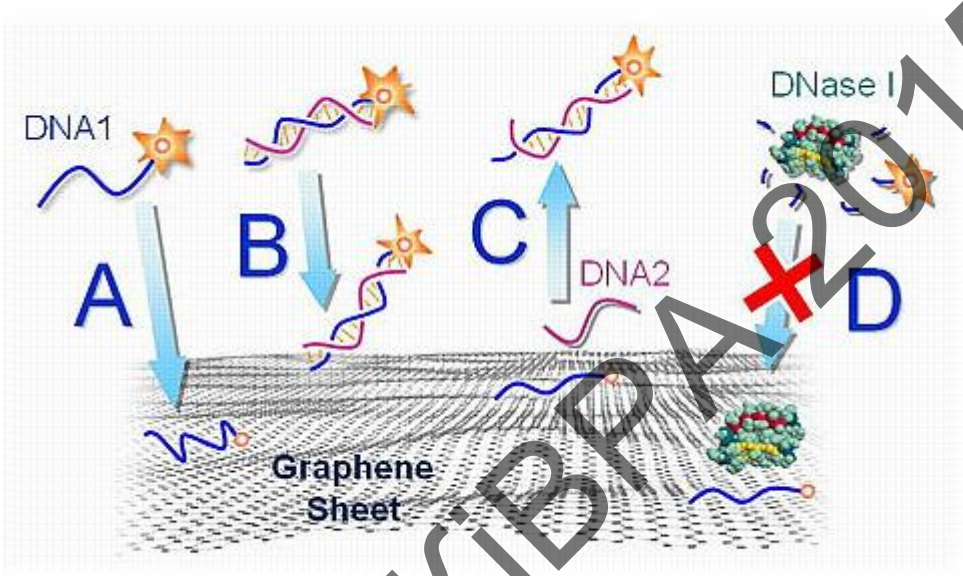


Рисунок 2.11 Взаємодія молекул ДНК

Ілюстрація того, як помічені флуоресцентні молекулами ДНК взаємодіють з функціоналізованим графеном (рис. 2.11). Як одноланцюгове (A), так і дволанцюжкове ДНК (B) адсорбуються на поверхні графену, але взаємодія з одноланцюжковим ДНК сильніше, що призводить до більш вираженого ослаблення флуоресценції. C) Компліментарна ДНК наближається до одноцепочечной ДНК і змушує адсорбовану одноланцюгову ДНК відокремитися від поверхні графену. (D) Адсорбована на графені ДНК захищена від руйнування ферментами [39].

За словами глави проекту, професора Мухаммада Алама (Muhammad A. Alam), особливість проекту полягає в поєднанні двох біосенсорів механічного та електричного типу. Кожен з цих сенсорів має обмежену і досить посередню чутливість, в той час як поєднання дозволяє домогтися величезного (в сотні разів) приросту чутливості при одночасному появі

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

нових унікальних властивостей. Механічний сенсор, що входить в структуру Flexure-FET, ідентифікує біологічні зразки за масою і розміром молекул, в той час як електричний сенсор "пізнає" молекули по їх електричного заряду. Таким чином, новий сенсор може працювати з зарядженими і незарядженими молекулами, знаходячи застосування в широкому спектрі медичних програм, з недоступною досі точністю діагностики.

Схематично – механічна частина нового сенсора Flexure-FET являє собою закріплений з одного боку гнучкий кронштейн з посрібленим кремнію — такий собі трамплін для стрибків у воду, габарити якого вимірюються нанометрами. Під "трампліном" розміщується спеціальний польовий транзистор, який грає роль електричного датчика системи (рис. 2.12).

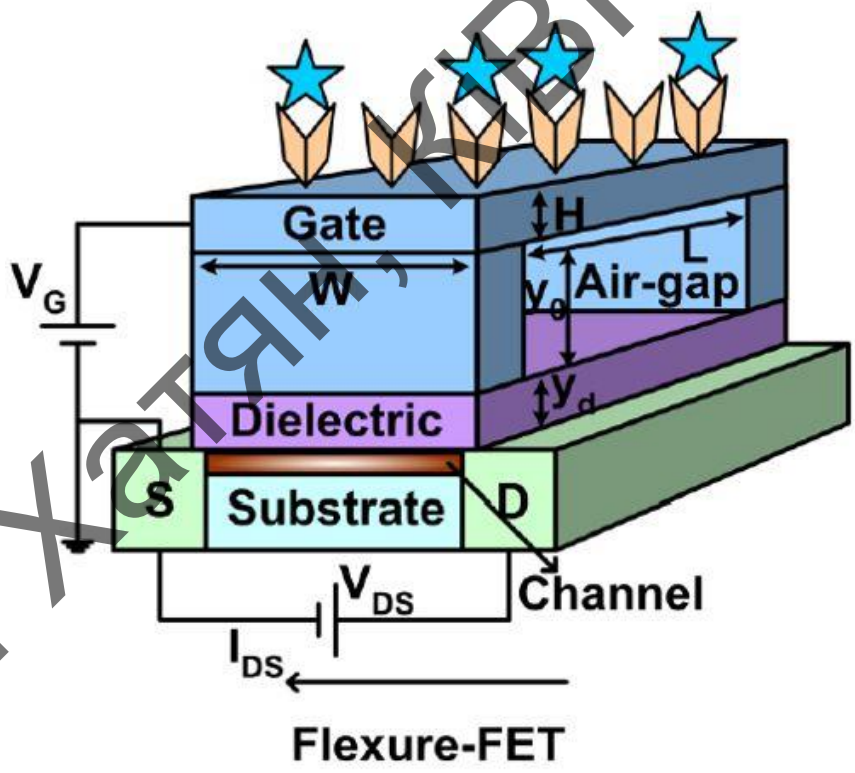


Рисунок 2.12 Схема сенсора Flexure-FET

На відміну від звичайних механічних біосенсорів, де частота вібрації кронштейна або його відхилення, різні для різних типів молекул, заміряються за відхиленням лазерного променя, в комбінованій нелінійної електромеханічної системі Flexure-FET (рис. 2.13) вимірами вібрацій або

Д. В. Хатян, КВРА 2015

відхилень займається той самий польовий транзистор. Експоненціальна чутливість системи досягається за рахунок створення додаткового електричного поля напругою зсуву. Така "попередня деформація" зв'язки механічного та електричного сенсорів значним чином відбивається на збільшенні чутливості установки в цілому.

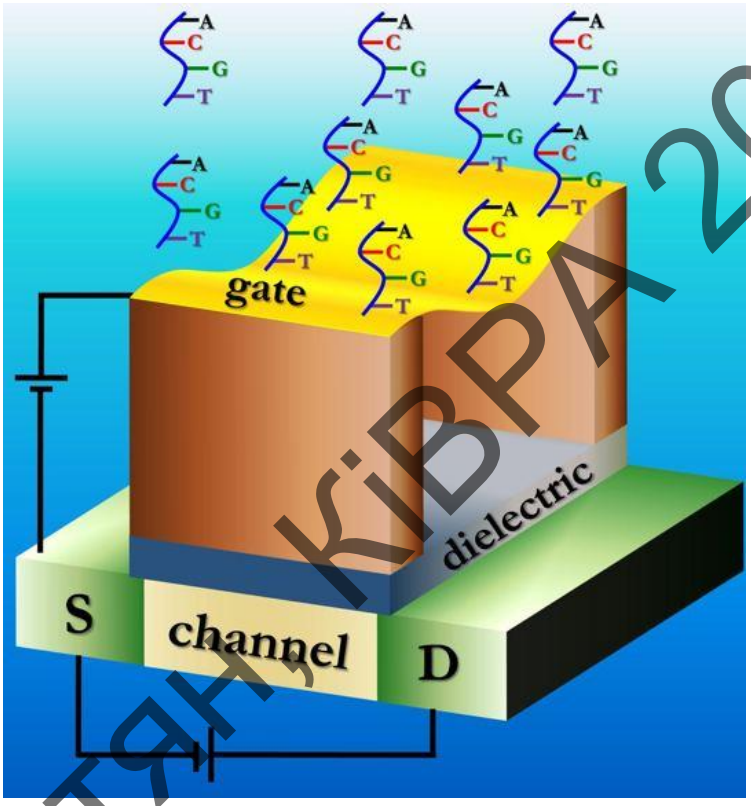


Рисунок 2.13 Схема сенсора Flexure-FET

При ідеальній налаштування системи (рис. 2.14), за словами розробників, можна домогтися правильного розпізнавання майже будь-якої молекули. Крім того, відсутність необхідності у використанні традиційного компонента всіх електричних біосенсорів під назвою "референсний електрод", який не дуже то піддається мініатюризації, дозволить у майбутньому створювати компактні і досить недорогі при масовому виробництві пристрої для повсякденного діагностики. В даний час новому надчуттєвому біосенсору передрікають дві ключові сфери застосування. Перша — це персональна медицина, той самий "особистий лікар" у вигляді браслета на зап'ясті, здатний не тільки визначати, а й зберігати інформацію

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

про білки і ДНК пацієнта. Такий пристрій дозволить домогтися більш точної і правильної діагностики, а також вчасно підкаже, коли і з якого приводу звертатися до фахівця в поліклініці. До речі, це додаток для гаджетів буде дійсно корисним і, впевнений, широко затребуваним у всьому світі.

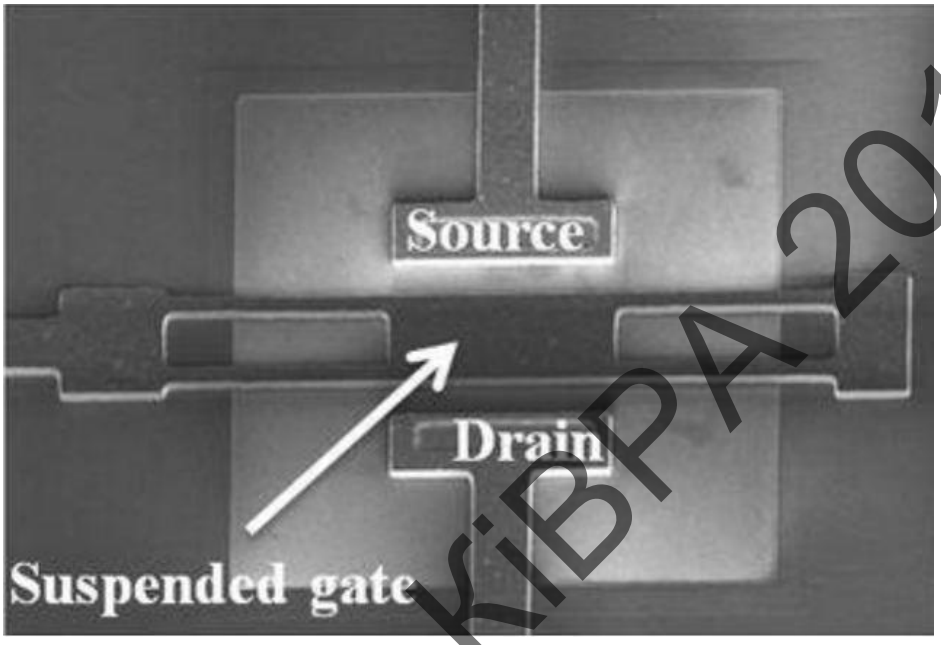


Рисунок 2.14 Конструкція біосенсора Flexure-FET

Друга сфера застосування біодатчиків Flexure-FET — це раннє виявлення ракових захворювань і будь-яких інших хвороб, особливо з непростим лікуванням на пізніх стадіях і зі складною діагностикою. Справа в тому, що такий біодатчик робить можливим ранню діагностику раку, коли кількості фрагментів ДНК і білків, вже деформованих раковими клітинами, занадто мало для інших методів дослідження. Зрозуміло, біодатчик "особистого лікаря" також може бути налаштований на діагностику різних типів ракових захворювань. Зрозуміло, в публікаціях подібного роду практично ніколи не йдеться про терміни початку масового виробництва таких винаходів [40]. Однак по суті в конструкції біодатчиків Flexure-FET немає нічого нереалізованого на сучасному етапі розвитку технологій: мікродатчиків (MEMS) подібного роду роблять давно, тим більше польові транзистори. Так що від усієї душі побажаємо цьому пристрою швидкої і

Д.В.Хатян, КІВРА 2015

успішної комерційної реалізації, завдяки йому можна запросто запобігти безлічі передчасних смертей і непотрібних мук.

2.5 Електронні пристрої на основі вуглецевих нанотрубок

Як активна частина електронних пристроїв, ВНТ були використані для контролю їх електричних властивостей. Таким чином, вуглецеві нанотрубки можуть реалізовувати електронні пристрої, такі як діоди, транзистори, випрямлячі Шоткі, суперконденсатори, сонячні батареї і органічні світловипромінюючі діоди, шляхом об'єднання напівпровідникових і металевих властивостей. Різні стратегії і топологій були запропоновані з метою поліпшення їх продуктивності. Транзистори і випрямлячі Шоткі можуть бути отримані за допомогою металевих напівпровідникових переходів [41].

В цьому розділі аналізуються експлуатаційні характеристики, топології і додатки електронних пристроїв, виготовлені за допомогою вуглецевих нанотрубок з акцентом на VLSI. Це пояснюється тим, що вибір матеріалу має вирішальне значення для успішного застосування з високим виступом в електронних пристроях, таких як польові транзистори, p-n діоди, суперконденсатори, сонячні елементи і органічні світловипромінювальні діоди.

Розвиток ВНТ в польових транзисторах (CNFETs) було обумовлено історичною мотивацією, знизити або зробити незначну дію короткого каналу та для поліпшення продуктивності транзисторів в цих масштабах довжини. Використання напівпровідникових ВНТ є стратегічним, враховуючи, що металеві нанотрубки не можуть бути повністю відключені. Основні переваги цього типу транзисторів: балістичний електронний транспорт протягом його довжини, більш висока щільність струму, низьке енергоспоживання по кремнієвій версії і більш висока швидкість роботи. Існують чотири основних топології проектувати ВНТ польових транзисторів: 1) назад закритого CNTFETs, 2) наверх закритого CNTFETs, 3) оберніть навколо CNTFETs, 4)

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

підвісні CNTFETs (рис. 2.15).

У разі зворотніх закрито CNTFETs, основні недоліки, знайдені для його використання є “бідними” контактами між діелектриком затвора і ВНТ, важке перемикання між станами включення і виключення, коли низька напруженість, бар'єр Шоткі між ВНТ і стоком. У разі топ закритого CNTFETs, вони мають ряд переваг в порівнянні з бек закритого типу CNTFETs, але це процес виготовлення є більш складним.

