

УДК 004.3

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

**ВУГЛЕЦЕВА НАНОЕЛЕКТРОННА ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ІНФОРМАТИКИ. Ч. 2**

\*Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна

\*\*Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна

\*\*\*Інститут високих технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

**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.

**Ключові 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

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

## 2. Транзистори та логічні схеми на основі ВНТ чи графену

На рис. 1 показані дві з багатьох можливих структур польових транзисторів на основі ВНТ [1–4]. В обох випадках напівпровідникова ВНТ розміщується у проміжку між металевими електродами витоку й стоку, утворюючи після відпалювання надійні електричні контакти з ними. В першій конструкції (ліворуч) електрод затвора теж формується з металу після нанесення на нанотрубку тонкого шару підзатворного діелектрика. У другій конструкції

(праворуч) електрод затвора формують з полікристалічного кремнію в окисненій пластині кремнію.

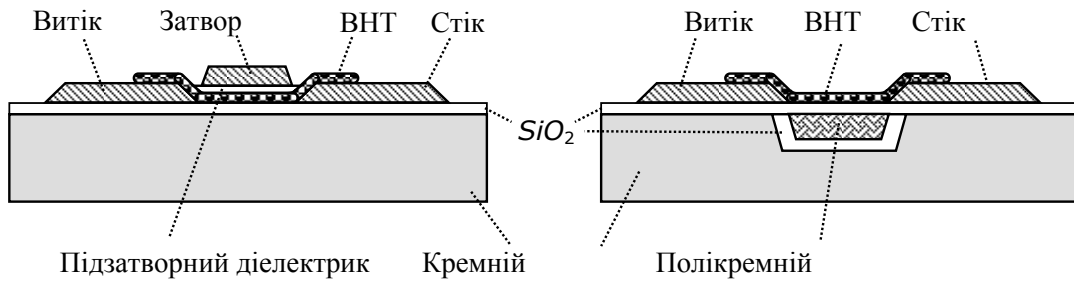


Рис. 1. Структура польових транзисторів на ННТ: ліворуч – з металевим затвором; праворуч – з затвором із полікристалічного кремнію

Варіантом першої конструкції є заміна металевого електрода затвора вуглецевою нанотрубкою з металевою провідністю, накладеною на підзатворний діелектрик ортогонально до напівпровідної ННТ. З використанням такого затвора вдалося побудувати і вивчити характеристики польових транзисторів з рекордно малою довжиною каналу (9 нм) [5].

Енергетичні діаграми транзистора на ННТ при різній напрузі на затворі показані на рис. 2. Ліворуч показана зонна діаграма в закритому стані транзистора, коли крізь нього тече найменший струм. Це має місце при такій напрузі  $U_{ЗАКР}$  на затворі, при якій рівень Фермі металевих електродів витоку розміщується посередині забороненої зони напівпровідної ННТ.

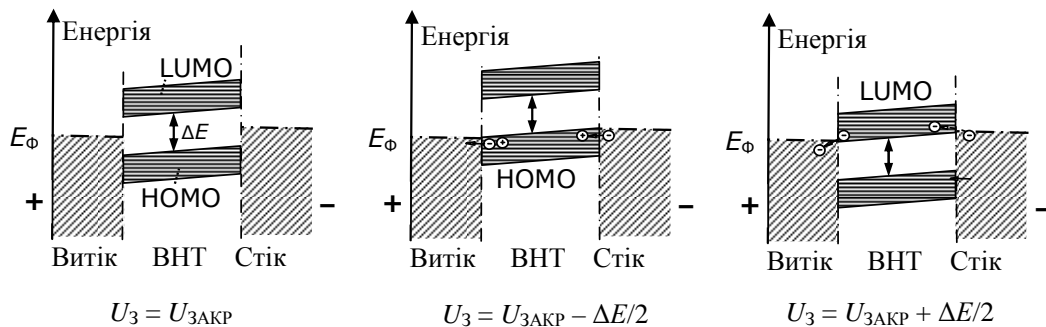


Рис. 2. Енергетична діаграма польового транзистора на ННТ при різній напрузі  $U_3$  між затвором і витоком

НОМО – це повністю заповнена електронами молекулярна  $\pi$ -орбіталь, а LUMO – найближча за енергією вільна молекулярна  $\pi$ -орбіталь, не заповнена електронами. При такій напрузі електричний заряд крізь нанотрубку можуть переносити лише рідкісні електрони, які, завдяки хаотичному тепловому руху набувають енергії, достатньої для того, щоб здолати потенціальний бар'єр  $\Delta E/2$  і перейти з металу на вільну LUMO. Оскільки при кімнатній температурі таких електронів дуже мало, то й електричний струм крізь транзистор дуже малий.

Якщо на затвор подати нижчу напругу  $U_3 = U_{ЗАКР} - \Delta E/2$ , то енергетичні рівні електронів на молекулярних орбіталях ННТ піднімаються на величину  $\Delta E/2$ , і рівень Фермі металевих електродів зрівнюється з верхнім краєм НОМО. Це показано на рис. 2 у центрі. Електрони з НОМО під дією прикладеного електричного поля між витоком і стоком отримують можливість вільно переходити в електрод витоку, залишаючи в заповненій НОМО «дірки». Ці «дірки» під дією того самого електричного поля рухаються в напрямку до стоку. Коли вони досягають контакту зі стоком, на їх місце переходять електрони з металу.

Такий «відкритий» транзистор добре проводить електричний струм, який має «дірковий характер», а нанотрубка стає каналом провідності  $p$ -типу.

Якщо на затвор подати вищу напругу  $U_3 = U_{ЗАКР} + \Delta E/2$ , то енергетичні рівні електронів на молекулярних орбіталях ВНТ опускаються на величину  $\Delta E/2$ , і рівень Фермі металевих електродів зрівнюється з нижнім краєм LUMO. Це показано на рис. 2 праворуч. Електрони з електроду стоку можуть вільно переходити на пусту LUMO, рухатись по ній вздовж ВНТ у напрямку витоку і там вільно переходити в електрод витоку. При цьому транзистор теж відкритий, електричний струм має «електронний» характер, а нанотрубка стає каналом провідності  $n$ -типу.

Типові вольтамперні характеристики польових транзисторів на основі ВНТ показані на рис. 3.

