

УДК 004.3

І.Д. ВОЙТОВИЧ, В.М. КОРСУНСЬКИЙ, Ф.Т. ЛАВРИК

ВУГЛЕЦЕВА НАНОЕЛЕКТРОННА ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ІНФОРМАТИКИ. Ч. I

Анотація. Стаття знайомить читачів з новітньою елементною базою, яка може прийти на зміну кремнієвій елементній базі. Стисло описані властивості фулеренів, вуглецевих нанотрубок (ВНТ) і плівок графену та вже реалізовані на їх основі транзистори, логічні елементи, резистори, міжз'єднання, комірки пам'яті, надчутливі сенсори та пристрої відображення інформації. Вказано на їх переваги і перспективи впровадження вже у найближчі десятиліття.

Ключеві слова: вуглецеві нанотрубки (ВНТ), фулерени, графен, логічні і запам'ятовуючі елементи, резистори, міжз'єднання, польові транзистори на ВНТ і графені, хімічні сенсори.

Аннотация. Статья знакомит читателей с новейшей элементной базой, которая может сменить кремниевую элементную базу информатики. Кратко описаны свойства фуллеренов, углеродных нанотрубок и пленок графена, а также реализованные на их основе транзисторы, логические цепи, резисторы, межсоединения, ячейки памяти, сверхчувствительные сенсоры и устройства воспроизведения информации. Указаны их преимущества и перспективы внедрения уже в ближайшие десятилетия.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки (УНТ), фуллерены, графен, логические и запоминающие элементы, резисторы, межсоединения, полевые транзисторы на УНТ и графене, химические сенсоры.

Abstract. This paper introduces readers with up to date element base which can replace silicon element base of informatics. The properties of fullerenes, carbon nanotubes (CNT), graphene films were briefly described as well as transistors, logic circuits, resistors, interconnections, memory cells, ultra-sensitive sensors and display devices were realized on their base. The advantages and prospects of implementation of such elements in the nearest decades were pointed out.

Keywords: carbon nanotubes (CNT), fullerenes, graphene, logical and memory elements, resistors, interconnections, field transistors on CNT and graphene, chemical sensors.

1. Вступ

Вже понад півстоліття елементна база інформатики ґрунтується в основному на кремнії. На це було багато вагомих причин, які ми не будемо перелічувати. Проте у прийдешні десятиліття матеріальна основа елементної бази інформатики може змінитися. Не менш, а навіть більш розповсюдженим на Землі та на інших планетах хімічним елементом, ніж кремній, є вуглець. Проте до останніх десятиліть ХХ ст. вважалося, що вільний вуглець існує лише у трьох формах: вугілля, графіт та алмаз. Вугілля (і сажа) є аморфною формою вуглецю, а кристалічний графіт напівметалом, – обоє здавались малопритатними для побудови елементної бази інформатики. Кристали алмазу вже давно привертають увагу дослідників, на них можна багато чого зробити. Проте алмаз – надто коштовний матеріал, щоб на ньому могла базуватися електроніка масового вжитку.

Ситуація змінилася в останні десятиліття ХХ ст., коли були відкриті та вивчені такі невідомі раніше форми існування вуглецю, як фулерени, вуглецеві нанотрубки (ВНТ) та графен. Виявилось, що вони цілком придатні для побудови багатьох, вже наноелектронних пристроїв інформатики з характеристиками, кращими, ніж у кремнієвих пристроїв. Цей напрям наноелектронної елементної бази інформатики дуже швидко розвивається.

Мета даної статті – ознайомити широке коло фахівців з обчислювальної та інформаційної техніки з принципами функціонування елементів та пристроїв інформатики на основі нових форм вуглецю – фулеренів, вуглецевих нанотрубок (ВНТ) та плівок графену – з наявними здобутками у цьому напрямі та з перспективами його впровадження.

Стаття складається з трьох частин. В ч. 1 ми знайомимо Вас зі структурою та властивостями фулеренів, ВНТ і плівок графену, а також описуємо можливості реалізації на їх основі ефективних резисторів та міжз'єднань великих інтегральних схем. В ч. 2 описуються вже реалізовані на їх основі транзистори, логічні елементи, комірки та пристрої пам'яті, а в ч. 3 – надчутливі сенсори та пристрої відображення інформації.

2. Фулерени та вуглецеві нанотрубки

Відкриття фулеренів відмічене Нобелівською премією в галузі хімії за 1996 р. Першими були вивчені молекули C_{60} , структура яких показана на рис. 1 ліворуч.

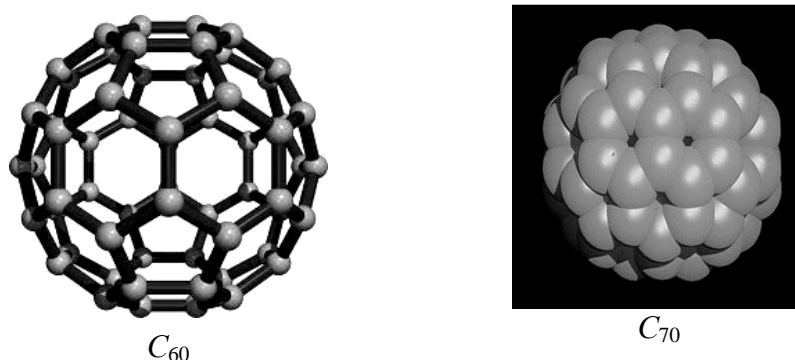


Рис. 1. Ліворуч – структурна модель фулерену C_{60} ; праворуч – графічне представлення результатів комп'ютерного розрахунку молекули фулерену C_{70}

У цій молекулі усі атоми карбону розташовані на поверхні, яка складається з 20 шестикутних та 12 п'ятикутних граней і схожа за формою на футбольний м'яч. Названа молекула на честь архітектора Р.Б. Фулера, який будував вибагливі оригінальні склепіння у формі ікосаедрів, за структурою дуже схожі на молекулу C_{60} . Діаметр молекули C_{60} приблизно 0,9 нм. Пізніше були вивчені молекули вуглецю C_{70} , схожі на молекули C_{60} . Маючи не 20, а 25 шестикутників на поверхні, вони трохи видовжені порівняно з молекулами C_{60} і нагадують своєю формою м'яч для регбі. Результат квантово-механічних комп'ютерних розрахунків молекули C_{70} показаний на рис. 1 праворуч (так виглядає ззовні електронна «шуба» цієї молекули). Молекула C_{70} теж названа фулереном. Пізніше було виявлене існування й багатьох інших «фулеренів» – замкнених об'ємних молекул з атомів карбону, що складаються з меншої (наприклад, з 20 – у найменшому з можливих фулеренів) та з більшої кількості атомів, наприклад, з 240, 540 і навіть з 960 атомів.