У разі зважених CNTFETs шукається скорочення між підкладкою і оксидом затвора, і тому, він зменшує розсіювання на інтерфейсі ВНТ-підкладки з недоліком обмежує його використання в додатках, де високі ставлення ON / OFF потрібні [42].

В CNTFETs можуть бути класифіковані в два типи: CNTFETs 1) n-типу, коли електрони є основними носіями для додатніх напружень на затворі і 2) CNTFETs p-типу, коли отвори будуть збільшувати кількість носії для від’ємних напруг на затворі.

Чотири електричні режими транспортування можуть бути знайдені в транзисторах на основі вуглецевих нанотрубок, які відрізняються, відповідно до довжини нанотрубки в порівнянні з їх довжиною вільного пробігу і за типом контакту між нанотрубками та витоком / стоком металу: 1) омічного контакту, коли впорскування заряду реалізується витоком і стоком контактів в вуглецевих нанотрубоках і навпаки, виробляючи великий потік; 2) омічний контакт дифузна, коли двонаправлений перенос заряду страждає розсіюванням між джерелом і ВНТ з обмеженим потоком; 3) бар'єру Шоткі дифузна, коли поєднання напруг затвору і стоку, зменшує бар'єр Шоткі і переносить заряд.

В даний час, на основі ВНТ польові транзистори (FETs) мають експлуатаційні характеристики, які співставні з тими пристроями, які на основі кремнію. Активною частиною в польових транзисторах є електричний канал, який встановлюється за допомогою вуглецевої нанотрубки в підкладці з'єднувальних каналів між витоком і стоком.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

При температурі навколишнього середовища, напівпровідникові ВНТ в цілому показують однополярну поведінку p-типу. За додаванням калія, однополярну поведінку p-типу може бути переключено на одно полярну поведінку n-типу.

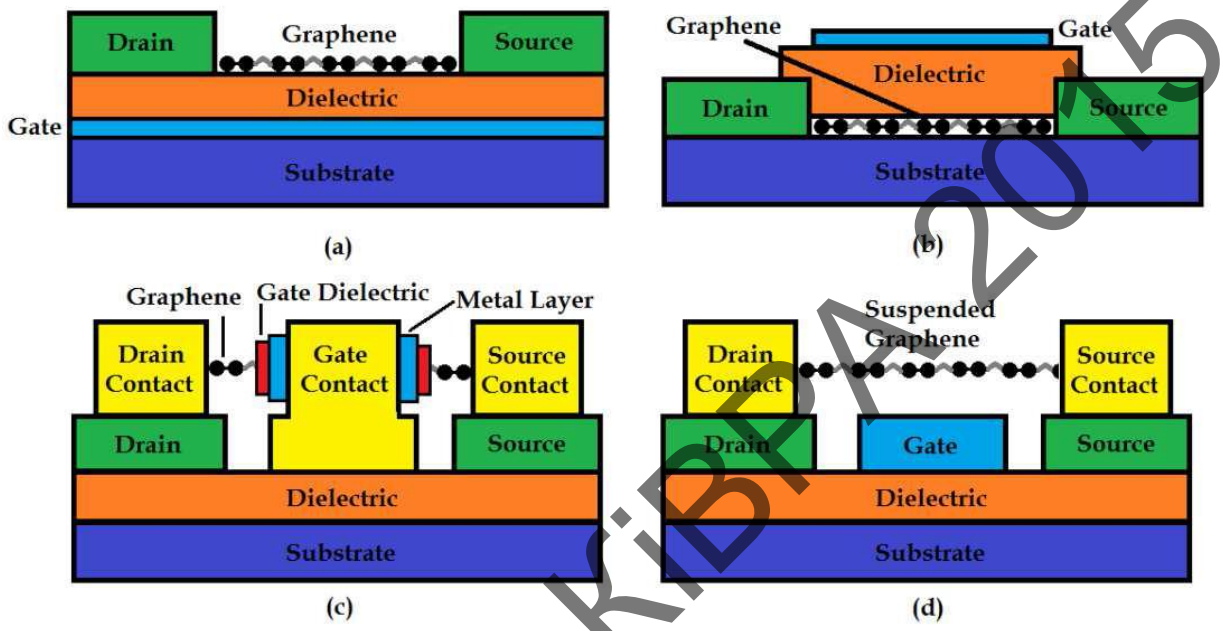


Рисунок 2.15 Перетини різних геометрій вуглецевих нанотрубок польових транзисторів: (а) назад закритого CNTFETs, (б) топ закритого CNTFETs, (в) оберніть навколо CNTFETs, (d) підвісні CNTFETs

В суперконденсаторах є електрохімічний конденсатор з відносно високою щільністю енергії, малий розмір і вага (в сотні разів більше, ніж у електролітичних конденсаторів).

Вуглецеві нанотрубки з керамічних матеріалів можуть бути використані для створення суперконденсаторів з гетерогенних плівок. Використання керамічних матеріалів дозволяє збільшити їх електричну енергію. Суперконденсатори мають електроди з великою площою поверхні, які можуть бути отримані за допомогою наборів вуглецевих нанотрубок, що діють як електричні провідні мережі. Ці електроди повинні бути здатні підтримати високу потужність і щільність енергії, з пониженим внутрішнім електричним опором.

Гнучка електроніка стала тепер реальністю завдяки успішному розвитку

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

органічної електроніки, працюючи в низькому температурному режимі. Такі пристрої, як органічні тонкі транзистори (OTFTs), дисплеї великої площи, сонячні батареї, органічні світловипромінюючі діоди (OLED) і датчики можуть бути реалізовані на основі ВНТ. Електричні властивості поліпшені з використанням вуглецевих нанотрубок. В транзистора поліпшені шпаруватість, порогова напруга і крутизна [43]. ВНТ можуть бути використані для виготовлення прозорих тонких плівок, які використовуються як отвір вприскування електродів для органічних світловипромінювальних діодів (органічні світлодіоди) або для жорсткого скла або гнучких підкладок. Використання ВНТ в полімерних матрицях для розробки світлодіодів дозволяє змінити електричні характеристики полімеру завдяки тому, що ВНТ працюють як “допінг” матеріали.

Інтеграція гібридних матеріалів, що утворюють гетеропереходи дозволяє поліпшити ефективність сонячних батарей за допомогою зменшення внутрішнього опору, яка безпосередньо пов'язано з фактором заповнення, транспортування і розділення зарядів, які є корисними для оптимальної продуктивності.

Якщо вуглецеві нанотрубки використовуються як прозорі електроди в сонячних елементах, то вони збирають електричні носії заряду. Основною стратегією є використання декількох нанотрубок, що працюють паралельно або індивідуально є контроль струму, що йде від мкА до мА. Таким чином, це дуже корисно для розробки методологій для виробництва масивних нанотрубок з хорошими характеристики з метою отримання високопродуктивних додатків.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ

1. Розглянуто пристрої обробки сигналів, а саме вертикальний графеновий транзистор, перемикач на основі ВНТ, комп’ютер на ВНТ, графеновий біосенсор та електронні пристрої на основі ВНТ.

2. Визначино основні переваги та недоліки даних пристроїв.

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТИПОВОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Періодичні наноелектронні структури. Надґрати

До просторово – періодичних структур з квантовими розмірами (період сумірний з довжиною хвилі електрона) відносять природні структури — кристалічні ґрати твердих тіл, а також штучні — напівпровідникові надґрати (НҐ). Кристалічні грати утворені періодично розташованими в їх вузлах атомами або молекулами [44, 45]. НҐ — періодично – шаруваті структури, які складаються з шарів напівпровідників завтовшки 10…100 нм і відмінною шириною забороненої зони. Ці структури становлять основу наноелектронних напівпровідникових пристроїв обробки сигналів. Особливості проектування наноелектронних пристроїв пов’язані з аналізом і синтезом НҐ з складним потенціалом і заданими характеристиками. НҐ застосовують в лазерах (як активну область), оптичних перемикачах, резонансних тунельних транзисторах та інших приладах.

Традиційно для моделювання квантово–механічних структур використовують матричну модель зшиванням рішень в середовищах з різними властивостями. В введено поняття імпедансу для квантово – механічної хвилі. Ця модель вносить важливий фізичний зміст, має значну спільність, як заснована на імпедансі, дозволяє скористатись апаратом теорії ліній передачі й спростити моделювання. Незважаючи на явні переваги, такий підхід до вирішення квантово – механічних задач не одержав поширення.

НҐ — періодичні багатошарові структури, в яких періодичний потенціал кристалічних ґрат додатково просторово модульований потенціалом цієї структури. Ширина потенціальних бар’єрів НҐ — тунельна, що забезпечує свободу руху електронів по нормалі до шарів. У НҐ типу квантових проводів рух електронів обмежений у двох напрямах і вільний у третьому.

У НҐ типу квантових точок досягається тривимірна локалізація носіїв струму. Найбільш широке використання має НҐ на основі шарів GaAs і

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

$Al_xGa_{1-x}As$. Ширина забороненої зони AlGaAs збільшується зі збільшенням x. Потенціал такої НҐ сформований за рахунок різниці у ширині заборонених зон її шарів: вузькозонні шари GaAs розміщені між широкозонними AlGaAs з утворенням прямокутних квантових ям для електронів і дірок.

Штучна періодичність НҐ радикально змінює електронні властивості напівпровідника. Внаслідок тунелювання електронів крізь періодичні потенціальні бар'єри, утворені шарами AlGaAs, зонна діаграма однорідного напівпровідника розщеплюється на міні – зони. Положення і ширина міні – зон залежать від співвідношення товщин напівпровідникових шарів.

За рахунок сумірності періода НҐ і довжини електронної хвилі електрони виявляють хвильові властивості (мають місце квантові розмірні ефекти). У поодинокій потенціальній ямі електрон може знаходитися лише на одному з власних рівнів ями, які відповідають резонансу електронної хвилі (як і електромагнітної в резонаторі). У двобар'єрній структурі власні рівні потенціальної ями, розміщеної між бар'єрами, відповідають резонансному тунелюванню електронів, при якому коефіцієнт проходження дорівнює одиниці. Цей ефект є базовим для формування міні – зон. Він пояснюється компенсацією хвильових неоднорідностей на границях середовищ з різними властивостями полем стоячої хвилі. Таким чином, падаюча хвиля проходить ці межі як однорідне середовище.

Дослідження вхідних імпедасних характеристик квантово – механічних структур . На відміну від S – параметрів вхідні імпедансні характеристики не залежать від середовища на вході структури, що розширює можливості її аналізу і синтезу. Так, в результаті аналізу вхідних імпедасних характеристик двобар'єрних структур встановлено додаткові умови резонансного проходження хвиль крізь такі структури.

3.2 Імпедасна модель періодичної структури

На рис. 3.1 показано потенціальну залежність необмежених НҐ. Для спрощення перетворень квантово – механічний імпеданс бар'єра

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

пронормуємо до імпедансу потенціальної ями.

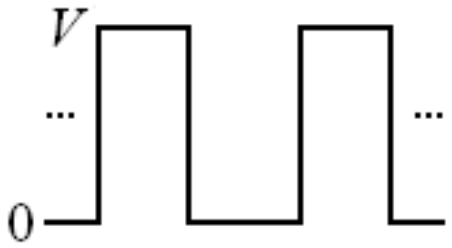


Рисунок 3.1 Потенціальна залежність необмежених НҐ. V — потенціальна енергія

Зручна, наочна модель НҐ — неоднорідна лінія передачі, утворена відрізками з хвильовими опорами $Z_{я,б}$, що відповідають потенціальній ямі і бар'єру (рис. 2). Значення $Z_{я,б}$ визначаються формулами $Z_я = 2\sqrt{2E/m_b}$ та $Z_б = 2\sqrt{2[E-V(x)]/m_a}$, де $m_{b,a}$ — ефективна маса електрона в області ями та бар'єра. При $E<V_0$ опір $Z_б$ уявний, що відповідає тунелюванню електрона. Розрахунок характеристик зводиться до знаходження вхідного опору лінії $Z_{вх}$ послідовним розрахунком вхідних опорів її відрізків, починаючи з крайнього правого. Знайдений вхідний опір використовується як опір навантаження наступного відрізка. Для спрощення розрахунків опори $Z_{я,б}$ нормують до $Z_я$. Коефіцієнти відбиття і проходження НҐ: $R=(Z_я - Z_{вх})/(Z_я + Z_{вх})$, $|T| = \sqrt{1-|R|^2}$.

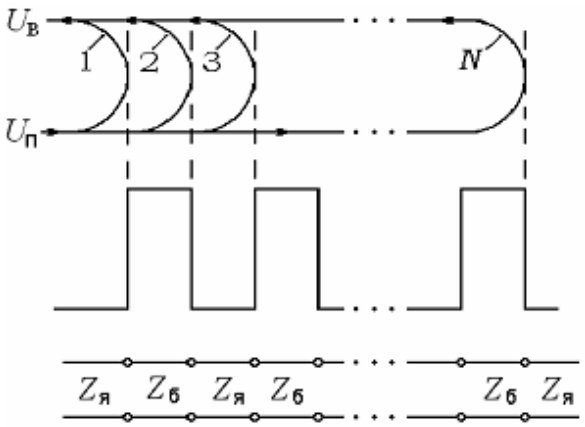


Рисунок 3.2 Модель неоднорідної лінії передачі. 1,…, N — хвилі, відбиті від границь бар'єрів

Д. В. Хатян. КІВРА 2015

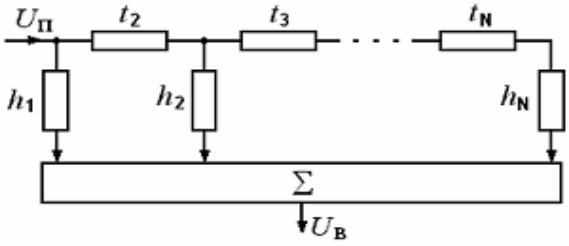


Рисунок 3.3 Модель ТФ. $t_2,\ldots,t_N$ — елементи затримки, $h_1,\ldots h_N$ — вагові коефіцієнти, N — кількість відводів

Якщо модуль коефіцієнта відбиття малий: $|R(E)|<<1$ (інтерференція слабких або деструктивна інтерференція сильних відбитих хвиль), достатньо враховувати тільки однократно відбиті хвилі від бар'єрів (при $E<V_0$) або від їх границь (при $E>V_0$). У цьому випадку НҐ можна моделювати трансверсальним фільтром (ТФ) (рис. 3). Падаюча хвиля розглядається як вхідний сигнал ТФ, який поширюється вздовж лінії затримки з відводами без втрат. Відводи забезпечують вибірку сигналу. При $E>V_0$ вагові коефіцієнти h_n прямо пропорційні модулю амплітудного коефіцієнта відбиття від n-ї границі бар'єрів. Вихідний сигнал ТФ (сумарна відбита хвиля НҐ) формується суперпозицією хвиль, відбитих від кожної границі (рис. 3.2).