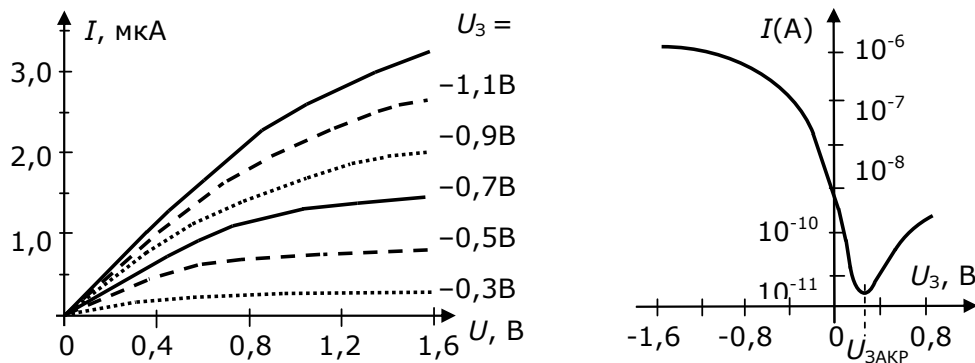


Рис. 3. ВАХ польових транзисторів на ВНТ:  $U$  – напруга між стоком та витоком;  $U_3$  – напруга між затвором і витоком;  $I$  – струм витоку

Ліворуч показано сімейство ВАХ при різній від’ємній напрузі  $U_3$  між затвором та витоком. Уздовж горизонталі відкладена напруга між витоком і стоком, уздовж вертикалі – електричний струм крізь транзистор. Праворуч показана залежність електричного струму крізь транзистор від напруги на затворі при фіксованій напрузі між витоком і стоком ( $U=0,6$  В). Вертикальна шкала тут логарифмічна. Видно, що струм крізь транзистор в закритому стані ( $U_{ЗАКР} \approx 0,3$  В) менший за 10 пА, а у відкритому стані ( $U_{ВІДКР} \approx 1,2$  В) може бути більшим на 5 порядків величини. Найбільша крутизна спостерігається при значеннях  $U_3$  від  $-0,3$  до  $+0,1$  В. Тут струм зростає вдсятеро при зниженні напруги на затворі на кожні 100 мВ. У транзисторах з використанням тонких ВНТ (1,2 нм) і підзатворного діелектрика з високою діелектричною сталою ( $\text{HfO}_2$ ) вдалось досягти ще більшої крутизни – зростання струму вдсятеро при зниженні напруги лише на 60 мВ.

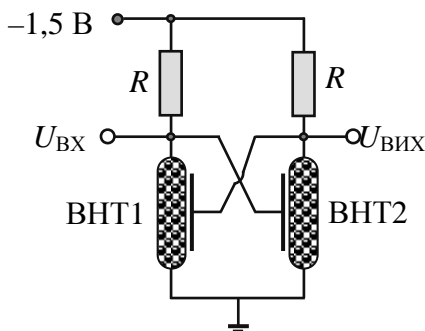


Рис. 4. Одна з принципових електричних схем тригера на ВНТ польових транзисторах (коли  $U_{ВХ} \approx -1,2$  В, транзистор на ВНТ2 відкритий,  $U_{ВИХ} \approx 0$  і транзистор на ВНТ1 закритий; коли  $U_{ВХ} \approx 0$ , транзистор на ВНТ2 закритий,  $U_{ВИХ} \approx -1,5$  В і транзистор на ВНТ1 відкритий)

Як регульований канал провідності напівпровідникова ВНТ має перевагу перед каналами провідності в напівпровідниках через те, що рухливість носіїв електричного заряду в нанотрубках значно вища, ніж у кремнії та в арсеніді галію, і розміри каналу можуть зменшуватись аж до молекулярних масштабів.

На таких транзисторах за відомими принципами можна будувати і підсилювачі слабких сигналів, і логічні елементи, і тригери (рис. 4) [6–8], і генератори імпульсів, і тактові генератори з діапазоном робочих частот до сотень гігагерц.

Проте фактичний частотний діапазон суттєво залежить від характеристик не лише транзистора, а й усіх інших компонентів схеми, особливо від величини паразитних ємностей.

Оскільки ВНТ достатньо довгі, то над однією нанотрубкою можна сформувати кілька затворів, що дозволяє просто реалізувати багатовходові логічні вентиля «І» (кон'юнкція) та «АБО» (диз'юнкція).

Ширина забороненої зони енергій у напівпровідникових ВНТ залежить від їх діаметра. Чим менший діаметр ВНТ, тим ширша заборонена зона енергій. Ширина забороненої зони більшості ВНТ не перевищує 1 еВ. Виявилось, що це дозволяє ефективно використати різницю в роботі виходу електронів з різних металів. Адже від цього параметра залежить значення напруги закривання транзистора  $U_{ЗАКР}$ . Використавши для виготовлення затворів одних транзисторів паладій, а затворів інших – алюміній, фахівцям з лабораторії IBM Research вдалося на одній ВНТ побудувати інвертор, що є аналогом КМДН інвертора. Структура такого інвертора показана на рис. 5 ліворуч. На підкладці кремнію 1 з окисним шаром 2 формують металеві електроди 3, 4 і 5, на які зверху накладають напівпровідну ВНТ 6. Після нанесення тонкого шару підзатворного діелектрика 7 формують електроди з паладію (Pd) і з алюмінію (Al). Потенціали закривання  $U_{ЗАКР(1,2)}$  польових транзисторів з такими затворами відрізняються більше, ніж на половину ширини забороненої зони нанотрубки. Тому при підключенні за схемою, показаною на рис. 5 посередині, спостерігається така картина.

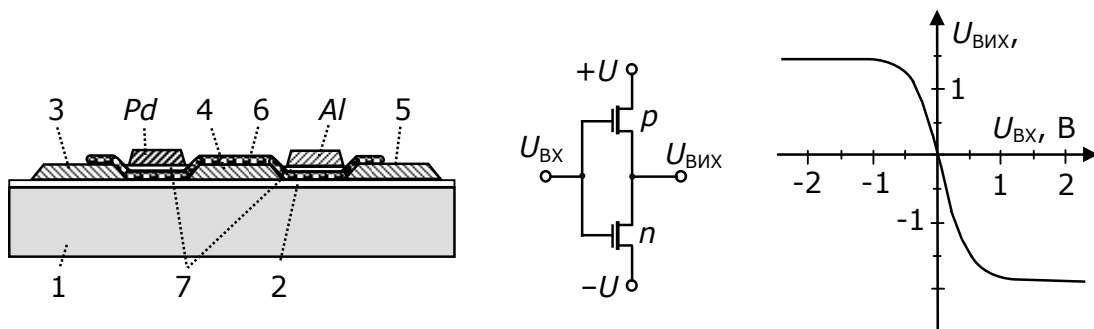


Рис. 5. Ліворуч – структура інвертора на комплементарних ВНТ транзисторах; у центрі – еквівалентна електрична схема інвертора; праворуч – передаточна характеристика

Коли на вхід інвертора подається від'ємна напруга  $U_{ВХ,0} \approx -1$  В, вона виявляється нижчою за потенціал закривання  $U_{ЗАКР,1}$  транзистора з затворним електродом із паладію, і тому частина ВНТ під цим електродом стає провідною з провідністю  $p$ -типу (ситуація показана на рис. 2 посередині). В той же час вхідна напруга  $U_{ВХ,0} \approx -1$  В приблизно дорівнює потенціалу закривання  $U_{ЗАКР,2}$  транзистора з затворним електродом з алюмінію, й тому частина ВНТ під цим електродом стає не провідною, закривається (ситуація показана на рис. 2 ліворуч). У результаті напруга на виході інвертора наближається до напруги живлення  $+U = +2$  В.

Коли на вхід інвертора подається напруга  $U_{ВХ,1} \approx +1$  В, вона виявляється близькою до потенціалу закривання  $U_{ЗАКР,1}$  транзистора з затворним електродом із паладію, і тому частина ВНТ під цим електродом закривається (ситуація показана на рис. 2 ліворуч). У той же час вхідна напруга  $U_{ВХ,1} \approx 1$  В є суттєво вищою за потенціал закривання  $U_{ЗАКР,2}$  транзистора з затворним електродом з алюмінію, й тому частина ВНТ під цим електродом стає електропровідною з провідністю  $n$ -типу (ситуація показана на рис. 2 праворуч). У результаті напруга на виході інвертора наближається до напруги живлення  $-U = -2$  В.