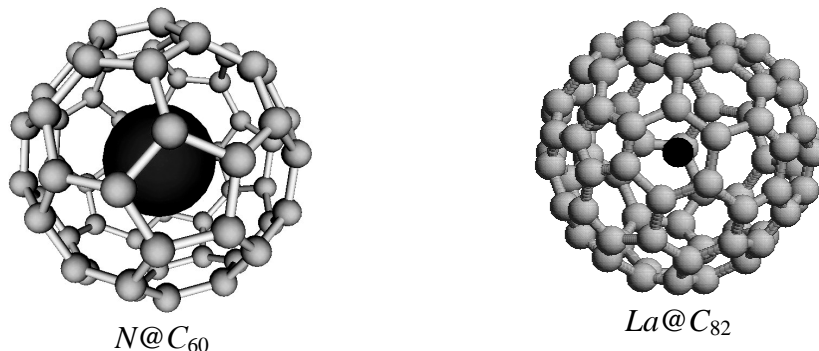


Рис. 2. Ліворуч – атом нітрогену, капсулований у молекулі C_{60} ; праворуч – молекула C_{82} з капсулованим у ній атомом лантану

Оскільки в середині молекул фулерена є досить велика (за атомним масштабом) порожнина, то в цю порожнину, як виявилось, можуть бути «капсуловані» інші атоми. На рис. 2 показані два приклади молекул фулерена з капсулованими в середині них атомами нітрогену та лантану. Для такого роду не знаних раніше хімічних сполук довелося ввести спеціальне хімічне позначення. Наприклад, хімічна формула $La@C_{82}$ означає атом лантану, капсулований у середині молекули фулерена C_{82} .

Капсуловані атоми суттєво змінюють властивості відповідних молекул фулерена – їх молекулярну масу, магнітний момент, електричний заряд тощо [1–4]. Кристали фулерена з капсулованими атомами лужних металів виявились, наприклад, надпровідними. Кристал $K_3@C_{60}$ (три атоми калію, капсуловані в молекулі фулерена C_{60}) переходить у надпровідний стан при температурі 18 К, а кристал $Cs_2Rb@C_{60}$ – при температурі 33 К. Металофулерени знайшли вже багато застосувань [5–8].

Міцна, стійка, вишукана молекула фулерена C_{60} , як і бензольне кільце, може бути конструктивною основою та «будівельним блоком» багатьох інших, не знаних раніше, молекул. Цілеспрямовану модифікацію молекул фулеренів шляхом приєднання до них молекулярних груп зі специфічними властивостями називають «спеціалізацією» фулеренів.

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) теж є великими молекулами, побудованими з атомів карбону [9, 10]. Типова структурна схема одношарової ВНТ та результат комп'ютерного

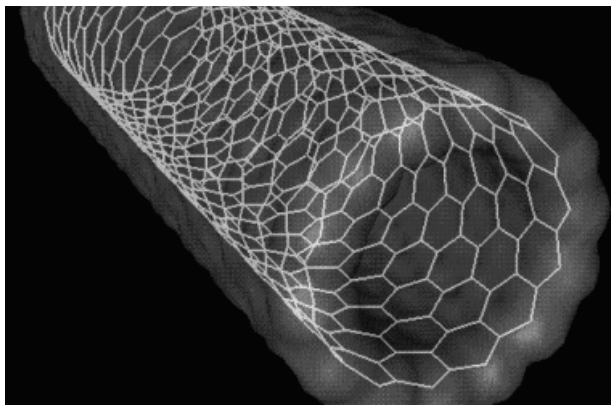


Рис. 3. Структурна схема каркасу одношарової ВНТ та результат квантово-механічного розрахунку її молекулярних орбіталей

розрахунку її молекулярних орбіталей показані на рис. 3 [11]. У вершинах усіх шестикутників та п'ятикутників, зображених білими лініями, розташовані атоми карбону. Для того, щоб структуру каркасу ВНТ було добре видно, атоми карбону тут не показані. Але їх не важко собі уявити у кожній вершині шестикутників. Сірим тоном показаний вигляд молекулярних орбіталей бічної поверхні ВНТ.

Теорія [12] вказує, що структуру бічної поверхні одношарової ВНТ можна уявити собі як згорнутий у трубочку один шар кристалу графіту. Згортати можна лише в тих напрямках, при яких досягається суміщення гексагональної решітки

самої з собою при замиканні циліндричної поверхні. Тому ВНТ мають лише певний набір діаметрів і класифікуються за векторами, які вказують напрямок згортання гексагональної решітки. Від цього залежать і зовнішній вигляд, і варіації властивостей ВНТ. Три типові варіанти показані на рис.4. Набір діаметрів ВНТ перекриває діапазон від дещо менше 1 нм до багатьох десятків нанометрів. А довжина ВНТ сягає десятків мікрометрів. Рекордні за довжиною ВНТ вже довші за 1 мм.

В залежності від напрямку згортання графітового шару нанотрубки можуть бути як провідниками, так і напівпровідниками. ВНТ «сідлової» структури завжди мають досить високу «металеву» електропровідність, у той час, як ВНТ зі структурою „zigzag” можуть бути „напівпровідними”.