Для періодичного ТФ з $h_1=\ldots=h_N$ та $T=1/f_0$, $H(f)=\mathrm{sinc}x$, де $x=N\pi(f-f_0)/f_0$; f_0 — середня частота. На рис. 3.4 наведено залежність модуля коефіцієнта відбиття від енергії електрона для НҐ, що відповідає такому ТФ.

Нормований імпеданс бар'єра дорівнює

$$Z_a=\sqrt{\frac{(E-V)m_b}{Em_a}},$$

де E — енергія електрона; $m_{a,\,b}$ — ефективна маса електрона, індекси «a» і «b» відносяться до бар'єра і ями.

Згідно [48] вхідний імпеданс на лівій межі бар'єра необмеженої кристалоподібної структури визначається співвідношеннями

$$z=\sqrt{\psi}+\mathrm{i}\eta,\ \psi=1-\eta^2-2\eta B^{-1},\ \eta=\frac{1-Z_a^2}{2(B^{-1}+\mathrm{i}Z_aA^{-1})},\qquad(1)$$

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

де $B = \mathrm{tg} k_b b$; $A = \mathrm{th}(\mathrm{i} k_a a)$, k_b і k_a — хвильові числа, $k_b = \sqrt{2 m_b E} / \hbar$, $k_a = \sqrt{2 m_a (E - V)} / \hbar$, b і a — ширина ями і товщина бар'єра; $\hbar = h / 2\pi$, h — постійна Планка.

При $E < V$ значення Z_a і k_a уявні, що відповідає реактивному за хвильовим характером середовищу і, відповідно, тунельному бар'єру.

Реальні НҐ — обмежені. Для аналізу обмежених НҐ скористаємося моделлю лінії передачі, в рамках якої бар'єр і яма моделюються відрізками лінії передачі з відповідними імпедансами.

3.3 Тестовий розрахунок

Посилаючись на Додаток Б було проведено тестовий розрахунок, з наступними даними: кількість бар'єрів — 5. Бар'єри і ями утворені шарами $Al_xGa_{1-x}As$ та GaAs завтовшки відповідно 6 та 10 товщин моношару GaAs у напрямку [100] (що дорівнює 2,82665). Ефективна маса електрона в області ями та бар'єра дорівнює відповідно $m_a=(0{,}0665+0{,}0835x)m_0$, $m_b=0{,}0665m_0$, де m_0 — маса електрона. Висота бар'єра $V_0=0{,}1$еВ. V_0 та x зв'язані співвідношенням $V_0=0{,}7731x$.

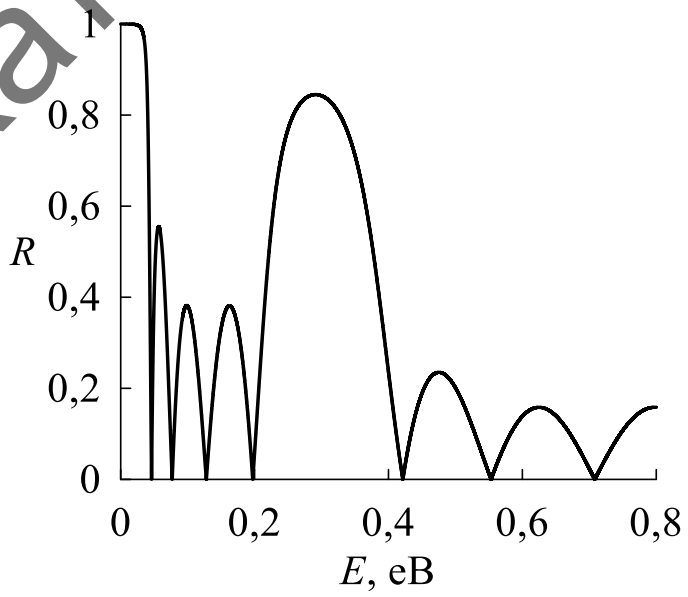


Рисунок 3.4 Залежність модуля коефіцієнта відбиття від енергії електрона для НҐ

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

3.4 Дослідження формування зонної діаграми напівпровідникових надґрат

3.4.1 Імпедансні характеристики необмежених надґрат

На рис. 3.5 наведено залежності активної і реактивної складових вхідного імпедансу згідно (1). Зазначимо, що знак реактивної складової в (1) відповідає знаку «+» фази в фазовому множнику прямої хвилі $\exp(\mathrm{i}kx)$, прийнятому в квантовій механіці. У реактивному середовищі (наприклад, в по-тенціальному бар'єрі при $E<V$) $k=\mathrm{i}|k|$ і $\exp(\mathrm{i}kx)=\exp(-|k|x)$ — амплітуда прямої хвилі експоненційно зменшується. Оскільки в теорії довгих ліній у фази прямої хвилі знак «–», при аналізі характеру реактивності реактивної складової вхідного імпедансу її знак необхідно змінити на протилежний.

Активна і реактивна складові дорівнюють 0. Присутні дві заборонені зони, друга заборонена більша ніж перша. Також є дві дозволені зони, друга дозволена більша ніж перша.

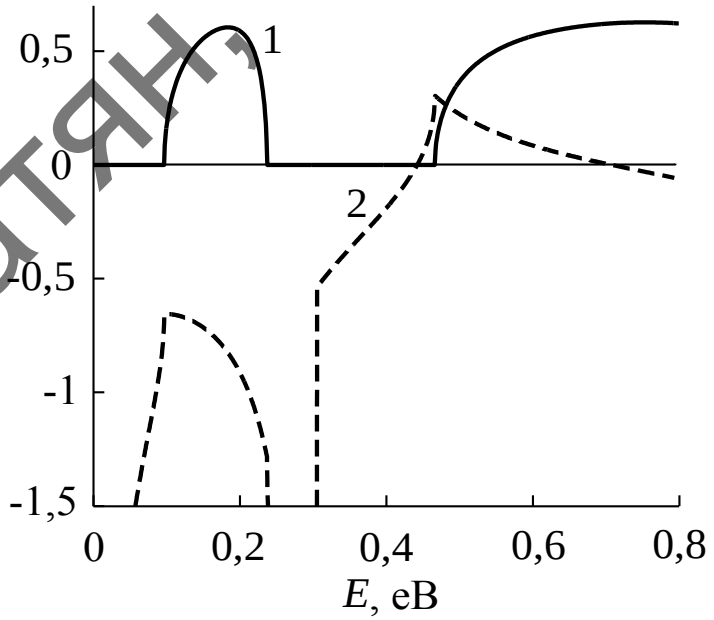


Рисунок 3.5 Залежності активної (1) і реактивної (2) складових вхідного імпедансу необмежених НҐ $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$

Залежність активної складової вхідного імпедансу ілюструє зонний характер хвильових властивостей НҐ. В заборонених зонах $\mathrm{Re}\,z=0$ (відповідно

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

$\psi \le 0$) і вхідний імпеданс уявний. В заборонених зонах хвильові властивості НҐ відповідають реактивному середовищу. В дозволених зонах $\mathrm{Re}\, z > 0$. Дозволені зони — зони резонансного проходження електронів (при $E < V$ — резонансного тунелювання електронів).

В межах значень $E \le V$ (що відповідає тунелюванню крізь бар'єри) реактивна складова вхідного імпедансу має ємнісний характер.

Коефіцієнт проходження в дозволених зонах дорівнює одиниці, а в заборонених — нулю. Таким чином, забезпечується максимально можливе співвідношення сигналів в цих зонах, що є ключовим для використання кристалоподібних структур в пристроях обробки сигналів.

3.4.2 Імпедасні характеристики обмежених надграт

На рис. 3.6 приведено залежності активної і реактивної складових вхідного імпедансу обмежених НҐ. Для порівняння штрих-пунктирною лінією показано залежності для необмежених НҐ. В дозволених зонах активна і реактивна складові вхідного імпедансу обмежених НҐ «пульсують» відносно залежностей необмежених НҐ. Як бачимо, границі зон необмеженої і обмеженої НҐ добре узгоджуються.

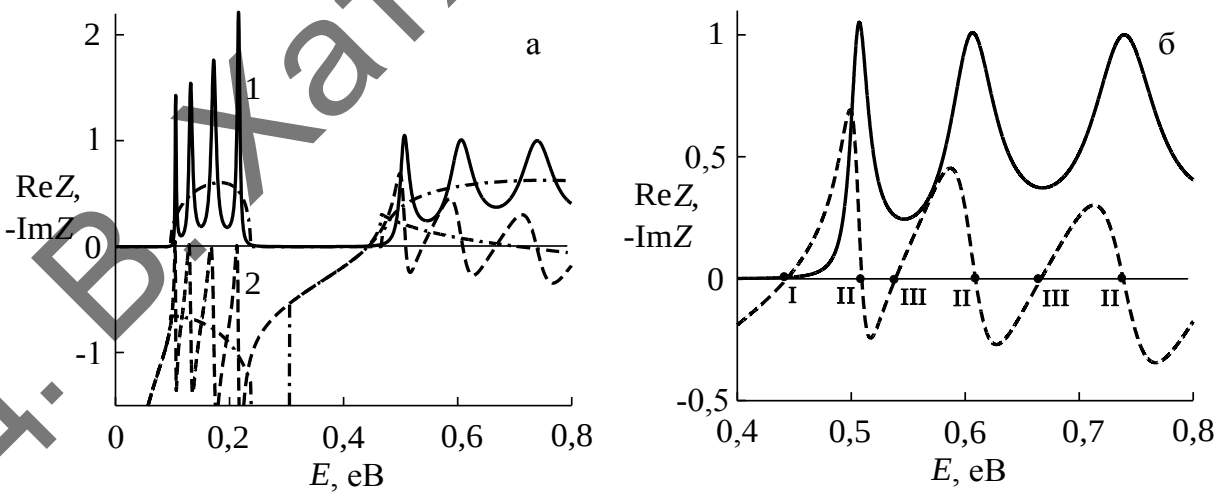


Рисунок 3.6 Залежності активної (1) і реактивної (2) складових вхідного імпедансу обмежених НҐ: а — кількість бар'єрів (шарів AlGaAs) N = 5; б — фрагмент залежностей

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

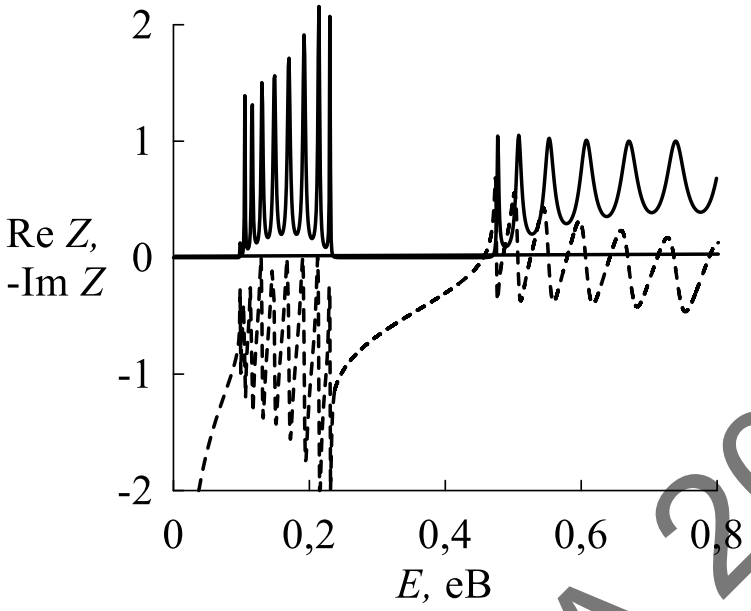


Рисунок 3.7 Залежності активної (1) і реактивної (2) складових вхідного імпедансу обмежених НҐ: кількість бар'єрів (шарів AlGaAs) $N = 10$

При виконанні умови

$$\mathrm{Re}\,Z = Z_c, \tag{2}$$

де Z_c — хвильовий імпеданс середовища на вході НҐ, НҐ узгоджені з середовищем на вході.

Точка I знаходиться в забороненій зоні. Виконання умови (2) для цієї точки відповідає резонансному тунелюванню електронів крізь НҐ з формуванням вузькосмугової характеристики проходження.

Виконання умови (2) для точок II і III відповідає резонансному надбар'єрному проходженню електронів крізь НҐ, причому в точках II $\mathrm{Re}\,Z = 1$, а в точках III $\mathrm{Re}\,Z \neq 1$.

На рис. 3.8 приведено характеристики коефіцієнта проходження НҐ при виконанні умови (2) для точки I. Зі збільшенням кількості шарів НҐ значення $\mathrm{Re}\,Z$ в точці I ($\mathrm{Re}\,Z_\mathrm{I}$) зменшується (при $N = 5$ $\mathrm{Re}\,Z_\mathrm{I} = 5{,}45\times10^{-3}$, а при $N = 7$ $\mathrm{Re}\,Z_\mathrm{I} = 9{,}20\times10^{-4}$) і, відповідно, підвищується вибірність характеристики.

НҐ в режимі забороненої зони еквівалентні потенціальному бар'єру в режимі тунелювання (тунельному бар'єру). Рис. 3.9 ілюструє еквівалентність

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

НҐ тунельному бар'єру для другої забороненої зони. Висота еквівалентного бар'єра V_e дорівнює верхній межі зони: $V_e = 0{,}466$ еВ, а товщину бар'єра a_e знайдено з умови $\mathrm{Re}\, Z_I \approx \mathrm{Re}\, Z_{Ie}$, де Z_{Ie} — значення вхідного імпедансу еквівалентного бар'єра в точці I; знак «≈» обумовлений кратністю значення a_e величині t. Якщо $N = 7$, $a_e = 32t$. Звернемо увагу, що, починаючи зі значення $E = V = 0{,}3$ еВ, другу заборонену зону НҐ (з тунельним характером проходження електронів) формують надбар'єрно відбиті хвилі.