Залежність вихідної напруги інвертора від напруги на вході показана на рис. 5 праворуч. Інвертор на ВНТ працює аналогічно відомому інвертору на КМДН транзисторах. У статичному режимі він практично не споживає струму, бо один із транзисторів закритий.

Потужність споживається лише при перемиканнях і витрачається на перезарядку паразитних ємностей, які в молекулярних схемах можуть бути досить малими. Від цього залежить і швидкодія логічних схем, побудованих на ВНТ.

У роботі [9] показано, що можна вирощувати ВНТ, розгалужені у формі літери «Y» (рис. 6 ліворуч). Якщо до кінців такої «Y-ВНТ» приєднати електроди так, як показано на рис. 6 в центрі, то вона працює як польовий транзистор, еквівалентна схема якого показана праворуч.

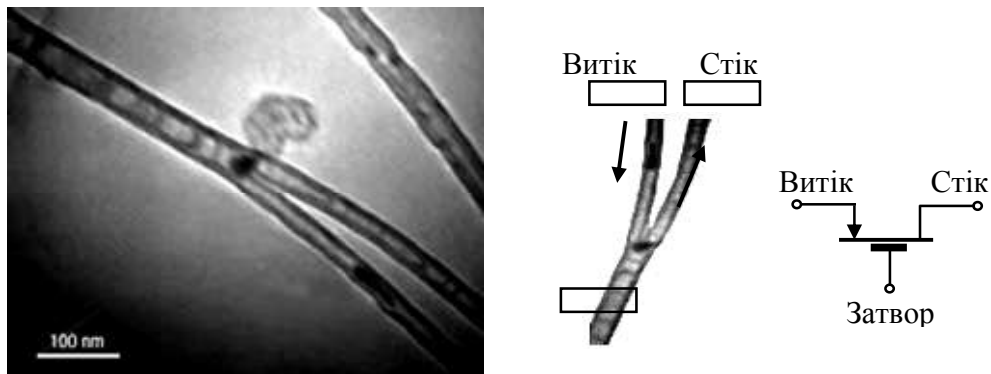


Рис. 6. Ліворуч – зображення в атомному силовому мікроскопі ВНТ з Y-розгалуженням; у центрі – схема формування електродів до такої ВНТ; праворуч – еквівалентна схема транзистора

Електричний струм із однієї гілки в іншу тече лише тоді, коли на затвор подається додатній потенціал. Коли ж на затвор подається від'ємний потенціал, електричний струм в іншу гілку не проходить. Проміжних значень струму зафіксувати не вдалося, струм вмикається та вимикається стрибком. Тобто «Y-ВНТ» є вентилям електричного струму, максимально інтегрованим вже при виготовленні.

Цікавим варіантом логічних схем на основі ВНТ є широко відома колись «релейна логіка» з використанням тепер уже наноелектромеханічних реле [10–16]. Зображення таких реле в растровому електронному мікроскопі показані на рис. 7.

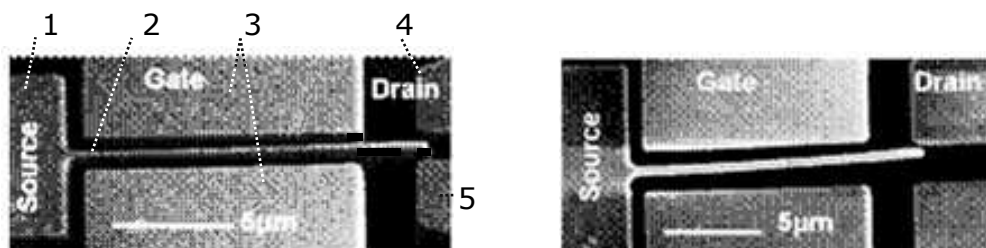


Рис. 7. Зображення наноелектромеханічного реле в растровому електронному мікроскопі: 1 – вхідний електрод; 2 – ВНТ; 3 – керуючі електроди; 4, 5 – вихідні електроди. Ліворуч – реле в нейтральному стані, праворуч – реле, замкнене на електрод 4

До вхідного електрода 1 «приварений» вхідний кінець ВНТ (2) з металевою провідністю. По обидва боки від ВНТ розташовані керуючі електроди 3. Якщо електричної напруги між ними немає, то ВНТ 2 знаходиться в нейтральному положенні, й вільний її кінець не контактує з жодним з вихідних електродів (4 і 5). Якщо ж між керуючими електродами 3 прикласти невелику електричну напругу (1–2 В), то ВНТ притягується до «додатного» електрода. На рис. 7 праворуч показано випадок, коли додатна напруга прикладена до верхнього керуючого електрода. Вільний кінець ВНТ дотикається до вихідного електрода 4. В нейтральному положенні струм на виході дорівнює нулю, при замиканні через

ВНТ може протікати електричний струм порядку 1 мкА. Час перемикання визначається лише швидкістю перезарядки паразитних ємностей і може бути порядку пікосекунд.

Перші польові транзистори на основі графену формували з суцільної плівки (рис. 8) [16–24].

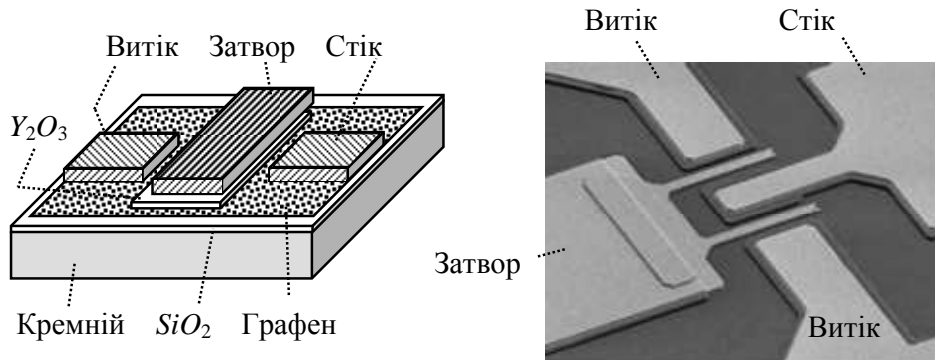


Рис. 8. Ліворуч – структура польового транзистора на основі графену. Праворуч – варіант топології електродів для збільшення струму стоку

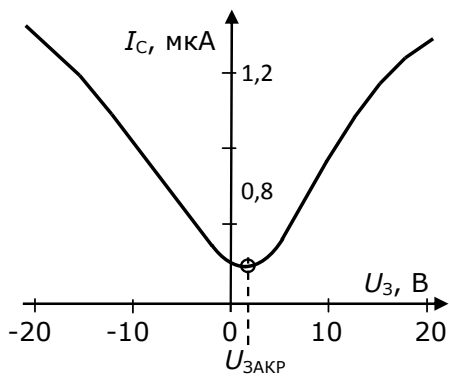


Рис. 9. Типова передаточна характеристика польового транзистора на основі графену;  $U_{ЗАКР}$  – напруга на затворі, при якій через транзистор тече мінімальний струм

На пластину кремнію, покриту товстим шаром оксиду ( $SiO_2$ ), наносили плівку графену. Поверх неї формували електроди витоку й стоку і наносили тонкий шар (1-3 нм) підзатворного діелектрика, зазвичай оксиду ітрію ( $Y_2O_3$ ) чи гафнію ( $HfO_2$ ). Над ним формували електрод затвора. Для збільшення електричного струму, що протікає крізь транзистор, збільшували ширину його каналу або використовували варіант топології, показаний на рис. 8 праворуч.