Є також і багатошарові ВНТ. Деякі з них схожі на згорнутий у сувій графітовий шар. Але більшість складається зі вставлених одна в одну одношарових трубочок, з'єднаних між собою силами Ван дер Ваальса. Якщо одношарові ВНТ практично завжди закриті кришками, то багатошарові ВНТ бувають і відкритими. На них спостерігається зазвичай набагато більше дрібних дефектів структури, ніж на одношарових ВНТ. Тому для застосувань в електроніці перевагу віддають останнім.

ВНТ бувають не лише прямолінійними, а й криволінійними, зігнутими з утворенням «коліна», і навіть повністю згорнутими у вигляді тора. Нерідко кілька ВНТ міцно з'єднані між собою і утворюють розгалуження та «джгути».

ВНТ виявились напрочуд міцними, у 100 разів міцнішими за сталь. При пружних деформаціях вони допускають відносно видовження аж до 14–16%. Модуль Юнга вздовж осі деяких ВНТ перевищує 5 ТПа. Для порівняння: у найбільш пружного з усіх металів – ітрію – модуль Юнга становить 520 ГПа.

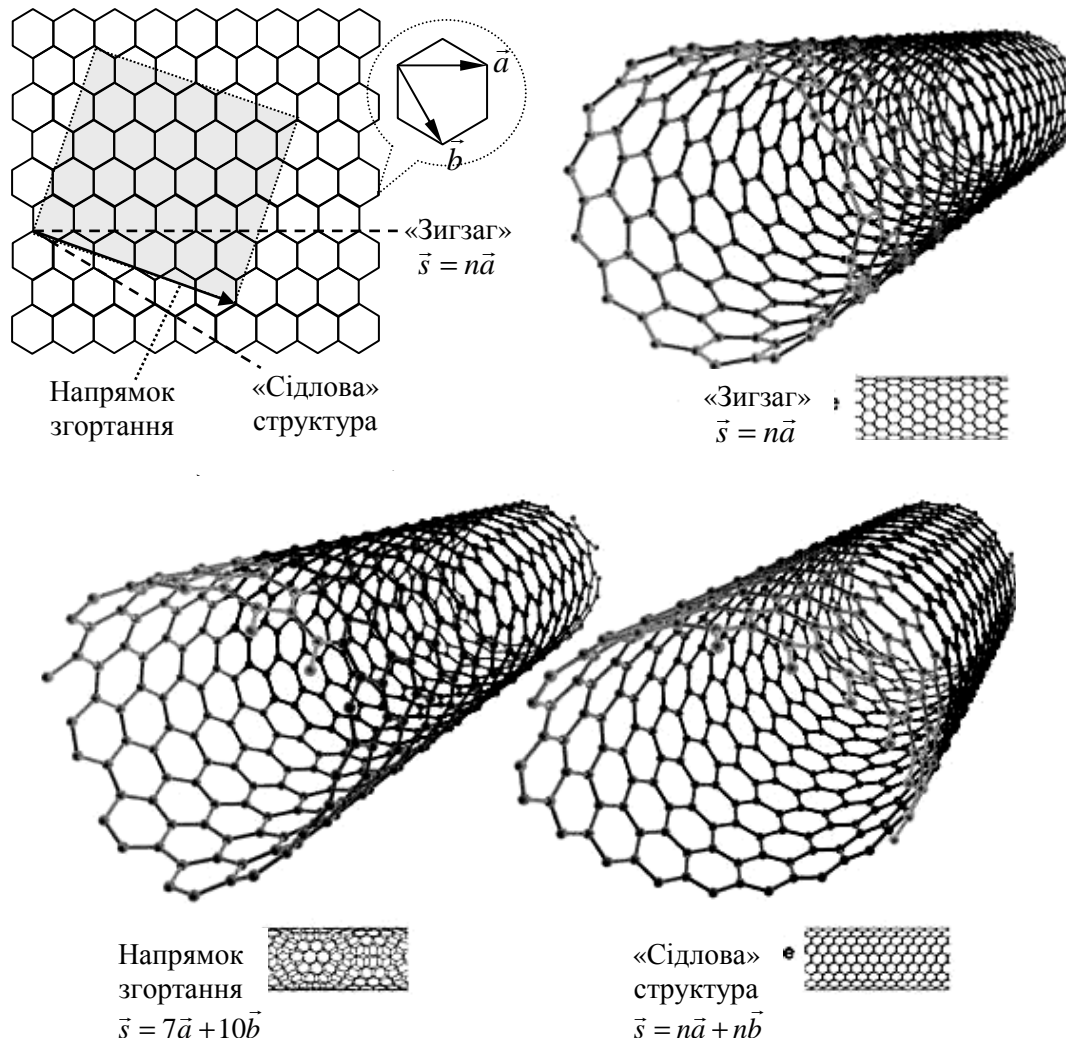


Рис. 4. Теоретична схема формування бічної поверхні одношарової ВНТ та приклади різновидностей ВНТ

Дуже міцними є ВНТ також і на згин та на скручування. Під дією критичних механічних напруг ВНТ поведуться особливо. Замість того, щоб рватися чи ламатися, вуглецева нанотрубка починає «на ходу» перебудовувати свої молекулярні орбіталі, пристосовуючись до нової форми (більш видовженої, стиснутої або зігнутої). Після зняття зовнішнього зусилля деформована таким чином ВНТ у багатьох випадках повертається у початковий стан. Ці властивості роблять ВНТ перспективними для використання в нових композиційних матеріалах там, де потрібні легкість і конструкційна міцність, стійкість до підвищених механічних навантажень.