Розглянемо залежність коефіцієнта відбиття (по модулю) обмежених НҐ. Коефіцієнт відбиття визначається формулою

$$R = \left|\frac{1-Z}{1+Z}\right|.$$

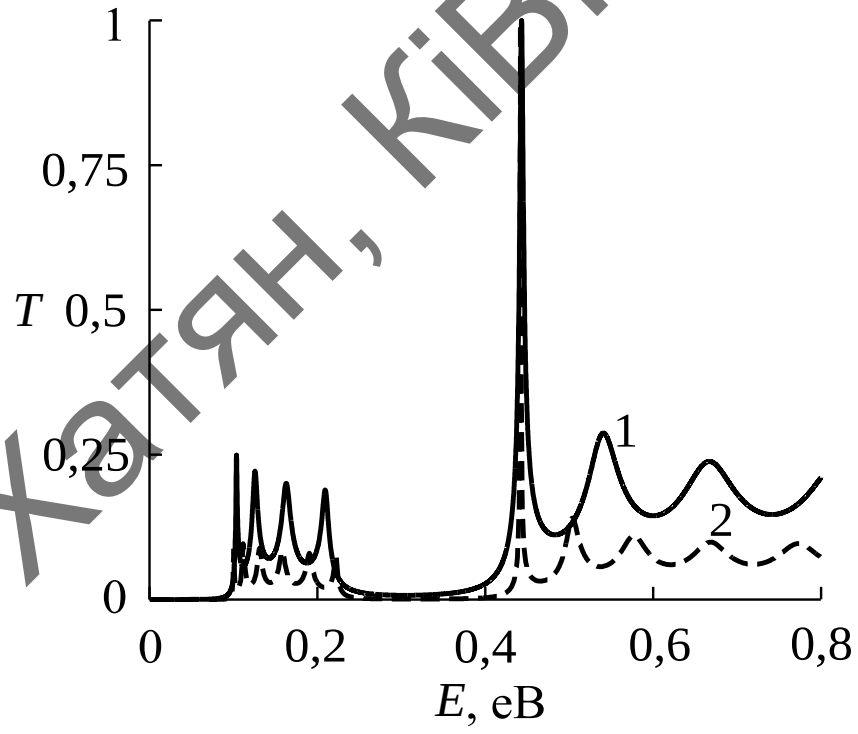


Рисунок 3.8 Характеристики коефіцієнта проходження НҐ: 1 — N = 5 (E_I = 0,443 еВ), 2 — N = 7 (E_I = 0,442 еВ), E_I — значення в точці I

На рис. 3.10 приведено залежності коефіцієнта відбиття обмежених НҐ при $N = 3, 4$ і 5 і активної складової вхідного імпедансу необмежених НҐ. Головні пелюстки коефіцієнта відбиття відповідають забороненим зонам.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Для необмежених НҐ коефіцієнт відбиття в заборонених і дозволених зонах дорівнює відповідно $R_н = 1$ і $R_н = 0$.

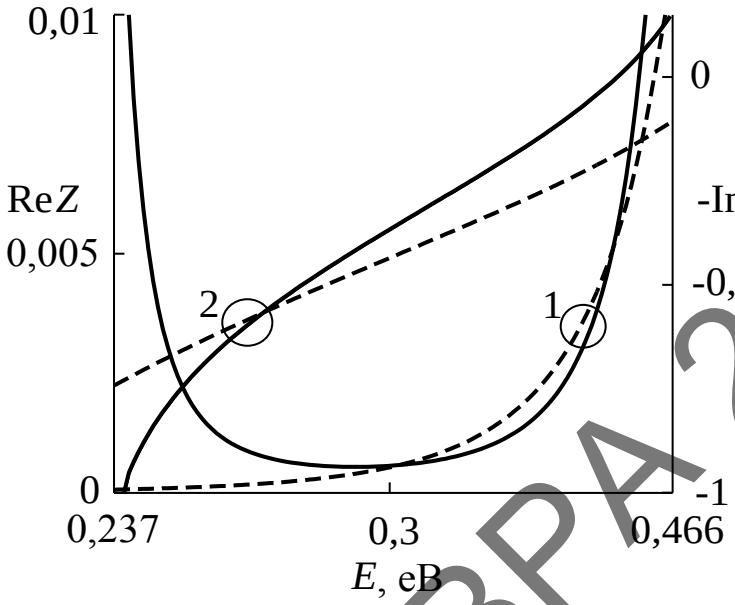


Рисунок 3.9 Залежності активної (1) і реактивної (2) складових вхідного імпедансу НҐ (суцільна лінія) і еквівалентного бар'єра (штрихова лінія), $N = 5,\ a_e = 21t$

Взаємне порівняння залежностей коефіцієнта відбиття обмежених НҐ і активної складової вхідного імпедансу необмежених НҐ дозволяє проаналізувати формування зонної діаграми обмеженими НҐ.

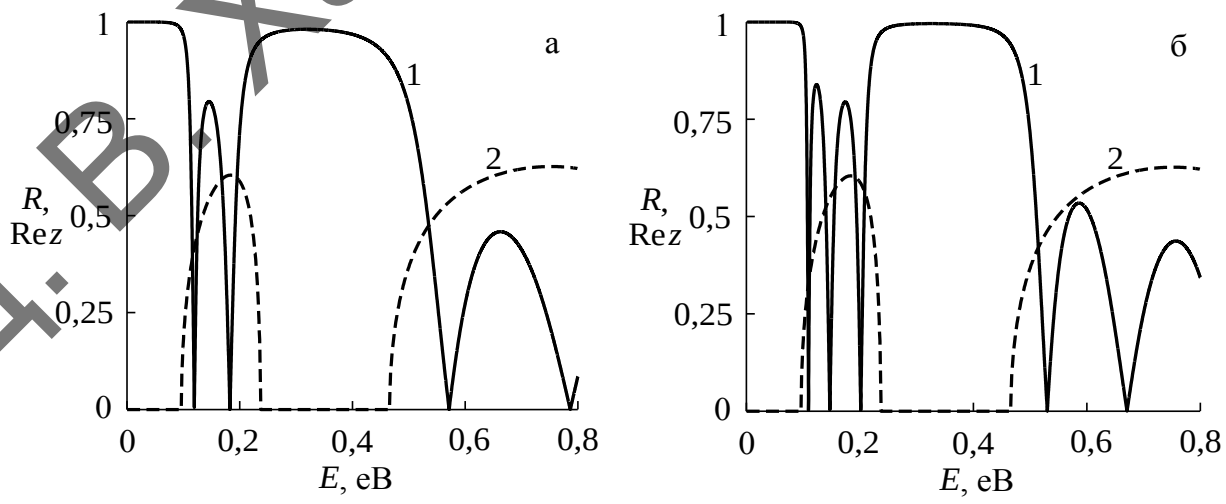


Рисунок 3.10 Залежності коефіцієнта відбиття обмежених НҐ (1) і активної складової необмежених НҐ (2): а — $N = 3$; б — $N = 4$

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

З візуального порівняння залежностей можна зробити висновок, що вже при $N = 4$ зонна діаграма сформована.

Залежності параметрів заборонених зон обмежених НҐ від кількості бар'єрів дозволяють кількісно проаналізувати степінь наближення параметрів зонної діаграми обмежених НҐ до параметрів зонної діаграми необмежених НҐ.

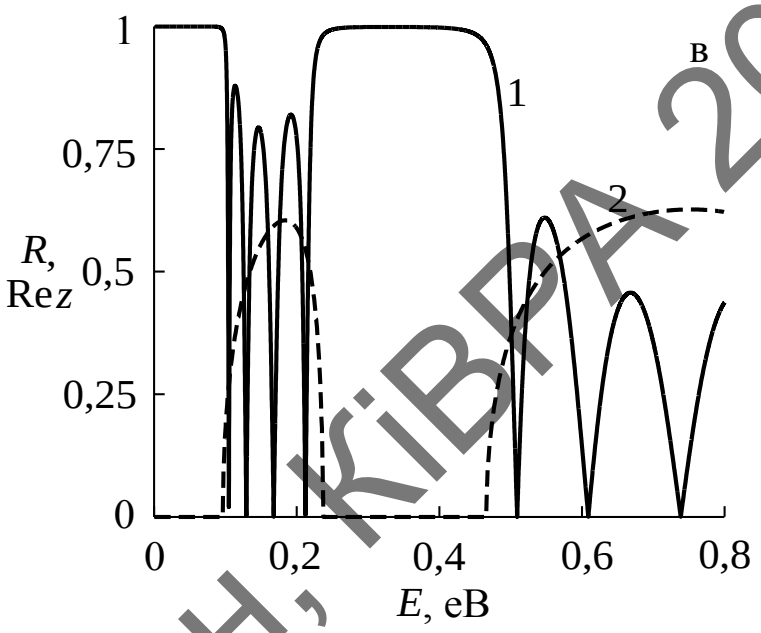


Рисунок 3.10, в — $N = 5$.

Степінь наближення оцінимо відносною різницею значень параметрів зонної діаграми обмежених і необмежених НҐ:

$$\Delta P = \frac{|P - P_{\text{н}}|}{P_{\text{н}}},$$

де P і $P_{\text{н}}$ — значення параметра зонної діаграми відповідно обмежених і необмежених НҐ.

На рис. 3.11, а приведено залежності значень енергії на межах заборонених зон (штрихові лінії — значення для необмежених НҐ). Зі збільшенням N з 4 до 10 значення ΔE для залежностей 1, 2 і 3 зменшуються з 13,5, 15,1 і 13,8 % до 2,2, 3,1 і 2,5 %.

На рис. 3.11, б показано залежності значень коефіцієнта відбиття на

Д.В. Хатян, КіВРА 2015

межах заборонених зон. Зі збільшенням N з 4 до 10 значення ΔR для залежностей 1, 2 і 3 зменшуються з 1,2, 2,7 і 5,8 % до 0,2, 0,4 і 1,0 %.

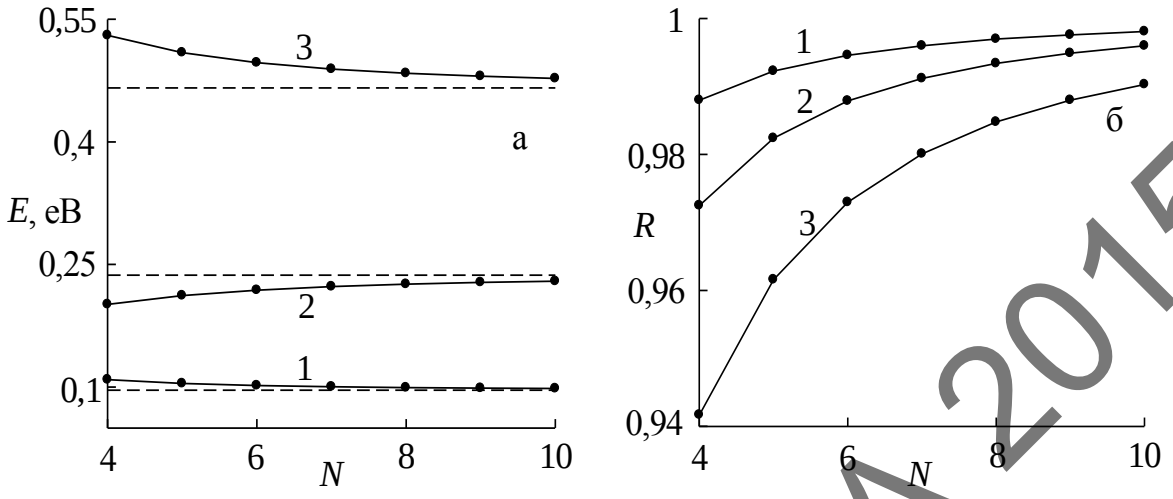


Рисунок 3.11 Залежності параметрів заборонених зон обмежених НҐ на верхній межі першої забороненої зони (1), на нижній (2) і верхній (3) межах другої забороненої зони: а — значення енергії; б — значення коефіцієнта відбиття

На рис. 3.11, в приведено залежності максимуму коефіцієнта відбиття та коефіцієнта прямокутності у другій забороненій зоні.

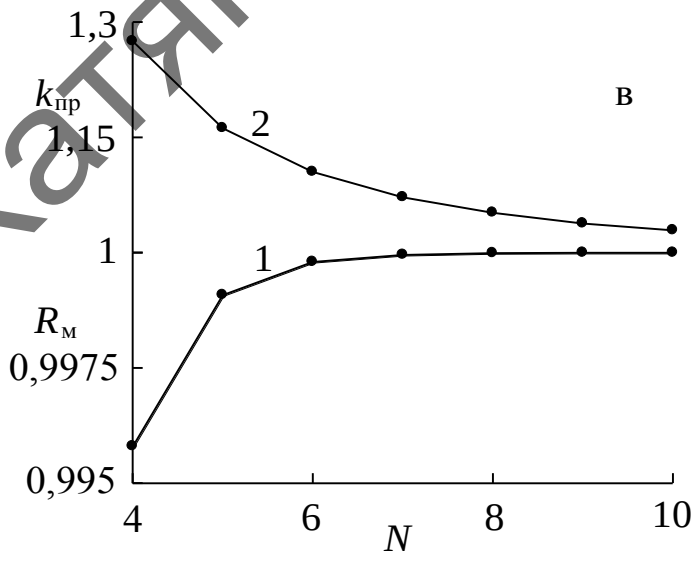


Рисунок 3.11, в — залежності максимуму коефіцієнта відбиття $R_м$ (1) та коефіцієнта прямокутності $k_{пр}$ (2) у другій забороненій зоні

Коефіцієнт прямокутності визначається відношенням

Д. В. Хатян. КіВРА 2015

$$k_{\text{пр}} = \frac{\Delta E_0}{\Delta E_{0,9}},$$

де ΔE_0 і $\Delta E_{0,9}$ — смуги енергії залежності коефіцієнта відбиття відповідно по перших нулях і за рівнем 0,9.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ

1. Дослідження вхідних імпедансних характеристик необмежених і обмежених НҐ дозволяє встановити особливості формування характеристик обмежених НҐ, умови узгодження обмежених НҐ з середовищем на їх вході. Залежності параметрів зонної діаграми обмежених НҐ від кількості бар'єрів визначають степінь наближення зонної діаграми обмежених НҐ до зонної діаграми необмежених НҐ.

2. Для необмежених НҐ $R_{\text{мн}} = R_{\text{н}} = 1$ і $k_{\text{прн}} = 1$.