Типова залежність струму стоку  $I_C$  крізь транзистор від напруги  $U_3$  між затвором та витоком показана на рис. 9.

Значення напруги  $U_{ЗАКР}$  на затворі, при якій через транзистор тече мінімальний струм, залежить від роботи виходу електронів з електрода затвора і

може варіюватись в залежності від вибору металу, з якого формують затвор. А конкретні значення струму залежать від довжини та ширини каналу провідності та від напруги між витоком і стоком і теж можуть варіюватись у широких межах.

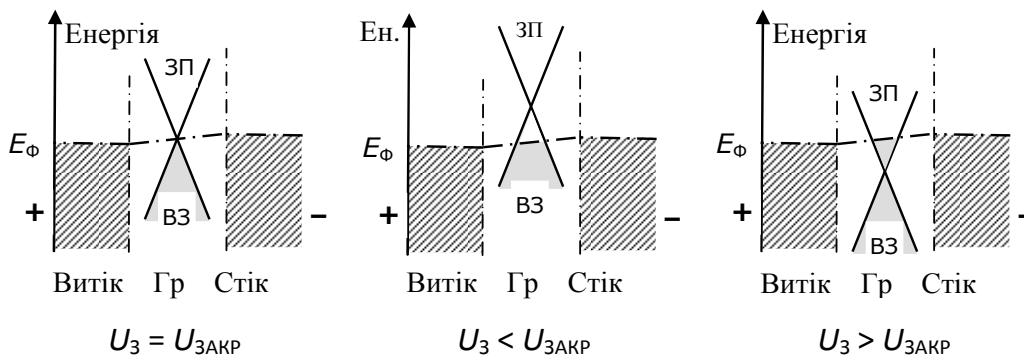


Рис. 10. Енергетична діаграма польового транзистора на суцільній плівці графену при різній напрузі  $U_3$  між затвором і витоком

Фізичну причину такої залежності пояснюють енергетичні діаграми, показані на рис. 10 [25, 26]. Вздовж вертикалі тут відкладена енергія усупільнених електронів металу та графену, вздовж горизонталі – координата. Підписами «Витік» та «Стік» позначені ділянки, які відповідають електродам з металу, а підписом «Гр» – ділянка каналу провідності у графені. Через  $E_F$  позначено рівень енергії Фермі. В області каналу провідності (Гр) умовно показані енергетичні зони графену: ВЗ – валентна зона і ЗП – зона провідності, які дотикаються між собою.

Коли до затвору прикладена напруга  $U_3=U_{3\text{акр}}$  (діаграма ліворуч), рівень енергії Фермі  $E_F$  проходить точно через точку дотику зон ВЗ та ЗП у графені. У цьому випадку валентна зона ВЗ практично повністю заповнена, а зона провідності ЗП графену практично пуста. Концентрація носіїв заряду в каналі транзистора найменша. Вона визначається лише рівнем теплової генерації носіїв заряду. Тому через транзистор тече найменший електричний струм.

Коли напруга на затворі знижується (енергетична діаграма в центрі), енергетичні зони у графені через підвищення електростатичної потенціальної енергії піднімаються. Рівень енергії Фермі  $E_F$  проходить через валентну зону ВЗ нижче точки дотикання зон. Валентна зона заповнюється не повністю, в каналі провідності зростає концентрація «дірок», і електричний струм крізь транзистор значно зростає. Коли напруга на затворі підвищується порівняно з  $U_{3\text{акр}}$  (енергетична діаграма праворуч), енергетичні зони у графені через зменшення електростатичної потенціальної енергії опускаються. Рівень енергії Фермі  $E_F$  проходить через зону провідності ЗП вище точки дотикання зон. Зона провідності частково заповнюється, в каналі транзистора зростає концентрація електронів провідності, і електричний струм крізь транзистор теж значно зростає.

Через відсутність у графені забороненої енергетичної щільності між валентною зоною та зоною провідності при кімнатних температурах описаний польовий транзистор не вдається повністю закрити. Це погано для побудови логічних схем на таких транзисторах. А от підсилювачі радіосигналів надвисоких частот на таких транзисторах успішно будують. Є повідомлення про реалізацію польових транзисторів на основі графену з граничною частотою 230 ГГц при довжині каналу порядку 200 нм і про створення на основі таких транзисторів ультра широкосмугових (порядку 100 ГГц) радіопідсилювачів з дуже низьким рівнем власного шуму і малим споживанням електроенергії [27, 28]. А це є основою для побудови високоефективних систем передавання/прийому інформації нового покоління.

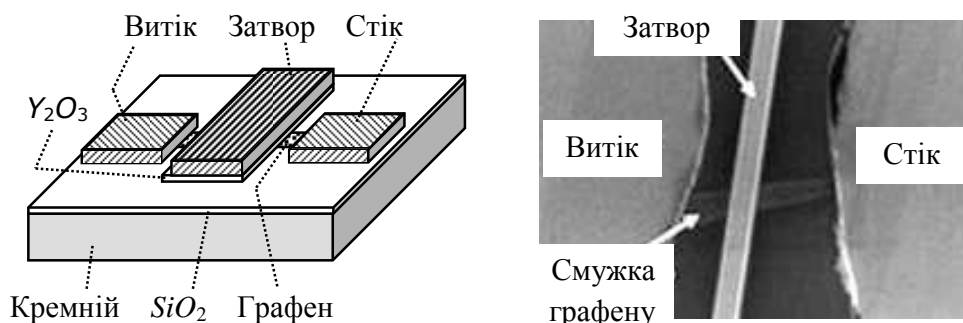


Рис. 11. Ліворуч – структура польового транзистора з каналом у вигляді смужки графену. Праворуч – РЕМ зображення поверхні нанотранзистора (ширина смужки графену близько 10 нм)

Для реалізації логічних схем почали будувати польові транзистори з використанням не суцільних плівок, а вузьких смужок графену (рис. 11). Справа у тому, що коли ширина смужки графену стає меншою за 10–30 нм (в залежності від кристалографічного напрямку, в якому «вирізана» смужка), вона перетворюється на «квантову лінію», і завдяки кванту-

ванню у графені з'являється заборонена зона енергій [29, 30]. Як і у випадку ВНТ, ця заборонена зона розширюється зі зменшенням ширини смужки графену. А з появою в енергетичному спектрі забороненої зони польовий транзистор можна значно краще «закривати». Співвідношення струму через транзистор у відкритому і в закритому стані зростає до  $10^4$  і навіть до  $10^7$  разів.