Дуже цікаві властивості внутрішніх шарів багатшарових ВНТ. Зв'язані лише слабкими силами Ван дер Ваальса, внутрішні нанотрубки, як з'ясувалось, можуть легко рухатись одна відносно однієї. Етапи експерименту, який продемонстрував ці властивості, по-

казані на рис. 5. Багатошарова ВНТ одним кінцем закріплюється в механічній опорі (рис. 5 а). На протилежному кінці ВНТ хімічним методом знімають 1–3 шари її «шапки», так, щоб можна було приєднатись до внутрішніх нанотрубок (рис. 5 б). До звільненого кінця внутрішніх нанотрубок підводять маніпулятор. Якщо подати на нього додатну напругу, то внутрішні нанотрубки притягуються до маніпулятора (рис. 5 в). Якщо маніпулятор рухати вздовж осі ВНТ, то і внутрішні нанотрубки рухаються за ним (рис. 5 г). Їх можна витягувати із зовнішньої оболонки, як внутрішні трубки телескопічної антени.

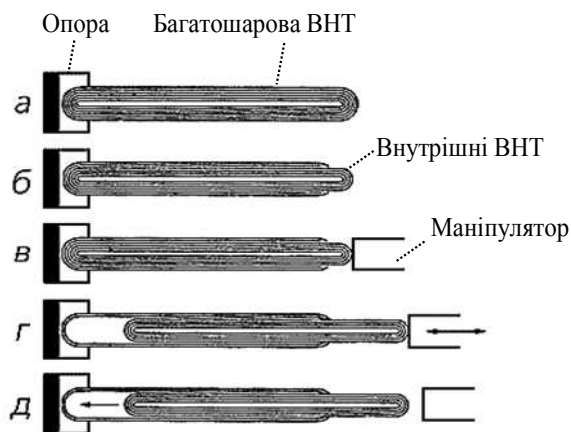


Рис. 5. Формування телескопічної ВНТ

Прецизійні вимірювання показали, що коефіцієнт тертя становить 10^{-5} , це набагато менше, ніж у найкращих макроскопічних конструкціях. Якщо з маніпулятора зняти електричну напругу і забрати його в сторону, то під дією капілярних сил внутрішні нанотрубки втягуються у свою оболонку до початкового стану (рис. 5 д). Це свідчить про те, що при витягуванні внутрішніх нанотрубок в оболонці утворюється вакуум.

Дуже мала сила внутрішнього тертя спонукала спробувати обертати трохи витягнуту внутрішню нанотрубку відносно зовнішньої. Виявилось, що во-

ни можуть легко, з мінімальним тертям, взаємно обертатися. Тобто вони утворюють дуже ефективний «нанопідшипник», який може працювати і при високих температурах. Це – готовий механічний вузол для майбутніх наноінструментів (нанодрілі, рухомі нанокаретки, наноманіпулятори, телескопічні наноконструкції тощо).

Як і у випадку фулеренів, у внутрішню порожнину ВНТ можна ввести інші атоми та молекули. Капсуловані в середині ВНТ речовини надійно захищаються вуглецевою оболонкою від впливів зовнішнього середовища. В експериментах, наприклад, дуже гігроскопічні карбідні, капсуловані в середині ВНТ, залишались стабільними після річного витримання у вологому повітрі. Феромагнітні матеріали (залізо, кобальт, нікель тощо) при капсулюванні зберігають свої феромагнітні властивості.

Цікаво, що в порожнину ВНТ можна капсулювати також і фулерени. ВНТ нагадує тоді стручок гороху, заповнений горошинами.

Зараз інтенсивно ведуться дослідження також з хімічної модифікації ВНТ [13, 14], коли деякі атоми карбону замінюють у складі молекули атомами бору чи нітрогену або до атомів вуглецю зовні хімічними методами приєднують атоми інших елементів, а до них – атомні чи навіть великі молекулярні групи з відповідними властивостями. Таку модифікацію називають «спеціалізацією» або «функціоналізацією» ВНТ. «Спеціалізовані» або «функціоналізовані» ВНТ стають придатними для ефективного виконання тих чи інших біологічних, електронних, медичних, сенсорних, оптоелектронних чи енергетичних функцій.

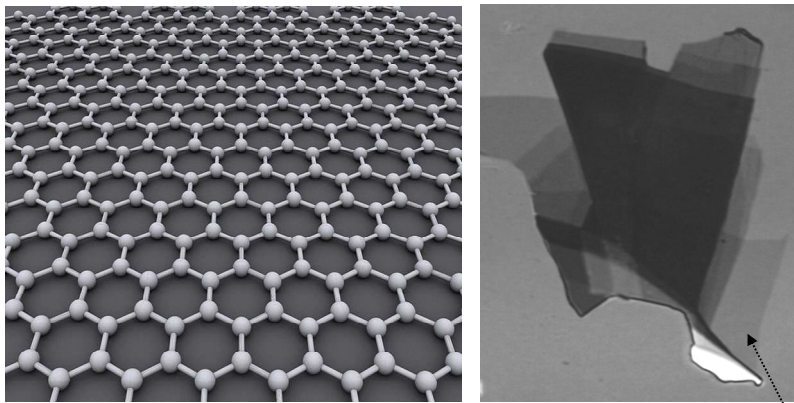
ВНТ та фулерени стали основою для багатьох нових перспективних напрямків в матеріалознавстві, нанотехнологіях, прикладній хімії, медицині тощо.

3. Графен та його фізичні властивості

Ще однією цікавою, раніше невідомою, формою існування вуглецю виявився графен (англ. graphene) – плівка з атомів карбону, яку можна розглядати як один відокремлений шар графіту (рис. 6) [15–20]. У 2004 р. плівку графену вдалося не лише відділити, але й експериментально дослідити її властивості, що відзначено Нобелівською премією за 2010 р. При малюванні звичайним графітовим олівцем такі плівки нерідко зустрічаються у відокремле-

них від графіту лусочках. Вони настільки дрібні, тонкі й прозорі, що їх дуже важко побачити. Лише за допомогою віртуозних інтерференційних методик їх зуміли спостерігати [19, 20]. На рис. 6 праворуч показана мікрофотографія однієї з ділянок сліду від графітового олівця, залишеного на пластині кремнію з окислом товщиною 300 нм. На ній можна побачити відокремлені від графіту лусочки різної товщини, найтонша з яких – одноатомний шар графіту. Це і є плівка графену.