3. Зі збільшенням N з 4 до 10 значення $\Delta R_{\text{м}}$ зменшуються з 0,4 до $4{,}5\times10^{-5}$ %, а значення $\Delta k_{\text{пр}}$ — з 27,5 до 2,9 %.

4. Мінімальна і максимальна відносні різниці значень розглянутих параметрів заборонених зон обмежених і необмежених НҐ при $N = 4$ складають 0,4 і 27,5 %, а при $N = 10$ — $4{,}5\times10^{-5}$ і 3,1 %.

Д. В. Хатян, КВРА 2015

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Враховуючи той факт, що виконання даної дипломної роботи потребує використання засобів комп'ютерної техніки, то в цьому розділі запропоновані технічні рішення та практичні заходи, що пов'язані із створенням безпечних умов праці при використанні персональної електронно обчислювальної машини (ПЕОМ).

В першу чергу, передбачається, з урахуванням вимог ДСанПіН 3.3.2.007 та ДНАОП 0.00-1.31-99, визначити потенційно небезпечні і шкідливі фактори, що виникають при експлуатації відеодисплейних терміналів (ВДТ) ПЕОМ, вплив цих факторів на користувачів ВДТ, розглянути принципи їх нормування, а також розробки комплексних заходів щодо запобігання шкідливого впливу цих факторів на людину. Також цьому розділі запропоновано технічні рішення та організаційні заходи з безпеки в НС.

4.1 Визначення основних потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Основними шкідливими та небезпечними виробничими факторами, які пов'язані з використанням ПЕОМ є наступні фактори:

- електромагнітне випромінювання радіочастотного діапазону;
- наявність іонізуючого рентгенівське випромінювання (НРВ);
- випромінювання оптичного діапазону (ультрафіолетове, інфрачервоне і випромінювання видимого діапазону);
- електростатичне поле;
- недостатня освітленість робочої зони;
- можливість ураження електричним струмом;
- підвищений рівень шуму;
- значна напруга зорових органів і пов'язане з цим перевтомлення користувача ПЕОМ;

Д. В. Хатян. КІВРА 2015

- значне навантаження на пальці і кисті рук, що при відсутності профілактики і медичного контролю, може викликати професійні захворювання,

- тривале перебування в одному й тому ж самому положенні сидячи, що викликає застійні явища в організмі людини;

- відблиски на екрані монітора.

4.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Організації робочих місць обладнаних ВДТ ПЕОМ

Комп'ютерна техніка, яка встановлена в приміщенні лабораторії, є сучасною технікою, виконаною з урахуванням багатьох вимог охорони праці. Зокрема, ВДТ ПЕОМ мають тип LR/NI. Тип (Low Radiation) має низький рівень випромінювання екрана монітора, а тип NI (Non - Interlaced) має порядкове розгорнення, що сприяє меншому стомленню очей при роботі з відео монітором.

ВДТ ПЕОМ є джерелом як електромагнітних випромінювань (м'якого рентгенівського, ультрафіолетового, інфрачервоного та радіочастотного діапазону) так і електростатичного поля.

ВДТ ПЕОМ є пристроєм для візуального зображення інформації, збереженої електронним засобом. Він складається з дисплейного екрана, системного блока обробки виведеної інформації, і клавіатури.

Класифікація ВДТ стосовно до проблеми їхнього впливу на здоров'я базується головним чином на конструктивних особливостях і визначених параметрах самого дисплея (наприклад, можливість одержання багатокольорового, позитивного, негативного зображення).

У разі тривалої роботи за комп'ютером при неправильному, з фізіологічної точки зору, положенні тіла може викликати в організмі людини такі види захворювань, як сколіоз - дугоподібне викривлення хребта, чи остеохондроз – дистрофічний процес у кістковій та хрящовій тканині.

Д В Хатян, КІВРА 2015

Частіше всього користувачі комп'ютерної техніки скаржаться на біль у руках, плечових суглобах, шиї, у верхній частині ніг та у спині. Основні симптоми захворювань, що пов'язані з постійним інтенсивним використанням клавіатури, це больові відчуття у суглобах та м'язах кистей рук, оніміння та дуже повільна рухливість пальців, судоми м'язів кистей рук, поява ниючого болю в ділянках зап'ястка.

Наприклад, в США швидкими темпами розвивається такий вид комп'ютерного захворювання, як „Repetitive Strain Injury" - хронічне розтягнення м'язів травматичного характеру, скорочено — KSI. За даними Національного інституту охорони праці і профілактики професійних захворювань KSI належить до професійних захворювань, що найбільш часто зустрічаються в США. Ця тенденція до зростання кількості користувачів комп'ютерів, які потерпають від цього захворювання, має місце не тільки в США, а і в інших розвинутих країнах світу.

Саме праця за клавіатурою потребує найбільш інтенсивної динамічної роботи кістково-м'язового апарату кистей рук і одночасно статичного напруження м'язів передпліччя і плеча. Виконання однотипних, фізично неважких рухів кистей, що здаються зовсім необтяжливими для людини, можуть призвести навіть до функціональних змін в її організмі, при цьому розвиватися вони можуть непомітно протягом кількох років.

Виникненню захворювань кістково-м'язового апарату кистей рук сприяє неправильне положення тіла щодо клавіатури, значне відхилення ліктів від тулуба нераціональне взаємне спрямування передпліччя та кистей рук.

Слід зауважити, що не тільки робота за клавіатурою призводить до виникнення порушень у кістково-м'язовому апараті рук. Як вже було сказано вище, використання в роботі такого пристрою як „миша", також несприятливо впливає на організм користувача комп'ютерної техніки. Маніпулюючи „мишею" людина здійснює велику кількість дрібних однотипних рухів, що призводить до постійного навантаження на кисть руки,

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

передпліччя та плече. Все це обумовлює появу неприємних, а згодом і болісних відчуттів у ділянці зап'ястка, у ліктьовому і особливо плечовому суглобах.

Таким чином, можна констатувати, що основне перенапруження опорно-рухової системи людини при роботі з комп'ютерною технікою спричиняється, в першу чергу, багатогодинною напруженою роботою в одноманітному положенні сидячи, а значить і обмеженою загальною руховою активністю (гіподинамією), а також однотипними інтенсивними циклічними навантаженнями, які мають місце при роботі з клавіатурою та з пристроєм типу "миша".

Крім того, праця користувачів персональних комп'ютерів супроводжується активізацією уваги й інших вищих психічних функцій, а також може супроводитися порушеннями режиму праці і відпочинку.

4.2.2 Електробезпека

Електроустаткування можна віднести до I (системні блоки) та II (ВДТ) класів щодо електрозахисту (ГОСТ12.2.007.0-75). Вимірювальні прилади мають 0I клас за електрозахистом.

Помешкання лабораторії по рівню небезпеки поразки людей електричним струмом згідно ОНТП 24-86 та ПБЕ можна віднести, до помешкань без підвищеної небезпеки, тому що:

- відносна вологість повітря не перевищує 75%;
- матеріал підлоги (паркет) є діелектриком;
- температура повітря не досягає значень, більших 35 °С;
- відсутня можливість одночасного доторку людини до з'єднаних із землею металоконструкцій будівлі, технологічних апаратів, механізмів і т.п., з одного боку, і до металевих корпусів електроустаткування – з іншого боку;
- відсутні хімічно агресивні середовища.

Електромережа трьохфазна з глухо заземленою нейтраллю, із зануленням і повторним заземленням нульового проводу відповідно до вимог

Д. В. Хатян. КІВРА 2015

ПБЕ та ПУЕ. Мережа обладнана автоматом струмового захисту, розрахованого на струм 10А. Час спрацювання автомату 0,1с.

Для того, щоб не допустити ураження людини електричним струмом при виникненні аварійних ситуацій необхідно заземлити все обладнання, що працює від мережі 220В, 50Гц. Опір нульового проводу повинен бути таким, щоб при замиканні на корпус або нульовий провід виникав струм короткого замикання, сила якого повинна перевищувати в 1,4 рази номінальний струм спрацювання автомата струмового захисту (при струмі короткого замикання менше 100А).

$$I_{кз} = \frac{U_ф}{R_0 + R_ф + Z_{T/3}},$$

де $U_ф$ – напруга фази мережі,

R_0 – опір нульового дроту на ділянці від фазного трансформатора до розетки “Вхід мережі” (~1.6 Ом),

$R_ф$ – опір фазного дроту на тій же ділянці (~1.6 Ом).

$Z_{T/3}$ – еквівалентний опір транзистора (0.12 Ом)

$$I_{кз} = \frac{220}{1.6 + 1.6 + 0.12} = 66.265A$$

$$\frac{I_{кз}}{I_{авт}} = \frac{66.265}{10 + 0.12} = 6.548 .$$

Таким чином струм короткого замикання при виникненні аварійної ситуації в 6.548 рази перевищує номінальний струм спрацювання автомата, що задовольняє встановленим нормам.

Опір заземлюючих пристроїв не перевищує значень встановлених ГОСТ12.1.030-81.

Виконано всі необхідні заходи щодо електробезпеки відповідно до ГОСТ12.3.019-80 та ПУЕ. Додаткових заходів по електробезпеці впроваджувати не потрібно.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

4.2.3 Вимоги до приміщень в яких розміщені ЕОМ

Облаштування робочих місць, обладнаних ЕОМ, ВДТ, повинно забезпечувати:

- належні умови освітлення приміщення і робочого місця, відсутність відблисків;
- оптимальні параметри мікроклімату (температура, відносна вологість, швидкість руху, рівень іонізації повітря);
- належні ергономічні характеристики основних елементів робочого місця;

Будівлі та приміщення, в яких експлуатуються ЕОМ та виконуються їх обслуговування, налагодження і ремонт, повинні відповідати вимогам: СНиП 2.09.02-85 “Производственные здания”, СНиП 2.09.04-87 “Административные и бытовые здания”, “Правил устройства электроустановок”, затверджених Головдерженергонаглядом СРСР 1984 р. (ПВЕ), “Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей”, затверджених Головдерженергонаглядом СРСР 21.12.84 (ПТЕ, СНиП 2.08.02-89 “Общественные здания и сооружения” з доповненнями, затвердженими наказом Держкоммістобудування України від 29.12.94 № 106, СН 512-78 “Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин”, затверджених Держбудом СРСР, ДСанПіН 3.3.2.-007-98 ‘‘Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин‘‘, затверджених МОЗ України 10.12.98.

Заборонено розміщувати робочі місця з ВДТ, ЕОМ у підвальних приміщеннях, на цокольних поверхах, поряд з приміщеннями, в яких рівні шуму та вібрації перевищують допустимі значення (поряд з механічними цехами, майстернями тощо), з мокрими виробництвами, з вибухопожежонебезпечними приміщеннями категорій А і Б, а також над такими приміщеннями або під ними.

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

Приміщення мають бути обладнані системами водяного опалення, кондиціонування або припливно-витяжною вентиляцією відповідно до СНиП 2.04.05-91.

Згідно з ДНАОП 0.00-1.31-99 площу приміщень визначають із розрахунку, що на одне робоче місце вона має становити не менше ніж 6 м^2, а об'єм не менше ніж 20 м^3 з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно працюють у зміні. Приміщення являє собою кімнату розміром 7 х 5 м., висотою 4 м. Розмір дверного прорізу 1,5м.

Площа й об’єм приміщення знаходимо по формулах:

$$S = a \cdot b,$$

$$V = S \cdot h,$$

де a – довжина, b – ширина, h – висота приміщення.

Маємо:

$$S = 7 \cdot 5 = 35\ м^2,\ V = 35 \cdot 3{,}5 = 122{,}5\ м^3.$$

Зведемо нормативні та фактичні дані приміщення в таблицю 5.1.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що геометричні розміри приміщення цілком відповідають нормативним вимогам.

Таблиця 5.1. Параметри приміщення

Назва характеристики	**Нормативне**	**Фактичне**
Площа приміщення з розрахунку	>6 м^2	35 м^2
Об’єм приміщення з розрахунку на 1	>20 м^3	122,5 м^3
Висота приміщення	3,5 – 4 м	3,5 м
Розміри дверей	≥1,1х1.8м	1,5х2 м
Відстань від стіни зі світловими прорізами до ВДТ	≥1м	1,5 м

Оздоблюють стіни, стелю, підлогу приміщення з матеріалів, які дозволені органами державного санітарно-епідеміологічного нагляду. Заборонено застосовувати полімерні матеріали (деревостружкові плити,

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

шпалери, що можна мити, рулонні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик, тощо), що виділяють у повітря шкідливі хімічні речовини. За розміщенням робочих місць з ВДТ, ЕОМ потрібно витримувати такі відстані: від стін зі світловими прорізами не менше 1 м; між бічними поверхнями ВДТ не менше 1,2 м; між тильною поверхнею одного ВДТ та екраном іншого не менше 2,5 м; прохід між рядами робочих місць не менше 1 м. Робочі місця з ВДТ щодо світлових прорізів розміщують так, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва. Екран ВДТ і клавіатура мають розміщуватися на оптимальний відстані від очей користувача, але не ближче 600 мм з урахуванням розміру алфавітно-цифрових знаків і символів. Розміщення екрана ВДТ має забезпечувати зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом ± 30° від лінії зору працівника.

Усі вище перераховані вимоги відповідають робочому приміщенню, де проводяться дослідження.

4.2.4 Відповідність параметрів мікроклімату в робочій зоні санітарним нормам

Для підвищення працездатності і збереження здоров’я важливо створити для людини стабільні метеорологічні умови – мікроклімат повітряного середовища, у поняття якого входять температура, відносна вологість, швидкість руху повітря та інтенсивність теплового опромінення.

Стан повітряного середовища визначається метеорологічними умовами в лабораторії, виробничим мікрокліматом, а також запиленістю повітря і його загазованістю.

Мікроклімат виробничого приміщення визначається поєднаннями температури, вологості, швидкості руху повітря та інтенсивності теплового випромінювання, що впливають на організм людини.

Для того, щоб фізіологічні процеси в організмі людини протікали нормально, температура його тіла повинна бути постійною. Надлишкова теплота повинна виділятися в навколишнє середовище. Відповідність між

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

цією теплотою та охолоджувальною здатністю навколишнього середовища визначає комфортні умови.

При відхиленні параметрів мікроклімату від комфортних в організмі людини відбуваються процеси, спрямовані на терморегулювання. Розрізняють хімічну і фізичну терморегуляцію організму. Хімічна відбувається зниженням рівня обміну речовин, а фізична – за допомогою теплопровідності, конвекції, випромінювання і випарювання.