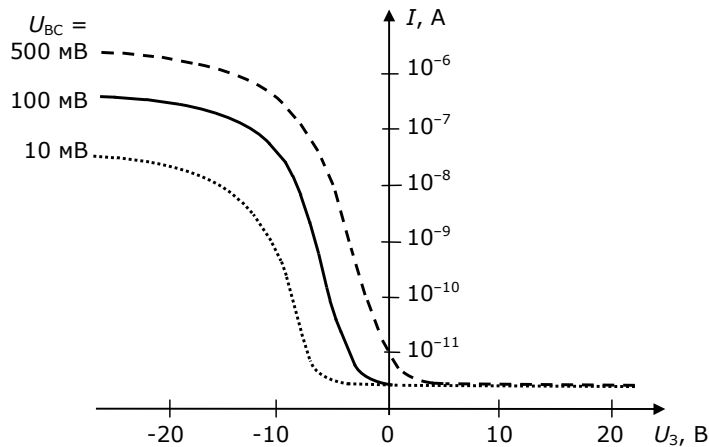


Рис. 12. Типові характеристики польового транзистора на основі смужки графену шириною 5 нм

Кілька типових залежностей струму крізь транзистор від напруги на затворі при різних значеннях напруги  $U_{BC}$  між витоком і стоком показані на рис. 12. Вертикальна шкала тут логарифмічна, проте значення електричного струму крізь транзистор вказані в долях ампера. На таких транзисторах можуть бути побудовані дуже швидкі логічні схеми з малим споживанням енергії [31]. Як і у випадку ВНТ, використовуючи для формування затворів метали з різною роботою виходу, можна побудувати комплементарні логі-

чні схеми – аналоги відомої КМДН логіки на кремнії.

На рис. 13, як приклад, показані принципові електричні схеми двох основних логічних елементів – «заперечення кон'юнкції» («2І-НІ», ліворуч) і «заперечення диз'юнкції» («2АБО-НІ», праворуч). У цих схемах затвори одних транзисторів виконані з паладію, інших – з алюмінію. Перші транзистори функціонують аналогічно  $p$ -канальним, а другі – аналогічно  $n$ -канальним у КМДН схемах.

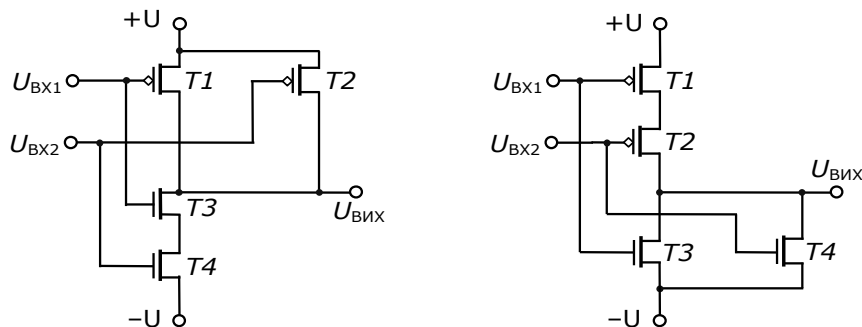


Рис. 13. Приклади комплементарних логічних схем на ВНТ транзисторах: ліворуч – схема «2І-НІ», праворуч – схема «2АБО-НІ». Значком «◇» помічені затвори, виконані з паладію

У схемі, показаній ліворуч, потенціал на виході  $U_{Вих}$  стає від'ємним, близьким до  $-U$  лише тоді, коли на обидва входи ( $U_{ВХ,1}$  і  $U_{ВХ,2}$ ) подається додатний потенціал, при якому обидва транзистори  $T1$  і  $T2$  закриті, а обидва транзистори  $T3$  і  $T4$  – відкриті. А у схемі, показаній праворуч,  $U_{Вих}$  стає

від'ємним, близьким до  $-U$ , завжди, коли хоча б на один із входів ( $U_{ВХ,1}$  чи  $U_{ВХ,2}$ ) подається додатний потенціал, при якому один чи обидва транзистори  $T1$  і  $T2$  закриті, а один чи обидва транзистори  $T3$  і  $T4$  – відкриті.

Робота нанорозмірних польових транзисторів на ВНТ та на графені описується вже повністю законами квантової механіки. Тому для їх розрахунку та оптимізації структури і розмірів доводиться застосовувати квантово-механічні моделі, розробка яких зараз інтенсивно проводиться [32, 33]. Немає сумніву, що вже найближчим часом будуть створені пакети комп'ютерних програм для розрахунку таких активних елементів та інтегральних схем на їх основі.



### 3. Пристрої пам'яті на основі ВНТ

З використанням ВНТ, як виявилось, можна побудувати багато різних варіантів пам'яті. Почнемо з наноелектромеханічних аналогів сучасної флеш-пам'яті. Будова типової комірки кремнієвої флеш-пам'яті показана на рис. 14 ліворуч.

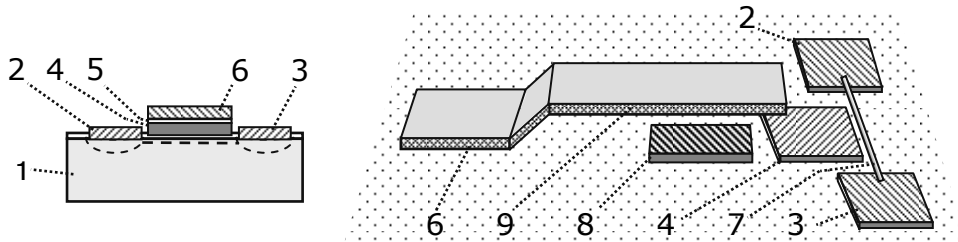


Рис. 14. Ліворуч – конструкція елементарної комірки кремнієвої флеш-пам'яті; праворуч – конструкція елементарної комірки флеш-пам'яті на ВНТ і кантілевері (пояснення в тексті)

Основою її є МДН транзистор (транзистор зі структурою метал – діелектрик – напівпровідник) з плаваючим затвором, сформований у пластині кремнію 1; 2 – його витік, 3 – стік, 4 – «плаваючий» затвор, 5 – ізолятор, 6 – керуючий затвор.

Праворуч на рис. 14 показана конструкція експериментально перевіреної комірки флеш-пам'яті на ВНТ і кантілевері [34]. Основою її теж є польовий транзистор з витокком 2, стоком 3, напівпровідною ВНТ 7 і «плаваючим» затвором 4. Електричний заряд на цей затвор подається через керуючий електрод 6 і металевий кантілевер 9 (сформований, наприклад, з  $Cr/Al/Cr$ ). У нормальному стані кантілевер 9 не має електричного контакту з затвором 4. Але протягом часу, коли на керуючий електрод 8 подається напруга, кантілевер 9 під дією електростатичних сил прогинається і контактує з «плаваючим» затвором 4. І на останній перетікає потрібний електричний заряд. Коли імпульс напруги на електроді 8 зникає, кантілевер 9 розмикається, і електричний заряд на ізолюваному затворі 4 може зберігатися дуже довго, у тому числі й при вимкненій напрузі живлення. Замість кантілевера для виконання тієї ж функції може бути використане наноелектромеханічне реле на ВНТ (рис. 7).