Структурна модель графену показана на рис. 6 ліворуч [21, 22]. Атоми карбону зображені у вигляді кульок, вишикуваних у правильну двовимірну гексагональну решітку. Відстань між центрами сусідніх атомів карбону становить 0,142 нм. Тонкі «покривала» з плазми π -електронів, наче шар туману над водою, знаходяться з обох сторін плівки. І ці π -електрони (по одному від кожного атома) належать не окремим атомам чи парам атомів карбону, а «розпливаються» по усій плівці, «усуспільнюються», утворюючи легку електронну плазму. Квантово-механічний розрахунок [23–25] показав, що у графені, як і у графіті, в енергетичному спектрі π -електронів немає забороненої зони енергій, як у напівпровідниках чи ізоляторах.



Одноатомний шар – плівка графену

Рис. 6. Ліворуч – структурна модель плівки графену. Праворуч – мікрофотографія ділянки сліду від графітового олівця на окисленій пластині кремнію при збільшенні 2000x

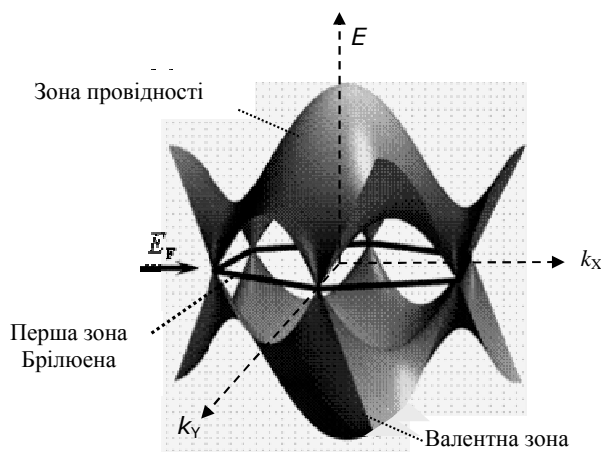


Рис. 7. Структура дозволених енергетичних зон графену

Валентна зона і зона провідності у графені дотикаються. Тому графен, як і графіт, є напівметалом. Залежність дозволених значень енергії π -електронів у графені від величини та напрямку їх хвильового вектора $\vec{k} = (k_x, k_y)$ показана на рис. 7.

Вздовж вертикалі тут відкладена енергія, вздовж осей абсцис та ординат – відповідні проекції хвильового вектора електрона (k_x, k_y) . Правильний шести-

кутник, що обмежує першу зону Брілюєна, виділено жирними чорними відрізками. Він розташований відносно осі аплікат на рівні енергії Фермі.

Поверхні, які описують структуру валентної зони та зони провідності, дотикаються у вершинах шестикутника. Ці точки називають «точками Дірака». При температурах, близьких до абсолютного нуля, валентна зона повністю заповнена електронами, а зона провідності пуста. При підвищених температурах, згідно з розподілом Фермі-Дірака, деяка частина електронів переходить у зону провідності, а у валентній зоні залишаються «дірки». Це й зумовлює досить високу елек-

тропровідність графену при кімнатних температурах. Концентрація носіїв заряду в точках Дірака при таких температурах становить приблизно $5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Дуже цікавою особливістю графену є те, що навколо точок дотику енергетичних зон дисперсійне відношення (тобто залежність між енергією та хвильовим вектором електрона) є лінійним:

$$E(k) = E_F + ak . \quad (1)$$

Це означає, що поблизу точок дотику зон як електрони провідності, так і дірки в графені мають нульову ефективну масу. Тобто вони, як і фотони, не можуть бути нерухомими в жодній системі координат, а можуть існувати, лише рухаючись. Роль швидкості світла тут грає так звана «швидкість Фермі», яка у графені становить приблизно 10^6 м/с і є вже релятивістською. Цим зумовлені дуже висока рухливість носіїв електричного заряду у графені, яка мінімум на 2 порядки перевищує їх рухливість у кремнії, і «балістичний» характер їх руху вздовж плівки. Довжина вільного пробігу електронів провідності та дірок у графені при кімнатних температурах перевищує 1 мкм. Проте не треба забувати, що як «дірки», так і «електрони провідності» є в даному випадку «квазічастинками», лише зручними моделями. А насправді мова йде тут про колективний рух електронної плазми.

Завдяки вдалій «конструкції», плівки графену напрочуд міцні та пружні [26]. Модуль Юнга у них – порядку 1 ТПа, границя міцності – 130 ГПа [27]. Незважаючи на свою малу товщину ($< 0,5$ нм), вони настільки щільні, що не пропускають крізь себе навіть атоми гелію, які здатні проникати, наприклад, крізь фольгу з металу. Про легкість плівок графену дає уяву те, що лише один грам графену, будучи цілісною плівкою, накрив би площу 2600 м^2 – ціле футбольне поле [28, 29].

Графен має дуже високу теплопровідність – порядку $5 \times 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ [30], що в поєднанні з високою електропровідністю зумовлює можливість проходження в ньому електричного струму в мільйон разів більшого, ніж максимально можливий струм у плівках міді. Графен майже не поглинає видиме світло, коефіцієнт його пропускання перевищує 97% [31, 32]. Комплексний показник заломлення графену для видимої частини спектра становить приблизно $n = 2,0 - 1,1i$.

Властивості графену, особливо електричні, можуть суттєво змінитися при хімічній модифікації графену [33]. Наприклад, при обробці плівки графену в холодній плазмі водню до атомів карбону приєднуються атоми водню. Структура плівки значно змінюється, як показано на рис. 8 [34].