Значні відхилення параметрів мікроклімату від оптимальних можуть стати причиною ряду простудних захворювань.

Робочою зоною вважається простір, обмежений конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги чи площадки, на яких знаходяться місця постійного чи непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього виробничих факторів, що утворюються в процесі трудової діяльності людини.

Для нормальної життєдіяльності людини важливий парціальний тиск кисню – 21331 Па (160 мм рт. ст.) і необхідно, щоб у повітрі приміщень містилось не менш 19,5 - 20% кисню.

Вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони не має перевищувати ГДК. Відповідно до ГОСТ 12.1.005-88 вміст озону – не більше 0,1 мг/м^3, вміст оксидів азоту – не більше 5 мг/м^3, вміст пилу – не більше 4 мг/м^3.

Важливо, щоб повітря мало визначений іонний склад. У повітрі містяться негативні і позитивні іони, що по рухливості розділяють на легкі, середні і важкі. На життєдіяльність організму людини благотворно впливають негативні іони кисню. Вміст легких іонів у повітрі виробничих і громадських приміщень, повітряне середовище яких піддається спеціальній обробці в системах кондиціонування, приведено в таблиці 5.2. Іонний склад повітря має відповідати вимогам СН 2152-80.

Норми метеорологічних умов при розробці пристрою регламентуються ДСН 3.3.6.042-99. Значення оптимальних, припустимих і фактичних

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

параметрів мікроклімату на постійному робочому місці розробника пристрою для категорії виконуваних їм робіт в холодний і теплий період року приведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.2. Припустимий вміст легких іонів у повітрі робочої зони.

Рівні	Кількість іонів у 1 $см^3$ повітря позитивних, n^+ негативних, n^-		Коефіцієнт полярності, π
Мінімально необхідний	400	600	-0. 2
Оптимальний	1000 - 3000	3000 - 5000	- 0.67... 0
Максимально припустимий	50000	50000	-0. 05... +0.05

Як видно з таблиці, фактичні значення параметрів мікроклімату в приміщенні лабораторії відповідають допустимим значенням цих параметрів.

Таблиця 5.3. Нормовані значення параметрів мікроклімату в робочій зоні розробника

Період року	Параметр мікроклімату	Нормовані значення параметрів мікроклімату		Фактичні значення параметрів мікроклімату
		оптимальні	допустимі	
Холодний	Температура, °С	22-24	21-25	21-22

Д.В. Хатян, КіВРА 2015

	Відносна вологість, %	40-60	75	65-75
	Швидкість руху, м/с	не більше 0,1	не більше 0,1	не більше 0,1
Теплий	Температура, °С	23-25	22-28	22-28
	Відносна вологість, %	40-60	55, при 28 °С 75, при 22 °С	70-75
	Швидкість руху, м/с	не більш 0,1	0,1-0,2	не більш 0,2

4.2.5 Освітлення робочих місць користувачів ВДТ ЕОМ

Штучне освітлення, а саме відсутність у спектрі ламп денного світла й ламп накалювання біологічно активної ультрафіолетової складової при тривалому впливі може призвести до ультрафіолетової недостатності, при якій знижуються бактерицидні властивості шкіри та імунітет.

Істотне значення для збереження тривалої працездатності, підвищення продуктивності праці має забезпечення норм освітленості на робочому місці. Величина освітленості регламентується нормами ДБН В.2.5-28-2006. Робоче приміщення належить до I групи – приміщення, у яких розрізнення об'єктів зорової роботи здійснюється при фіксованому напрямку лінії зору працюючих на робочу поверхню.

Нормування штучного освітлення також здійснюється згідно ДБН В.2.5-28-2006. Для загального освітлення використовують головним чином люмінесцентні лампи, що обумовлено їхніми перевагами. Для розрахунку штучного освітлення застосовують метод коефіцієнта використання потоку:

$$\Phi = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{N \cdot C}$$

де Φ – світловий потік; E – нормована мінімальна освітленість; K –

Д.В.Хатян. КІВРА 2015

коефіцієнт запасу; S – освітлювана площа; Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення; C – коефіцієнт використання випромінюваного світильниками світлового потоку на розрахунковій площі; N – число світильників.

Згідно ДБН В.2.5-28-2006 визначаємо норму освітленості:

$$E=300\,лк; K=1,5; S=5\cdot 4=20\,м^2; Z=1,2$$

Необхідна кількість люмінесцентних ламп визначається по формулі:

$$N=\frac{E\cdot K\cdot S\cdot Z}{\Phi\cdot C}$$

Найбільш прийнятними для приміщення є люмінесцентні лампи ЛД (денного світла) потужністю 40 Вт. Нормальний світловий потік лампи ЛД-40 дорівнює $\Phi = 2340$ лм. Величиною i, індексом приміщення можна встановити залежність від площі приміщення й висоти підвісу:

$$i=\frac{A\cdot B}{h\cdot(A+B)}$$

Де $A=7м$ – довжина приміщення; $B=5м$ – ширина приміщення; h – висота підвісу;

$$h=H-hp-hc,$$

Де $H=3,5м$ – висота приміщення; $hp=0,8м$ – висота робочої поверхні;

$hc=0,4м$ – висота від стелі до нижньої частини лампи;

$$h=3,5-0,8-0,4=2,3м$$

$$i=\frac{7\cdot 5}{2,3\cdot(7+5)}=1,27$$

Коефіцієнт використання світлового потоку на розрахунковій площі $C=0,3$. У підсумку число світильників вийде рівним:

$$N=\frac{300\cdot 1,5\cdot 20\cdot 1,2}{2340\cdot 0,3}=1,5$$

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

Для штучного освітлення в робочому приміщенні достатньо використати 2 люмінесцентні лампи денного світла ЛД – 40, зі світловим потоком $Ф = 2340 лм$ кожна.

4.2.5 Заходи щодо нормалізації умов праці

Для усунення шкідливого впливу НРВ на організм інженерів-програмістів можна рекомендувати скоротити час перебування за екраном дисплея до 4 годин у зміну, причому після 2 годин безупинної роботи радиться 30-хвилинна перерва (бажано на відкритому повітрі).

З метою автоматичної підтримки параметрів мікроклімату в необхідних межах протягом всіх сезонів року, очищення повітря від пилюки і шкідливих речовин, зниження рівня іонізації в помешканні лабораторії провадиться вентиляція за допомогою двох витяжних вентиляторів типу АИСИ-4 і щоденне вологе прибирання.

Світильники розташовані в два ряди і під'єднані до різних фаз електромережі для усунення мерехтіння світлового потоку (коефіцієнт пульсацій менше 10%).

Для ослаблення шкідливого впливу електростатичних полів у лабораторії застосовуються захисні скляні фільтри (екрани) з електропровідним покриттям, що має відвід для заземлення, що прикріплюються на екран монітора.

Для зниження рівня шуму в лабораторії використовується шумопоглинаюче облицювання з перфорованим покриттям: гіпсові плити товщиною 7-9 мм із заповненням із склотканини.

4.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в НС регламентується ПЛАС (ДНАОП 0.00-4.33-99). Основними складовими частинами ПЛАС є розробка технічних рішень та організація заходів щодо оповіщення, евакуації та дій персоналу при виникненні НС, а також визначення основних заходів з пожежної безпеки.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

4.4.1 Вимоги до систем оповіщення персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації

Розміри зон оповіщування, черговість оповіщування та час початку оповіщування людей в окремих зонах визначаються, виходячи з умов забезпечення безпечної та своєчасної евакуації людей у разі виникнення НС.

Оповіщування про НС та управління евакуацією людей здійснюється одним з наступних способів або їх комбінацією:

- поданням звукових і (або) світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;

- трансляцією текстів про необхідність евакуації, шляхи евакуації, напрямок руху й інші дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей;

- трансляцією спеціально розроблених текстів, спрямованих на запобігання паніці й іншим явищам, що ускладнюють евакуацію;

- розміщенням знаків безпеки на шляхах евакуації згідно з ДСТУ ISO 6309;

- ввімкненням евакуаційних знаків "Вихід";

- ввімкненням евакуаційного освітлення та світлових покажчиків напрямку евакуації.

Кількість оповіщувачів, їх розміщення та потужність повинні забезпечувати необхідну чутність у всіх місцях постійного чи тимчасового перебування людей.

У місцях, де є небезпека механічного ушкодження оповіщувачів, повинен бути забезпечений їх захист, що не порушує працездатності оповіщувачів. Встановлення звукових та мовних оповіщувачів у виробничих приміщеннях повинно виключати можливість концентрації та нерівномірного розподілу звуку.

Оповіщувачі повинні підключатися до мережі без роз'ємних пристроїв і не мати регуляторів гучності. Сигнали оповіщення про пожежу повинні відрізнятися від сигналів іншого призначення. Комунікації системи оповіщення людей про пожежу можуть проектуватися суміщеними з

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

радіотрансляційної мережею будівлі.

Електропостачання, заземлення, занулення, вибір та прокладання мереж оповіщення приймаються згідно з вимогами до систем пожежної сигналізації за ДБН В.2.5-13-98 (ДБН В.2.5-56-2010)"Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд".

Управління системою оповіщення слід передбачати з приміщення пожежного поста, диспетчерської або іншого спеціального приміщення. Вимоги до такого приміщення приймаються за аналогією з вимогами до приміщень чергового персоналу з ДБН В.2.5-56-2010.

4.4.2 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС

У разі виявлення ознак НС працівник, який їх помітив повинен:

- негайно повідомити про це засобами зв'язку органи МНС та пожежної охорони, вказати при цьому адресу, кількість поверхів, місце виникнення пожежі, наявність людей, а також своє прізвище;
- повідомити про НС керівника, адміністрацію, пожежну охорону підприємства;
- організувати оповіщення людей про НС;
- вжити заходів щодо евакуації людей та матеріальних цінностей;
- вжити заходів щодо ліквідації наслідків НС з використанням наявних засобів.

Керівник та пожежна охорона установки, яким повідомлено про виникнення пожежі, повинні:

- перевірити, чи викликані підрозділи МНС;
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;
- у разі загрози життю людей негайно організувати їх евакуацію, та їх рятування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації НС;
- перевірити здійснення оповіщення людей про НС;
- забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які беруть

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

участь у ліквідації НС ;

- організувати зустріч підрозділів МНС та Державної пожежної охорони, надати їм допомогу у локалізації і ліквідації НС.

Після прибуття на НС підрозділів МНС та пожежної охорони повинен бути забезпечений безперешкодний доступ їх до місця, де виникла НС.

4.4.3 Пожежна безпека

Відповідно до НАПБ Б.07.005-86 (ОНТП24-86) робоче приміщення лабораторії відноситься до категорії В по вибухопожежній небезпеці. Відповідно до ПУЕ-87 та ДНАОП 0.00-1.32-01 клас робочих зон приміщення лабораторії по пожежонебезпеці - П-IIа. Можливими причинами пожежі в приміщенні є несправність електроустаткування, коротке замикання проводки, і порушення протипожежного режиму (використання побутових нагрівальних приладів, паління).

У зв'язку з цим, відповідно до вимог ПБЕ та ПУЕ, необхідно передбачити наступні заходи.

- постійний контроль стану засобів пожежогасіння;
- застосування автоматичних установок пожежної сигналізації;
- організація за допомогою технічних засобів, включаючи автоматичні, своєчасного оповіщення та евакуації людей.
- контроль за станом ізоляції струмоведучих дротів;
- заборонено паління в приміщенні;
- неприпустимість знаходження у приміщенні горючих і вибухонебезпечних речовин;
- допуск до роботи осіб, які в установленому порядку пройшли навчання, інструктаж і перевірку знань з пожежної безпеки.

Для гасіння пожежі в робочому приміщені лабораторії (клас пожежі „E"- наявність електрообладнання під напругою) використовуються вогнегасники ОП-1 — "Момент" (2 шт.). Додатково в коридорі розташовані вогнегасники ОХП-10. Також на сходовій клітці розташований пожежний

Д. В. Хатян. КІВРА 2015

кран. Така кількість первинних засобів пожежогасіння відповідає вимогам ДСТУЗБ 75-98 та ISO3941-77, якими передбачене обов'язкова наявність двох вогнегасників до 100 м^2 площі підлоги для приміщення типу конструкторське бюро.

Згідно вимог ДБН В.2.5-13-98 робоче приміщення лабораторії необхідно оснастити системою автоматичної пожежної сигналізації.

Будинок має два евакуаційних виходів: через головний хід і додатковий евакуаційний вихід. Шляхи евакуації відповідають установленим нормам. Двері відкриваються назовні. Коридор веде до двох сходових кліток, одна з яких виходить безпосередньо на вулицю, а друга має вихід на вулицю через вестибюль і головний вхід. Сходова клітка виконана з не пальних матеріалів. Сходи мають природне бічне освітлення і штучне евакуаційне освітлення. Сходові площадки ширше коридорів. Усі співробітники ознайомлені з планом евакуації.

Дотримано усі вимоги СНиП 2.09.02-85 по вогнестійкості будинку і ширині евакуаційних проходів і виходів із приміщень назовні. Значення основних параметрів шляхів евакуації приведені в табл.5.4.

У приміщенні є план евакуації. Мінімальний час евакуації в разі виникнення пожежі відповідає вимогам СНиП 2.01.02-85, а максимальне видалення робочих місць від евакуаційних виходів вимогам СНиП 2.09.02-85.

Табл.5.4. Характеристики і норми еваковиходів

Параметр	Фактичне значення	Норма
Висота дверних прорізів	2,0 м	Не менше 2 м
Ширина дверних прорізів	0,8 м	Не менше 0,8 м
Ширина проходу для евакуації	Більше 1,5 м	Не менше 1 м
Ширина коридору	2 м	Не менше 2 м

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Число виходів з коридору	2	Не менше 2
Ширина сходового маршу	1,2 м	Не менше 1 м
Висота поруччя сходів	1 м	Не менше 0,9 м

У приміщенні виконуються усі вимоги по пожежній безпеці відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2004 “Правила пожежної безпеки в Україні”.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено інтенсивні науково – дослідні роботи за напрямом штучних алотропних форм вуглецю.

2. Унікальні фізичні властивості штучних алотропних форм вуглецю відкривають нові можливості для новітніх нанотехнологій.

3. Розглянуто пристрої обробки сигналів, а саме вертикальний графеновий транзистор, перемикач на основі ВНТ, комп'ютер на ВНТ, графеновий біосенсор та електронні пристрої на основі ВНТ.

4. Визначино основні переваги та недоліки даних пристроїв.