Можна вказати такі переваги описаної комірки пам'яті порівняно з кремнієвою флеш-пам'яттю. Для запису та стирання інформації не потрібно доводити ізолюючий шар до стану контрольованого електричного пробоя. Тому цей шар не пошкоджується, і число циклів перезапису інформації зростає на порядки величини. Занесення та стікання заряду з плаваючого затвора відбуваються через металевий кантілевер (або через ВНТ), і тому перезапис інформації значно прискорюється. Заряд, який перетікає на плаваючий затвор, можна значно точніше контролювати. А це дає змогу надійно запам'ятовувати в комірках пам'яті не лише логічні «0» та «1», а навіть аналоговий сигнал з усіма значеннями від 0 до 1. Струм зчитування з відповідної комірки буде майже пропорційним аналоговому сигналу. Це дозволяє значно економити обсяг пам'яті у відео- та аудіопристроях (відеокамерах, цифрових фотоапаратах, диктофонах тощо). Металевий кантілевер (або реле на ВНТ) перемикається електростатичними силами практично без розсіювання тепла. Тому енергоспоживання тут набагато менше, ніж у звичайній флеш-пам'яті.

При дослідженнях транзисторів з використанням тонких ВНТ (1,2 нм) і підзатворного діелектрика  $HfO_2$  з високою діелектричною сталістю, структура яких показана на рис. 15, несподівано було виявлено гістерезис на залежності струму через транзистор від напруги на затворі [35, 36]. Після відпалювання таких транзисторів на повітрі при температурі 335 К гістерезис ставав помітнішим, а через 9 годин відпалювання стабілізувався. Результат показаний на рис. 16. При напрузі на затворі  $U_3 = 0$  транзистор може перебувати в закритому

(точка А на характеристиці,  $I=0,08$  нА) або у відкритому стані (точка В на характеристиці,  $I=20$  нА), в залежності від передісторії.

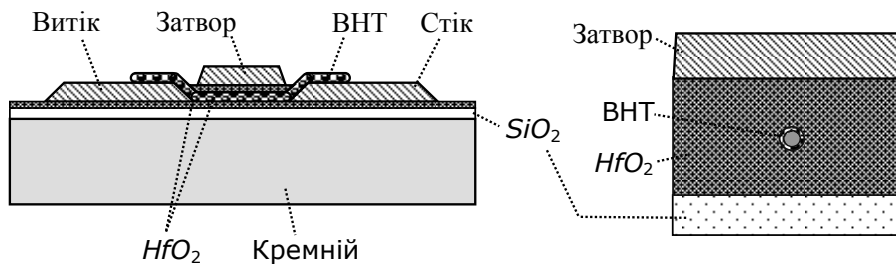


Рис. 15. Ліворуч – конструкція польового транзистора на ВНТ з використанням  $HfO_2$ . Праворуч – значно збільшений поперечний переріз шару  $HfO_2$  з ВНТ всередині

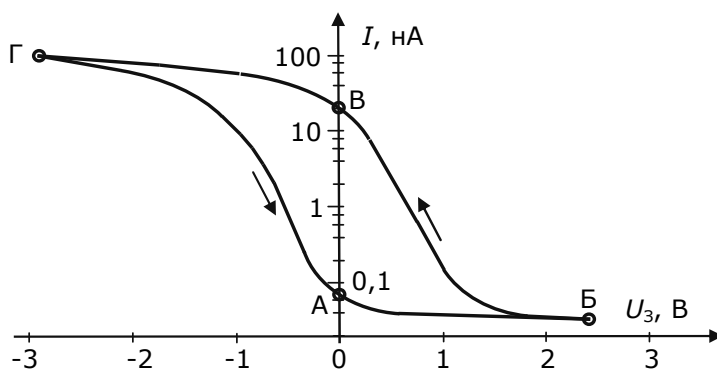


Рис. 16. Залежність струму  $I$  крізь ВНТ польового транзистора від напруги  $U_3$  між затвором і витоком

Якщо транзистор перебуває у стані А і напругу на його затворі збільшити вище порогового значення (в даному випадку приблизно 2 В), а потім почати знижувати, то струм буде зростати відповідно до гілки БВ на рис. 16. При напрузі

на затворі  $U_3=0$  транзистор тепер перебуватиме у відкритому стані (точка В). Якщо й далі знижувати напругу на затворі, то струм буде змінюватись відповідно до ділянки графіка між точками В і Г.

Якщо від'ємна напруга на затворі переходить за інше порогове значення (в даному випадку приблизно  $-3$  В), то при наступному збільшенні цієї напруги струм зменшуватиметься вже відповідно до ділянки між точками Г і А на графіку. І тепер при напрузі на

затворі  $U_3 = 0$  транзистор перебуватиме вже знову в закритому стані.

Можна прийняти, що у випадку А в транзистор записаний логічний «0», а у випадку В – логічна «1». Процес зчитування дуже простий: треба прикласти невелику ( $\approx 20$  мВ) напругу між витоком й стоком і виміряти струм. Для переведення транзистора у стан логічної «1» треба подати імпульс напруги амплітудою понад  $+2$  В, а для переведення у стан логічного «0» треба подати імпульс напруги амплітудою нижче  $-3$  В.

Ефект пам'яті ґрунтується на тому, що діаметр ВНТ дуже малий ( $\approx 1$  нм), і тому при напрузі на затворі вже в кілька вольт навколо нанотрубки виникає електричне поле напруженістю порядку  $1$  В/нм= $10^9$  В/м. При такій напруженості електрони відносно легко долають тонкий (порядку кількох нанометрів) потенціальний бар'єр і тунельним шляхом переходять з ВНТ у вказані глибокі пастки або в зворотному напрямку – з них на ВНТ. Коли ж таке сильне електричне поле відсутнє, то електрони можуть перебувати у пастках протягом тривалого часу, виконуючи у транзисторі роль зарядженого «плаваючого» затвору. Такий же ефект пам'яті був згодом виявлений і при використанні як діелектрика  $HfAlO_x$  та деяких інших окислів [37, 38].

Один описаний транзистор з трьома виводами (витік, стік і затвор) і є елементом нової флеш-пам'яті на ВНТ. Завдяки незначним нанометровим розмірам ВНТ, потенціальна густина інтеграції в такій пам'яті оцінюється в понад  $100$  Гбіт/см<sup>2</sup>. Можлива частота зчитування порядку  $100$  ГГц, приблизно такою ж є й частота перезапису. Споживана потужність при зчитуванні становить порядку  $20$  нА  $\times$   $0,5$  В= $10$  нВт, при записуванні – порядку  $1$  мкВт. Записана інформація зберігається при вимкненому живленні протягом багатьох десятків діб. Така пам'ять є дуже перспективною.