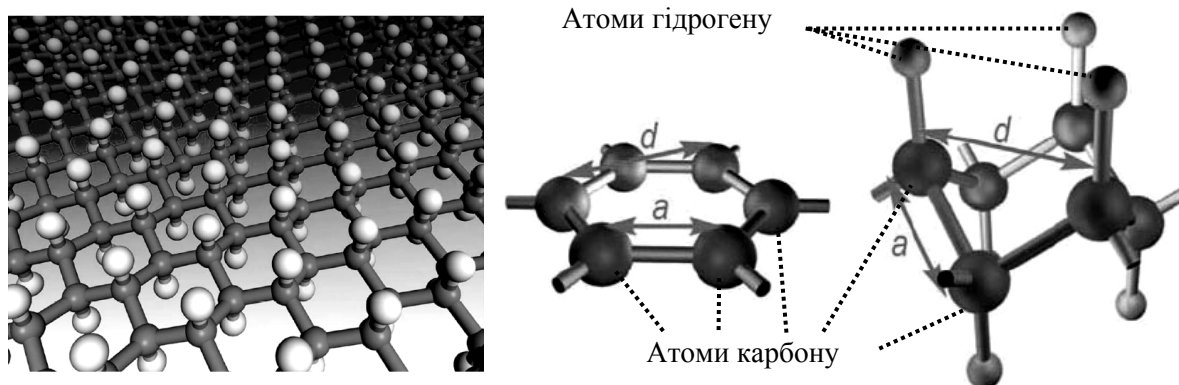


Рис. 8. Ліворуч – структурна модель графену (білі кульки – атоми водню). Порівняння структури плівки графену (в центрі) зі структурою плівки графену (праворуч). В обох випадках показане лише одне 6-членне кільце з атомів карбону

Атоми карбону вже не розташовуються в одній площині. Зникає «покривало» з π -електронів, бо ці електрони утворюють ковалентні зв'язки з атомами гідрогену. Плівка стає товщою, а головне, радикально змінюється енергетичний спектр електронів. Утворена в результаті гідрування плівка, яку називають «графаном», є вже діелектриком. Під час обробки плазмою водню частину плівки графену можна захистити резистом, і тоді гідрування графену буде відбуватись відповідно до наперед заданої топології. Тобто не захищена частина плівки перетворюється на діелектрик графан, а захищена залишається графеном з високою електропровідністю. Цікаво, що при відпалюванні плівок графану в атмосфері аргону при 425 С атоми гідрогену відщеплюються, й таким чином можна знову отримати графен.

Більш стійким до нагрівання і хімічно стійким є фторграфен (флуорографен) – плівка графену після приєднання атомів фтору (флуору) [35]. Він є напівізолятором з шириною забороненої зони близько 3 еВ та питомим опором порядку 10^{12} Ом на квадрат. Як і гідрування, фторування графену може бути проведене крізь маску з резиста відповідно до наперед заданої топології.

У деяких публікаціях графеном (двох-, трьох-, багатошаровим) називають також плівки, які складаються з двох, трьох або й більше шарів. Строго кажучи, це вже не графен. Для позначення таких плівок точніше вживати термін «нанографіт».

4. Провідники, між'єднання інтегральних схем і резистори на основі графену, ВНТ та фулеренів

Як впливає з вищесказаного, на плівці графену, нанесеній на ізолюючу підкладку (наприклад, з окисненого кремнію), за допомогою нанолітографії та фторування (чи гідрування) можна реалізувати високоякісний шар міжз'єднань великої інтегральної схеми [36]. Навіть при нанометровій ширині доріжки з графену мають досить високу електропровідність і можуть проводити електричний струм, набагато більший, ніж таких же розмірів доріжки з плівок міді чи золота.

Ефективними провідниками в інтегральних схемах можуть бути і ВНТ. Вони теж добре контактують із золотом, паладієм, платиною, титаном. У стані металевої провідності вони можуть пропускати електричний струм густиною до 10^9 А/см², у той час, як мідна дротина руйнується вже при густині струму 10^6 А/см². Причиною такої переваги є дуже мала концентрація дефектів у ВНТ, що значно зменшує розсіювання електронів і тепловиділення при проходженні електричного струму, а також рекордно висока теплопровідність ВНТ (набагато вища за теплопровідність міді та кремнію) й висока тепловіддача. Показано [37, 38], що у багатошарових ВНТ діаметром менше 5–25 нм і довжиною понад 10 мкм електропровідність навіть при кімнатній температурі не залежить від довжини нанотрубки та від її діаметра і дорівнює «кванту електропровідності» $\sigma = \frac{2e^2}{h} = (12,9 \text{ кОм})^{-1}$. Електрони рухаються крізь такі ВНТ практично без розсіювань, тобто має місце «балістичний» перенос зарядів.

Напівпровідникові ВНТ, діапазон питомого електричного опору яких перекриває дуже широкий діапазон, можуть бути використані як резистори нанометрових розмірів з досить гарними можливостями розсіювання тепла.

Вже розроблені деякі методи формування потрібної топології розміщення ВНТ на поверхні вкритих окислом пластин кремнію, сумісні зі стандартною технологією мікроелектроніки. Щільність прокладання міжз'єднань інтегральної схеми такими методами визначається лише можливостями нанолітографії, яка на сьогоднішній день забезпечує проєктні норми, вже менші за 30 нм.

Вертикально вирощені вуглецеві нанотрубки (є й такі технології вирощування) дозволяють формувати надійні переходи з одних шарів (рівнів) інтегральної схеми в інші, розширюючи можливості об'ємного монтажу.

Для міжз'єднань між декількома шарами металізації (або «графенізації») в багатошарових інтегральних схемах можна використати також полімерні молекули, здатні проводити електричний струм. Для ефективного вирішення проблеми електричного контакту таких молекул з металом використовують фулерени. Це схематично показано на рис. 9 ліворуч.