5. Дослідження вхідних імпедансних характеристик необмежених і обмежених НҐ дозволяє встановити особливості формування характеристик обмежених НҐ, умови узгодження обмежених НҐ з середовищем на їх вході. Залежності параметрів зонної діаграми обмежених НҐ від кількості бар'єрів визначають степінь наближення зонної діаграми обмежених НҐ до зонної діаграми необмежених НҐ.

6. Для необмежених НҐ $R_{\text{мн}} = R_{\text{н}} = 1$ і $k_{\text{прн}} = 1$.

7. Зі збільшенням N з 4 до 10 значення $\Delta R_{\text{м}}$ зменшуються з 0,4 до $4{,}5 \times 10^{-5}$ %, а значення $\Delta k_{\text{пр}}$ — з 27,5 до 2,9 %.

8. Мінімальна і максимальна відносні різниці значень розглянутих параметрів заборонених зон обмежених і необмежених НҐ при $N = 4$ складають 0,4 і 27,5 %, а при $N = 10$ — $4{,}5 \times 10^{-5}$ і 3,1 %.

Д. В Хатян, КІВРА 2015

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Blank V. Ultrahard and superhard phases of fullerite C_{60}: Comparison with diamond on hardness and wear / V. Blank , M. Popov., G. Pivovarov, N. Lvova, K. Gogolinsky, V. Reshetov // Diamond and Related Materials — 2003 — Vol. 7, No. 2 — P. 427 – 429.

2. Hadipour A. Device physics of polymer:fullerene bulk heterojunction solar Cells / A. Hadipour, J. Wildeman, F.B. Kooistra, J.C. Hummelen, M.G. Turbiez, M.M Wienk // Adv. Funct. Mater. — 2006. — Vol. 13 — P. 189 – 193.

3. Schilinsky P. Ultrahard and superhard phases of fullerite / P. Schilinsky, C. Waldauf, C. J. Brabec // Appl. Phys. Lett. — 2002. — Vol. 25 — P. 388 – 390.

4. Koster L. A. Self-Assembling fullerenes for improved Bulk-Heterojunction photovoltaic devices / L.A. Koster L, E.C. Smits, V.D. Mihailetchi // Phys P. W. M. Rev. B — 2004. — Vol. 72 — P. 205 – 206.

5. Schilinsky P. Device physics of polymer:fullerene bulk heterojunction solar Cells / P. Schilinsky, C. Waldauf, J. Hauch, C.J. Brabec // J. Appl. Phys. — 2004. — Vol. 95 — P. 281 – 283.

6. Wang S. A new carbonaceous material with large capacity and high efficiency for rechargeable Li-ion batteries / S. Wang, S. Yata, J. Nagano, Y. Okano, H. Kinoshita, H. Kikuta, M. Yamabe // Journal of the Electrochemical Society — 2000. — Vol. 147, No. 7 — P. 249 – 255.

7. Sen S. Flame synthesis of carbon nanofibers and nanofibers composites containing encapsulated metal particles / S. Sen, K. Ishwar // Nanotechnology — 2004. — Vol. 15, No. 3 — P. 264–268.

8. Yamada T. Size-selective growth of double-walled carbon nanotube forests from engineered iron catalysts / T. Yamada, T. Namai, K. Hata, D. Futaba, K. Mizuno, J. Fan // Nature Nanotechnology — 2006. — Vol. 1, No 2 — P. 131–136.

9. Andriotis A.N. Rectification Properties of Carbon Nanotube “Y-Junctions” / A.N. Andriotis, M. Menon, D. Srivastava, L. Chernozatonskii // Physical Review Letters — 2004. — Vol. 87, No. 6 — P 66 –68.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

10. Andriotis A.N. Transport Properties of Single-Wall Carbon Nanotube Y Junctions / A.N. Andriotis, M. Menon, D. Srivastava, L. Chernozatonskii // Physical Review B. — 2002. — Vol. 65, No 16. — P 16 – 54.

11. Bachtold A. Logic Circuits with Carbon Nanotube Transistors / A. Bachtold., P. Hadley, T. Nakanishi, C. Dekker // Science — 2005. — Vol. 294, No. 5545 — P 1317 – 1320.

12. Balasubramanian K. Biosensors based on Carbon Nanotubes / K. Balasubramanian, M. Burghard // Analytical and Bioanalytical Chemistry — 2006. — Vol. 385, No. 3 — P 452 – 468.

13. Baughman R.H. Carbon Nanotubes — The Route Toward Applications / R.H. Baughman, A.A. Zakhidov, W.A. Heer // Science — 2002. — Vol. 297, No 5582 — P 787 – 792.

14. Geim A. K. The rise of graphene / A. K. Geim, K. S. Novoselov // Nature Mater. —2007. — Vol. 6 — P 183 – 191.

15. Lee C. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene / C. Lee, X. Wei, J.W. Kysar, J. Hone // Science — 2008. — Vol. 321 — P 385 – 388.

16. Bunch J. S. Impermeable atomic membranes from graphene sheets. / J.S Bunch // NanoLett. — 2008. — Vol. 8 — P 2458 – 2462.

17. Elias D.C. Control of graphene's properties by reversible hydrogenation: evidence for graphene / D.C. Elias // Science — 2009. — P 610 – 613 p.

18 Wang X. N-doping of graphene through electrothermal reactions with ammonia / X. Wang // Science — 2009. — Vol. 323 — P 768 – 771.

19. Kim K.S. Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes /K. Kim // Nature — 2009. — Vol. 457 — P 706 – 710.

20. Riedl C. Quasi-Free-Standing Epitaxial Graphene on SiC Obtained by Hydrogen Intercalation / C. Riedl, C. Coletti, T. Iwasaki, A.A. Zakharov, U. Starke // Physical Review Letters — 2009. — Vol. 103, No. 24 — P 246 – 250.

21. Rutherglen C. Graphene Based Devices / C. Rutherglen, D. Jain, P. Burke // Appl. Phys. Lett. — 2008. — Vol. 93 — P 83 – 119.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

22. Brabec C.J. Graphene Based Electrochemical Sensors / C.J. Brabec, M. Burghard, M. Yamabe // J. Appl. Phys. — 2009. — Vol. 105 — P. 401 – 407.

23. Kharche N. Operation of Graphene Transistors at GHz Frequencies / N. Kharche, S.K. Nayak // Nano Lett. — 2011. — Vol. 11 — P. 38 – 52.

24. Britnell L. Graphene Based Devices, Circuits and Sensors / L. Britnell // Science — 2012. — Vol. 335, No. 947 — P. 621 – 632.

25. Molitor F. Graphene signale – electron transistors / F. Molitor, M.Y. Han, K. Nakada // Appl. Phys. Lett. — 2009. — Vol. 94, No. 51 — P. 322 – 349.

26. Liu Z. Graphene Based Electrochemical Sensors / Z. Liu, J.T. Robinson, X.M. Sun, H.J. Dai,// J. Am. Chem. Soc. — 2008. — Vol. 130, No. 106 — P. 581 – 601.

27. Shoushan F. Carbon nanotube arrays on silicon substrates and their possible application / F. Shoushan, C. Fan // Physica E 8 — 2000. — Vol. 84 — P. 179 – 183

28. Shea H. R. Manipulation of Carbon Nanotubes and Properties of Nanotube Field-Effect Transistors and Rings / H. R. Shea, C. Waldauf, J. Hauch // Microelectronic Engineering — 1999. — Vol. 46 — P. 101 – 104.

29. Lefebvre J. Single-wall carbon nanotube based devices / J. Lefebvre // Carbon — 2000. — Vol. 38 — P. 1745 – 1749

30. Paul L. Single – Walled Carbon Nanotube Electronics/ L. Paul, T. McEuen, S. Michael, P. Fuhrer, P. Hongkun // Appl. Phys. Lett. — 2001. — Vol. 79 — P. 3155 – 3157.

31. Jensen K. Nanotube radio / K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, A. Zettl // Nano Lett. — 2007. — Vol. 7, No. 11 — P. 3508 – 3511.

32. Chunsheng D. Preparation and preliminary property study of carbon nanotubes films by electrophoretic deposition / D. Chunsheng, D. Heldebrant, N. Pan // Materials Lett. — 2002. — Vol. 57 — P. 434 – 438.

33. Bonard J.M. Degradation and failure of carbon nanotube field emitters / J.M. Bonard, C. Klinke, K.A. Dean, B. F. Coll // Phys. Rev. B. — 2003. — Vol. 67 — P. 115 – 150.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

34. Gao R. Work Function at the Tips of Multi-Walled Carbon Nanotubes / R. Gao, Z. Pan, Z.L. Wang //Appl. Phys. Lett. — 2001. — Vol. 78 — P. 1757 – 1759.

35. Bai X.D. Measuring the work function at a nanobelt tip and at a nanoparticle surface / X.D. Bai, E.G. Wang, P.X. Gao, Z.L. Wang // Nano Lett. — 2003. — Vol. 3 — P. 1147 – 1150.

36. Shiraishi M. Work function of carbon nanotubes / M. Shiraishi, M. Ata // Carbon — 2001. — Vol. 39 — P. 1913 – 1917.

37. Chen X.P. Electrochemiluminescence biosensor for glucose based on graphene nafion GOD film modified glassy carbon electrode / X.P. Chen // Electroanalysis — 2010. — Vol. 22 — P. 2347 – 2352.

38. Guo S.J. Graphene nanosheet: synthesis, molecular engineering, thin film, hybrids, and energy and analytical applications / S.J Guo, S.J. Dong// Chem Soc Rev. — 2011. — Vol. 40, No. 5 — P. 2644 – 2672.

39. Jiang H.J. Chemical preparation of graphene-based nanomaterials and their applications in chemical and biological sensors / H.J. Jiang // Small. — 2011. — Vol. 7, No. 17 — P. 2413 – 2427.

40. Liu Y. Biocompatible graphene oxide-based glucose biosensors / Y. Liu // Langmuir. — 2010. — Vol. 26 — P 6158—6160.

41. Bachtold A. Logic Circuits with Carbon Nanotube Transistors / A. Bachtold., P. Hadley, T. Nakanishi, C. Dekker // Science — 2009. — Vol. 305, No. 5645 — P 1602 – 1605.

42. Balasubramanian K. Biosensors based on Carbon Nanotubes / K. Balasubramanian, M. Burghard // Analytical and Bioanalytical Chemistry — 2006. — Vol. 385, No. 3 — P 452 – 468.

43. Baughman R.H. Carbon Nanotubes — The Route Toward Applications / R.H. Baughman, A.A. Zakhidov, W.A. Heer // Science — 2003. — Vol. 305, No 5456 — P 787 – 792.

44. Bastard G. Heterostructures and Superlattices, Semiconductor. Encyclopedia of Applied Physics / G. Bastard. – N. Y.: Wiley, 2003. – P. 477–493.

Д. В. Хатян, КіВРА 2015

45. Razeghi M. The Wonder of Nanotechnology: Quantum Optoelectronic Devices and Applications / M. Razeghi, L. Esaki, K. von Klitzing, eds. – Bellingham: SPIE Press, 2013. – 1000 p.

46. Ахмедов Р. С. Імпедансна модель для наноелектронних структур / Р. С. Ахмедов, Е. А. Нелін // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2007. – № 34. – С. 102 – 105.

47. Водолазька М. В. Вхідні імпедансні характеристики двобар'єрних структур / М. В. Водолазька, О. В. Миколайчик, Є. А. Нелін // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, 2014. – № 58. – С. 112–120.

48. Нелин Е. А. Импедансные характеристики кристаллоподобных структур / Е. А. Нелин // ЖТФ. – 2009. – Т. 79, № 7. – С. 27–31.

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Додаток А

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

ПОГОДЖЕНО

Науковий керівник, професор
кафедри радіоконструювання та
виробництва радіоапаратури НТУУ
«КПІ»

_____ Є.А.Нелін
д.т.н., професор

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
радіоконструювання та виробництва
радіоапаратури НТУУ «КПІ»

_____ Є.А.Нелін
д.т.н., професор

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

17 жовтня 2014 р.

на виконання магістерської дисертації

з теми: «Наноелектронні пристрої обробки сигналів»

«Signal processing nanoelectronic devices»

Київ 2014

Д. В. Хатян, КВРА 2015

1 Підстава для виконання роботи

Завдання на магістерську дисертацію

2 Термін виконання

Початок – 01.09. 2013 р.

Закінчення – 18.05.2015 р.

3 Об'єкт дослідження

Пристрої на основі штучних вуглецевих структур.

4 Предмет дослідження.

Характеристики пристроїв.

5 Мета роботи

Дослідження пристроїв на основі штучних алотропних форм вуглецю: моделювання та аналіз характеристик, визначення недоліків та переваг пристроїв.

6. Приблизний зміст магістерської дисертації

Вступ

1 Штучні алотропні форми вуглецю

1.1 Фулерен та пристрої на його основі

1.2 Вуглецеві нанотрубки та пристрої на їх основі

1.3 Графен та пристрої на його основі

Висновки до першого розділу

2 Пристрої обробки сигналів

Висновки до другого розділу

3 Моделювання типового пристрою

Висновки до третього розділу

Загальні висновки

7. Очікувані результати

7.1 В результаті проведення аналітичного огляду літератури, науково-технічних статей та електронних джерел отримаємо висновок щодо пристроїв, які працюють на основі штучних алотропних форм вуглецю

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

7.2 Математична модель

7.3 Програмне забезпечення, яке реалізує математичну модель

7.4 Характеристики типових пристроїв та їх аналіз

8. Вихідні дані для проведення роботи та обгрунтування теми

Дана робота виконується вперше та проводиться за допомогою програмного середовища Mathcad.

При виконанні НДР використовуються:

- фонди на паперових носіях та електронні повнотекстові бази (Науково-технічна бібліотека ім.. Г.І. Денисенка НТУУ «КПІ»)

9. Технічні вимоги до магістерської дисертації.

Дослідна робота проводиться за допомогою програмного середовища Mathcad.

Матеріали і розробки за темою мають бути виконані на достатньому науковому рівні та придатні для практичного використання у науково-технічній галузі, у тому числі в сфері наноелектронної техніки.

Наукові звіти, матеріали магістерської дисертації та інші текстові документи подаються на електронному і паперовому носіях за встановленими формами та відповідають сучасним нормам української наукової лексики і оформлюється відповідно до ДСТУ 3008-95 "Документація. Звіти у сфері науки і техніки".