ВНТ дозволяють значно покращити характеристики ще одного виду енергонезалежної пам'яті, так званої «пам'яті на фазових переходах» (англ. Phase-change memory, PCM, PRAM, PCRAM, Chalcogenide RAM або C-RAM). Запис, перезапис і зберігання інформації в такій пам'яті ґрунтуються на здатності халькогенідного скла змінювати під дією імпульсів електричного струму свій фазовий стан з аморфного на кристалічний і навпаки скільки завгодно разів. При зміні фазового стану різко змінюється й електричний опір комірки пам'яті. Це дозволяє досить просто зчитувати поточний стан комірки. Витрати енергії на перезапис і його швидкість напряму залежать в такій пам'яті від об'єму скла, в якому відбувається фазовий перехід. І цей об'єм вдається значно зменшити, застосувавши для підведення електричного струму ВНТ малих діаметрів. На рис. 17 ліворуч показана кон-

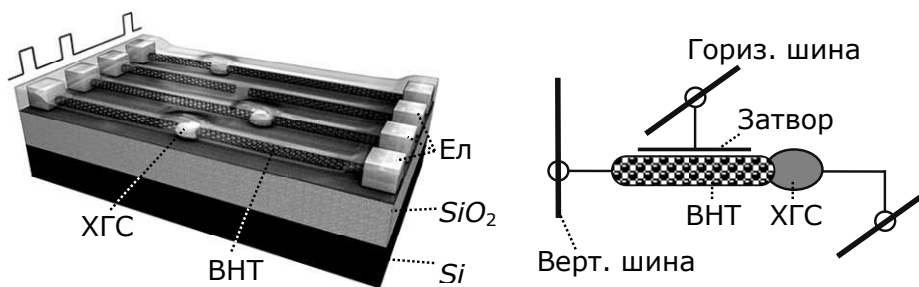


Рис. 17. Ліворуч – структура комірок (4 шт.) фазової пам'яті на ВНТ з металевою провідністю. Праворуч – схема комірки фазової пам'яті на транзисторі з напівпровідниковою ВНТ

струкція комірок такої пам'яті на ВНТ з металевою провідністю. Острівці халькогенідного скла, розміщені в розривах ВНТ, мають розмір менше 10 нм. Для їх перемикання з аморфного стану у кристалічний потрібен імпульс струму по-

рядку 0,5 мкА при напрузі менше 1 В. Енергія перемикання становить порядку 1 фДж ( $10^{-15}$  Дж).

В іншому варіанті використовуються польові транзистори з напівпровідними ВНТ. Схема відповідної комірки фазової пам'яті показана на рис. 17 праворуч. Такий варіант зручніший для організації матричної пам'яті великого об'єму з довільним доступом [39, 40].

За такими ж схемами може бути реалізована й так звана «мемристорна» пам'ять на ВНТ. Термін «мемристор» є похідним від англійського «memory resistor» (резистор з пам'яттю). В ньому використовується здатність діоксиду титану змінювати свій електричний опір на кілька порядків під дією електричної напруги вище деякого порогу. У випадку ВНТ, завдяки їх малому діаметру і відповідно малим об'ємам мемристорів, також досягається значне зростання густини пам'яті та швидкості зчитування, значне зменшення енергоспоживання.

Запропонована також пам'ять на ВНТ, в якій використовуються їх механічні властивості. На рис. 18 ліворуч показана ВНТ з металевою провідністю, натягнута між двома механічними опорами з діелектрика ( $SiO_2$ ).

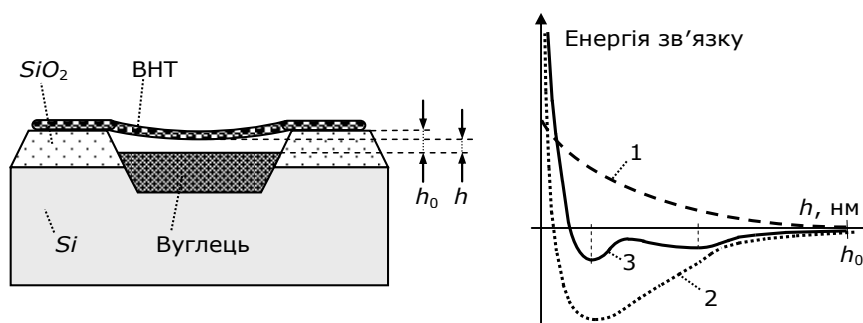


Рис. 18. Ліворуч – структура комірки пам'яті на ВНТ з металевою провідністю. Праворуч – залежність енергії зв'язку від відстані між ВНТ та нижнім електродом: 1 – енергія пружної деформації; 2 – енергія молекулярного притягання; 3 – сумарна енергія

Механічні опори ( $SiO_2$ ) сформовані на поверхні кремнію ( $Si$ ), а між ними в кремнії сформовані канали провідності з вуглецю (графіт, графен, ВНТ), перпендикулярні до площини рисунка. Початкова відстань між ВНТ та поверхнею провідника з вуглецю позначена через  $h_0$ . Коли ВНТ прогинається, то енергія її пружної деформації за законом Гука пропорційна квадратів величини прогину, тобто  $(h_0 - h)^2$ , де  $h$  – відстань між прогнутою ВНТ та поверхнею провідника з вуглецю. Графік залежності енергії деформації від  $h$  представлений на рис. 18 праворуч кривою 1.

Між ВНТ та провідником з вуглецю діють сили молекулярної взаємодії (сили Ван дер Ваальса). Графік залежності зумовленої цими силами енергії зв'язку від  $h$  представлений кривою 2. На дуже малих відстанях переважає відштовхування і енергія стає додатною, на більших відстанях переважає притягання і тому енергія зв'язку від'ємна.

Крива 3 – це результат додавання графіків 1 та 2. Вона відповідає фактичній енергії зв'язку з урахуванням як сил молекулярного притягання, так і сил пружної деформації. Видно, що крива 3 має 2 мінімуми. Це означає, що за відсутності зовнішніх сил ВНТ має 2 положення стійкої рівноваги, які відповідають цим мінімумам. Дослідження показали, що при кімнатній температурі обидва ці положення є досить стабільними. І тому на таких нанотрубках можна побудувати пам'ять. Структура одного з варіантів такої пам'яті, реалізована компанією Nantero [http://www.nantero.com/nram.htm], показана на рис. 19. На пластині кремнію з шаром оксиду сформована система вуглецевих провідних шин шириною 20 нм та механічних опор з діелектрика шириною 30 нм. Товщина їх на 2 нм більша за товщину вуглецевих шин. Перпендикулярно до опор на їх поверхні розміщені вуглецеві нанотрубки з металевою провідністю. Над ними сформовані золоті електроди. Наступні шари над ними на рисунку не показані, але вони є, і в них сформована система міжз'єднань, необхідна для організації блоку пам'яті. При періоді розміщення золотих електродів 40 нм площа комірки пам'яті становила  $50 \times 40 = 2000 \text{ нм}^2$ , що

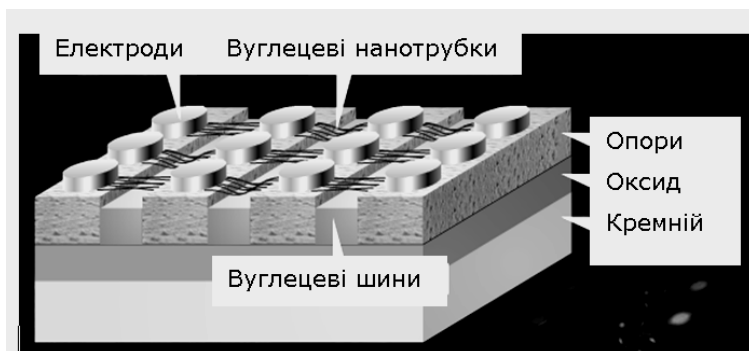


Рис. 19. Один із варіантів пам'яті на ВНТ з металевою провідністю

відповідає густині пам'яті 50 Гбіт/см<sup>2</sup>. Однієї ВНТ довжиною 20 мкм вистачало для перекривання 400 комірок пам'яті. В кожній комірці використовувалось одночасно 5–8 паралельно прокладених ВНТ.