Рис. 9. Ліворуч – схема приєднання електропровідної молекули до золотих контактів через фулерени; праворуч – структурна формула однієї з таких електропровідних молекул «C₆₀ – поліфенілен – C₆₀»

Праворуч показано випадок, коли роль електропровідної полімерної молекули відіграє поліфенілен. Виявилось, що молекули фулерена утворюють міцний ковалентний зв'язок з поверхнею золота, платини, титану. При цьому π-електрони фулерена безпосередньо взаємодіють як з електронною плазмою металу, так і з π-електронами поліфенілену. Утворюється суцільний канал провідності без тунельних переходів. Таким чином в інтегральних схемах можна прокладати ефективні електричні міжз'єднання нанометрової і навіть субнанометрової ширини.

5. Висновки

1. Вуглець (карбон) є більш розповсюдженим на Землі та на інших планетах хімічним елементом, ніж кремній. Тому й вироби з нього можуть бути дешевшими. За останні десятиліття відкриті та вивчені такі невідомі раніше форми існування вуглецю, як фулерени, вуглецеві нанотрубки (ВНТ) та графен. Міцна, стійка, вишукана молекула фулерена C₆₀, як і бензольне кільце, може бути конструктивною основою та «будівельним блоком» для багатьох інших, не знаних раніше, молекул. Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) теж є великими молекулами, побудованими з атомів карбону.

2. Набір можливих діаметрів ВНТ перекидає діапазон від дещо менше 1 нм до багатьох десятків нанометрів. А довжина ВНТ сягає десятків мікрометрів, у рекордних – навіть 1 мм. В залежності від напрямку згортання («хіральності») ВНТ можуть бути як провідниками, так і напівпровідниками. Відмінні механічні властивості роблять ВНТ перспективними для використання в нових композиційних матеріалах там, де потрібні легкість і конструкційна міцність, стійкість до підвищених механічних навантажень. Можна вирощувати не лише одношарові, але й багатошарові ВНТ. Їх внутрішні нанотрубки, зв'язані лише слабкими силами Ван дер Ваальса, можуть легко рухатись одна відносно іншої. Вони утворюють дуже ефективний «нанопідшипник», який може працювати і при високих температурах. Це – готовий механічний вузол для майбутніх наноінструментів (нанодрілі, рухомі нанокаретки, наноманіпулятори, телескопічні наноконструкції тощо).

В середину фулеренів і ВНТ можуть бути «капсуловані» інші атоми, завдяки яким можна цілеспрямовано змінювати фізичні властивості вказаних молекул. ВНТ та фулерени стали основою для багатьох нових перспективних напрямів у матеріалознавстві, нанотехнологіях, прикладній хімії, медицині тощо.

3. Графен – це двовимірний кристал, плівка товщиною в один атом, яку можна розглядати також як один відокремлений шар графіту. Завдяки вдалій «конструкції», плівки графену напрочуд міцні та пружні, мають дуже високі електропровідність і теплопровідність, що зумовлює можливість проходження в них електричного струму в мільйон разів більшого, ніж максимально можливий у плівках міді. Графен має також й інші, цінні для наноелектроніки властивості.

4. На плівці графену, нанесеній на ізолюючу підкладку за допомогою нанолітографії та фторування (чи гідрування), можна реалізувати високоякісний шар міжз'єднань великої інтегральної схеми. Ефективними провідниками в інтегральних схемах можуть бути і ВНТ. Вони добре контактують із золотом, паладієм, платиною, титаном і можуть пропускати електричний струм густиною до 10^9 А/см². Вертикально розміщені ВНТ можна використовувати в багат шарових інтегральних схемах для міжз'єднань між декількома рівнями комутації. З цією ж метою можна використати також полімерні молекули, здатні проводити електричний струм. Для забезпечення низькоомного електричного контакту таких молекул з металом використовують фулерени.

5. Напівпровідникові ВНТ, діапазон питомого електричного опору яких перекидає дуже широкий діапазон, можуть бути використані як резистори нанометрових розмірів з досить гарними можливостями розсіювання тепла.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фуллерены: синтез и теория образования / Г.Н. Чурилов, Н.В. Булина, А.С. Федоров; отв. ред. В.Ф. Шабанов. – Новосибирск: СО РАН, 2007. – 229 с.
2. Хаматгалимов А.Р. Эндоздральные высшие металлофуллерены: структура и свойства / А.Р. Хаматгалимов, В.И. Коваленко // Российский химический журнал. – 2004. – Т. 48, N 5. – С. 28 – 36.
3. Кочканын Р.О. Синтез и строение сверхструктурных координационных комплексов фуллерена C₆₀ с атомами железа и никеля / Р.О. Кочканын, М.М. Нечитайлов, А.Н. Заритовский // Электронный научный журнал «Молекулярные технологии». – 2010. – Т. 4, Вып. 4.1. – С. 44 – 69.
4. Эндоздральные металлофуллерены: синтез, выделение, реакционная способность, возможные применения [Электронный ресурс] / В.П. Бубнов, И.Е. Кареев, А.И. Котов [и др.]. – Режим доступа: <http://ichms.com.ua/Library/ICHMS09/download/432-433.pdf>.
5. 89Y and 13C NMR Cluster and Carbon Cage Studies of an Yttrium Metallofullerene Family, Y₃N@C_{2n} (n=40-43) / F. Wujun, X. Liaosa, A. Hugo [et al.] // Journal of the American Chemical Society. – 2009. – Vol. 31 (33). – P. 11762 – 11769.
6. Facile Preparation of a New Gadofullerene-Based Magnetic Resonance Imaging Contrast Agent with High 1H Relaxivity / C. Shu, F.D. Corwin, J. Zhang [et al.] // Bioconjugate Chemistry. – 2009. – Vol. 20 (6). – P. 1186 – 1193.
7. Dorn H.C. Endofullerenes: New NanoProbes for Diagnostic and Therapeutic Medical Applications / H.C. Dorn // 34th NAFF Symposium on Chemistry and Molecular Biology. – Louisville: University of Kentucky, KY. – 2008.
8. Dorn H.C. Dynamics of Carbon Clusters Inside Fullerene Cages / H.C. Dorn // The 37th Fullerene-Nanotubes General Symposium, Tsukuba International Conference Center. – Tsukuba, Japan. – 2009.
9. Дьячков П.М. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применения / Дьячков П.М. – М.: Бином. – 2006. – 293 с.
10. Пул Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэне. – Москва: Техносфера. – 2009. – 336 с.
11. Castro Neto A.H. The carbon new age / A.H. Castro Neto // Materials Today. – 2010. – Vol. 13 (3). – P. 1.
12. Saito R. Physical Properties of Carbon Nanotubes / R. Saito, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus / World Scientific. – 1998. – 272 p.
13. Хабашеску В.Н. Ковалентная функционализация углеродных нанотрубок: синтез, свойства и применение фторированных производных / В.Н. Хабашеску // Успехи химии. – 2011. – Т. 80 (8). – С. 739 – 760.