10. Матеріали, які подають по закінченні магістерської дисертації:

- завдання;
- технічне завдання;
- пояснювальна записка;
- електронна презентація;

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

11. Етапи магістерської дисертації і терміни їх використання

Шифр етапів	Назва етапів виконуваного завдання	Термін виконання		Чим закінчується етап
		початок	закінчення	
01	Підбір науково-технічних джерел. Огляд для пристроїв на основі штучних вуглецевих структур	1 вересня 2013 р.	20 грудня 2013 р.	Звіт магістра
02	Порівняння аналітичних методів моделювання	20 грудня 2014 р.	27 жовтня 2014 р.	Звіт магістра, 2 публікації
03	Отримання та обробка результатів досліджень.	27 жовтня 2014 р.	20 лютого 2015 р.	Звіт магістра
04	Представлення та захист результатів НДР	20 лютого 2015 р.	18 травня 2015 р.	Магістерська дисертація

Термін виконання НДР: 01.09.13-18.05.15.

12. Порядок розгляду та приймання магістерської дисертації

Визначають порядок приймання магістерської дисертації:

- Представлення магістерської дисертації на попередній захист;
- Захист магістерської дисертації на засіданні ДЕК.

Виконавець
магістерської дисертації
студент гр. РІ-31м _____ Хатян Д.В.
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ініціали)

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Додаток Б

Програма розрахунку та її результати

Вхідні дані

$m := 9.10938291 \cdot 10^{-31}$ $h := 1.054571726 \cdot 10^{-34}$ $e := 1.602176565 \cdot 10^{-19}$ $l := 2.82665 \cdot 10^{-10}$

$mb := 0.0665$ $V := 0.3$ $N := 5$ $a := 6 \cdot l$ $b := 10 \cdot l$ a – барер b – яма

$$ma := \left(0.0665 + 0.0835 \cdot \frac{V}{0.7731}\right) \quad c := \frac{\sqrt{2m \cdot e}}{h}$$

$E1 := 0.0001$ $E2 := 0.8$ $dE := 0.00001$ $E := E1, E1 + dE .. E2$

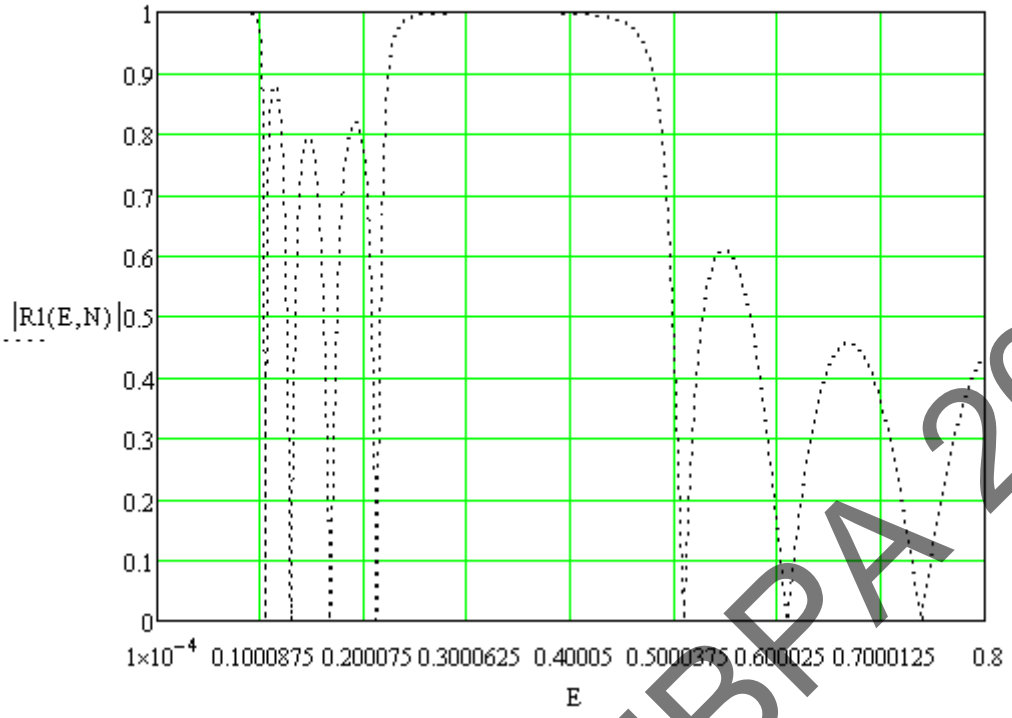
Імпедансна модель надґрат

$$Z(E,N) := \left| \begin{array}{l} Za \leftarrow \sqrt{\frac{(E - V) \cdot mb}{ma \cdot E}} \\ ka \leftarrow c\sqrt{ma \cdot (E - V)} \\ kb \leftarrow c\sqrt{mb \cdot E} \\ A \leftarrow \tanh(i \cdot ka \cdot a) \\ B \leftarrow \tanh(i \cdot kb \cdot b) \\ Zvh \leftarrow 1 \\ \text{for } k \in 1 .. N \\ \quad \left| \begin{array}{l} Zvh \leftarrow Za \cdot \frac{Zvh - Za \cdot A}{Za - Zvh \cdot A} \\ \text{break if } k = N \\ Zvh \leftarrow \frac{Zvh - B}{1 - Zvh \cdot B} \end{array} \right. \\ Z \leftarrow Zvh \end{array} \right.$$

$$R1(E,N) := \frac{1 - Z(E,N)}{1 + Z(E,N)}$$

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Залежність модуля коефіцієнта відбиття від енергії електрона для НҐ



$$ka(E) := c\sqrt{ma\cdot(E - V)} \qquad kb(E) := c\sqrt{mb\cdot E}$$

$$A(E) := \tanh(i\cdot ka(E)\cdot a) \qquad B(E) := \tan(kb(E)\cdot b)$$

$$Za(E) := \sqrt{\frac{(E - V)mb}{E\cdot ma}}$$

$$\eta(E) := \frac{1 - Za(E)^2}{2\left(B(E)^{-1} + i\cdot Za(E)\cdot A(E)^{-1}\right)}$$

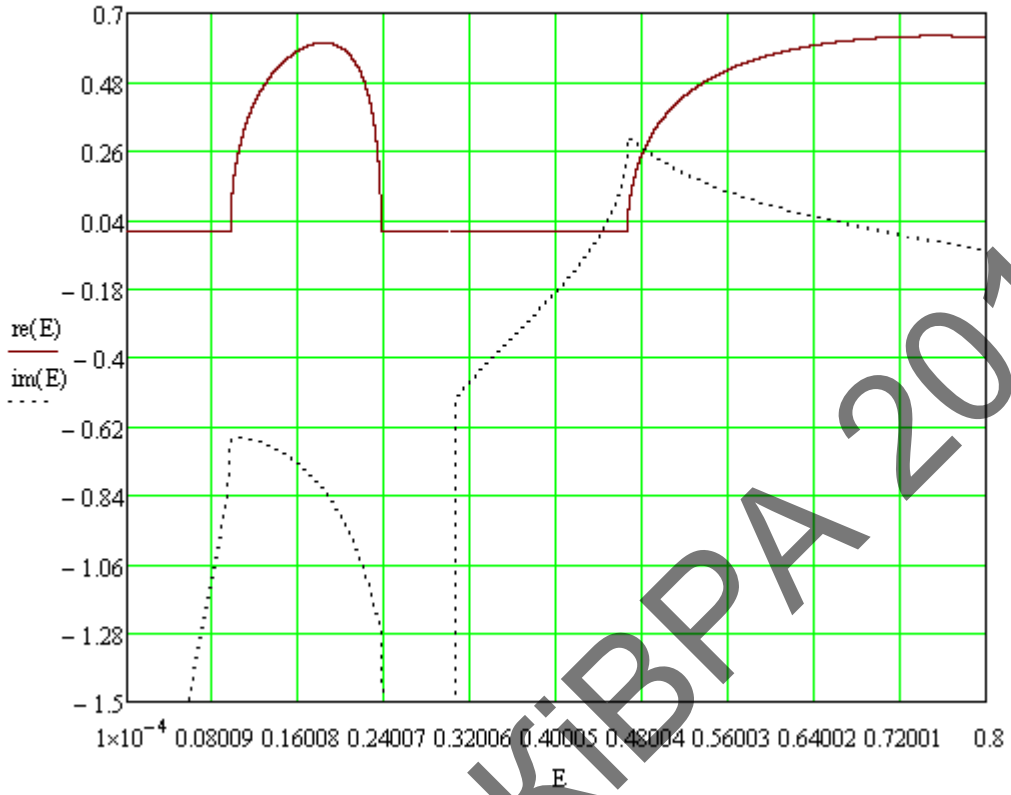
$$\psi(E) := 1 - \eta(E)^2 - 2\cdot\eta(E)\cdot B(E)^{-1}$$

$$re(E) := \begin{cases} \sqrt{\psi(E)} & \text{if } \psi(E) \geq 0 \\ 0 & \text{if } \psi(E) < 0 \end{cases} \qquad im(E) := \begin{cases} -\eta(E) & \text{if } \psi(E) \geq 0 \\ -\eta(E) - \sqrt{|\psi(E)|} & \text{if } \psi(E) < 0 \end{cases}$$

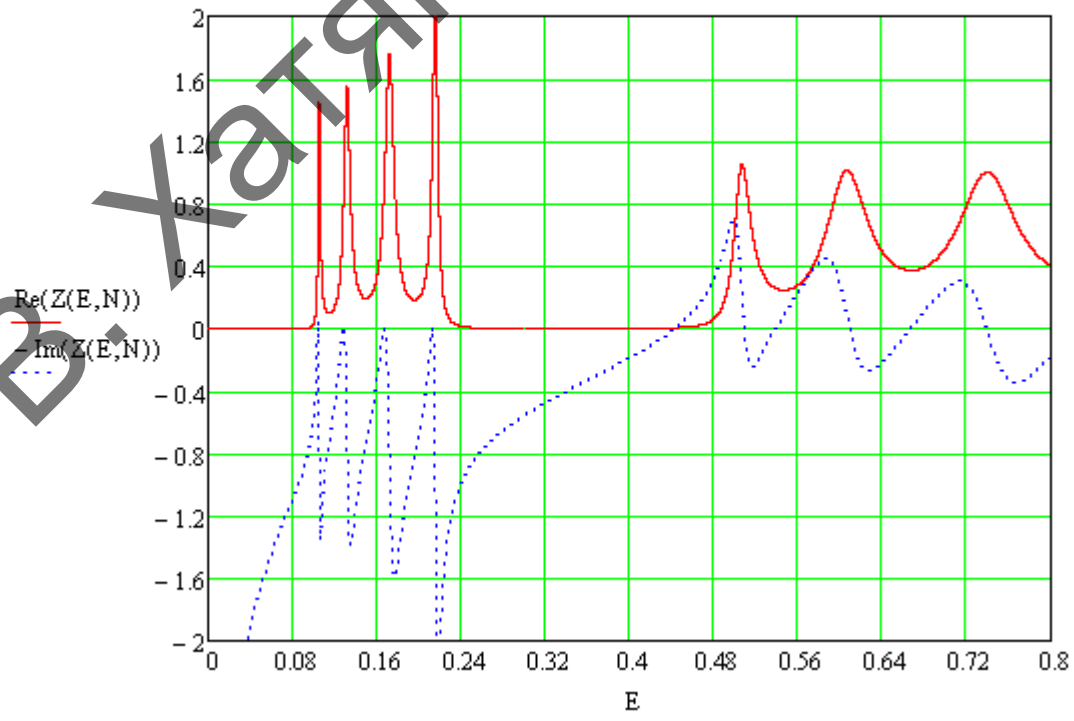
$$E1 := 0.0001 \qquad E2 := 0.8 \qquad dE := 0.00001 \qquad E := E1, E1 + dE .. E2$$

Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Залежності активної і реактивної складових вхідного імпедансу необмежених НҐ

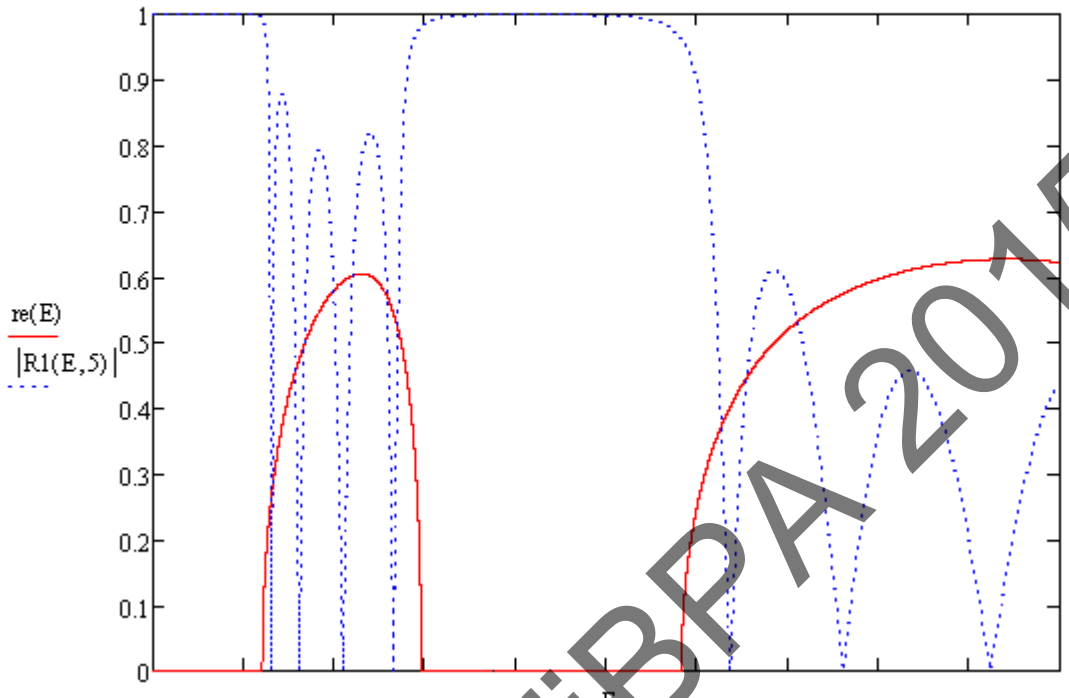


Залежності активної і реактивної складових вхідного імпедансу обмежених НҐ



Д. В. Хатян, КІВРА 2015

Залежності коефіцієнта відбиття обмежених НҐ і активної сладової необмежених НҐ



Д. В. Хатян, КІВРА 2015