14. Синтез и функционализация углеродных нанотрубок, применение в электрохимии и полевой эмиссии [Электронный ресурс] / А.В. Окотруб, Л.Г. Булушева, А.Г. Кудашов [и др.]. – Режим доступа: http://www.edu-cons.net/atlas_last/doc/321/1%2821%29.pdf.
15. Графен: методы получения и теплофизические свойства / А.В. Елецкий, И.М. Искандарова, А.А. Книжник [и др.] // Успехи физических наук. – 2011. – Т. 181, № 3. – С. 233 – 268.
16. The electronic properties of grapheme / A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres [et al.] // Rev. Mod. Phys. – 2009. – Vol. 81. – P. 109 – 112.
17. Graphene and Graphene Oxide: Synthesis, Properties, and Applications / Y. Zhu, S. Murali, W. Cai [et al.] // Advanced Materials. – 2010. – Vol. 22. – P. 3906 – 3924.
18. Philip Wong H.-S. Carbon Nanotube and Graphene Device Physics / H.-S. Philip Wong, D. Akinwande. – Cambridge: University Press, 2011. – 264 p.
19. Pati S.K. Graphene and its fascinating attributes / Pati S.K., Enoki T., Rao C.N.R. – World Scientific Pub. Co. Inc., 2011. – 287 p.
20. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov [et al.] // Science. – 2004. – Vol. 306. – P. 666 – 671.
21. Two-dimensional atomic crystals / K.S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin [et al.] // Proc. Natl. Acad. Sci. – 2005. – Vol. 102. – P. 1045.
22. Wallace P.R. The Band Theory of Graphite / P.R. Wallace // Phys. Rev. – 1947. – Vol. 71. – P. 622 – 625.
23. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene / K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov [et al.] // Nature. – 2005. – Vol. 438. – P. 197 – 200.
24. Kopelevich Y. Graphene physics in graphite / Y. Kopelevich, P. Esquinazi // Adv. Mater. – 2007. – Vol. 19. – P. 4559 – 4563.
25. Лозовик Ю.Е. Коллективные электронные явления в графене / Ю.Е. Лозовик, С.П. Меркулова, А.А. Соколик // УФН. – 2008. – Т. 178. – С. 757 – 776.
26. Castro-Neto A. H. The carbon new age / A.H. Castro-Neto // Materials Today. – 2010. – Vol. 13, N 3. – P. 12 – 17.
27. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer grapheme / C. Lee, X.D. Wei, J.W. Kysar [et al.] // Science. – 2008. – Vol. 321. – P. 385 – 388.
28. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene / K.I. Bolotin, K.J. Sikes, Z. Jiang [et al.] // Solid State Commun. – 2008. – Vol. 146. – P. 351 – 355.
29. Molecular doping of graphene / S.V. Morozov, K.S. Novoselov, M.I. Katsnelson [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 100. – P. 01660.
30. Superior thermal conductivity of single-layer grapheme / A.A. Balandin, S. Ghosh, W.Z. Bao [et al.] // Nano Lett. – 2008. – Vol. 8. – P. 902 – 907.
31. Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene / R.R. Nair, P. Blake, A.N. Grigorenko [et al.] // Science. – 2008. – Vol. 320. – P. 1308 – 1312.
32. Gusynin V.P. Unusual Microwave Response of Dirac Quasiparticles in Graphene / V.P. Gusynin, S.G. Sharapov, J.P. Carbotte // Phys. Rev. Lett. – 2006. – Vol. 96. – P. 25680.
33. Control of Graphene's Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphane / D.C. Elias, R.R. Nair, T.M.G. Mohiuddin [et al.] // Science. – 2009. – Vol. 323, N 5914. – P. 610 – 613.
34. Sofo J.O. Graphane: A two-dimensional hydrocarbon / J.O. Sofo, A.S. Chaudhari, G.D. Barber // Phys. Rev. – 2007. – Vol. B 75. – P. 15340.
35. Fluorographene: mechanically strong and thermally stable two-dimensional wide-gap semiconductor / R.R. Nair, W.C. Ren, R. Jali [et al.] // arXiv: 1006.3016 (15 June 2010).
36. Pinning of a two-dimensional membrane on top of a patterned substrate: the case of graphene / S.V. Kusminskiy, D.K. Campbell, A.H. Castro-Neto [et al.] // Physical Review B. – 2011. – Vol. 83, N 16. – P. 165405.
37. Measurement of scattering rate and minimum conductivity in grapheme / Y.-W. Tan, Y. Zhang, K. Bolotin [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2007. – Vol. 99. – P. 24680.
38. Unified description of the dc conductivity of monolayer and bilayer graphene at finite densities based on resonant scatterers / A. Ferreira, J. Viana-Gomes, J. Nilsson [et al.] // Physical Review B. – 2011. – Vol. 83, N 16. – P. 974 – 981.

Стаття надійшла до редакції 29.10.2012