Зчитування з такої пам'яті ґрунтується на тому, що перехідний електричний опір між ВНТ та вуглецевою шиною експоненціально залежить від відстані між ними і у двох вказаних вище стабільних положеннях відрізняється на кілька порядків величини. Для запису інформації на електроди комірки короткочасно подають різнойменні або однойменні електричні заряди, завдяки чому ВНТ притягується або відштовхується від вуглецевої шини. Час переходу з одного стабільного положення в інше не перевищував 10 пс, що потенційно дозволяє проводити запис інформації з частотою до 100 ГГц. Є резерв і для подальшого зростання параметрів. Якщо, наприклад, відстань між механічними опорами зменшити до 5 нм, то густина пам'яті може бути понад 1000 Гбіт/см<sup>2</sup>, а частота зчитування – понад 200 ГГц.

Структура іншого варіанта пам'яті на «провисаючих» ВНТ показана на рис. 20 [41].

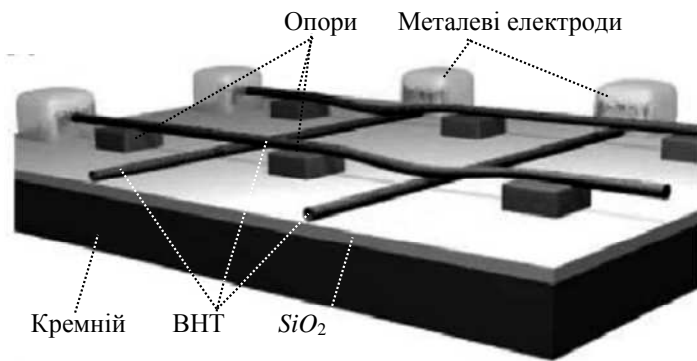


Рис. 20. Інший варіант пам'яті на ВНТ з металевою провідністю

якої розміщується металофулерен [44]. Схема розрахунку такої супрамолекулярної конструкції показана на рис. 21. Вісь OZ направлена вздовж осі ВНТ, відстань від центру ВНТ до центру її «шапки» позначена через L.

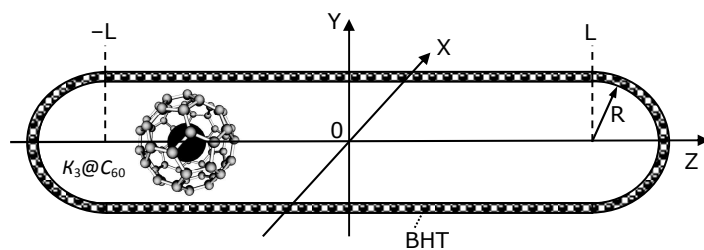


Рис. 21. Приклад комірки електромеханічної пам'яті, що складається з металофулерена  $K_3@C_{60}$ , капсулюваного в середині ВНТ. Схема розрахунку

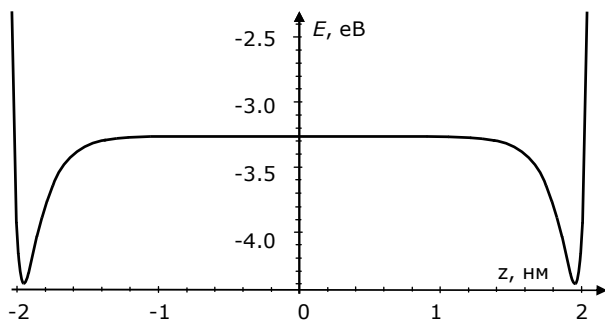


Рис. 22. Типовий вигляд залежності енергії супрамолекулярної структури від положення металофулерена  $K_3@C_{60}$  в середині ВНТ

вої залежності енергії від положення металофулерена виявляється таким самим.

Одне зі стійких крайніх положень металофулерена всередині ВНТ можна прийняти за логічний «0», а протилежне – за логічну «1». Для зчитування інформації з такої комірки можна скористатись тим, що ВАХ нанотрубки за наявності металофулерена біля одного з її кінців стає асиметричною. Тому при фіксованій прикладеній напрузі електричний струм через комірку буде різним у станах «0» та «1», відрізняючись при малій напрузі на порядок величини. Можна скористатись також тим, що електричний потенціал поблизу шапки ВНТ для станів «0» та «1» різний. Різницю в десятки мілівольт теж неважко зчитувати.

Нижні електроди матриці пам'яті тут теж виконані у вигляді ВНТ з металевою провідністю. В такій конструкції потенційно можна досягнути ще вищого рівня густини пам'яті. Але для цього потрібен і ще вищий рівень технології виготовлення.

Зовсім інші варіанти електромеханічної пам'яті ґрунтуються на використанні «контейнерних» ВНТ [42, 43]. Одним із таких варіантів є замкнена ВНТ, в середині

На рис. 22 показаний результат квантово-механічного розрахунку енергії зв'язку в такій структурі в залежності від положення металофулерена всередині ВНТ. Видно, що при перебуванні металофулерена біля однієї з «шапок» ВНТ енергія системи має досить глибокі мінімуми. Це зумовлюється тим, що металофулерен тут взаємодіє не лише з атомами бічних стінок ВНТ, але й з атомами відповідної її «шапки», і тому утримується тут значно більшими силами. Глибина мінімуму порівняно з енергією в центрі ВНТ становить приблизно 2,1 еВ.

Якщо використати дещо довшу ВНТ, ВНТ з іншою «хіральністю», а замість металофулерена  $K_3@C_{60}$  взяти один з металофулеренів  $Me@C_{60}$ ,  $Me@C_{80}$  або  $Me@C_{100}$  (Me – атом металу), то кількісно результати будуть відрізнятися. Але якісно характер кривої

Для запису нової інформації в комірку на шапки ВНТ подають імпульс електричної напруги того чи іншого знаку величиною порядку 2–3 В. Вона має бути достатня для подолання «потенціального бар'єру» всередині нанотрубки.

Динаміка переміщення металофулерена з одного стійкого стану в інший під дією такого імпульсу напруги показана на рис. 23. Вздовж горизонталі тут відкладено час в пікосекундах, уздовж вертикалі – положення металофулерена на осі OZ.

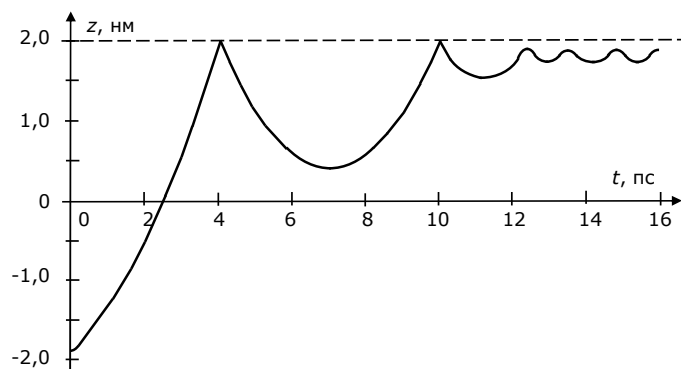


Рис. 23. Динаміка переходу металофулерена з одного стійкого положення в інше під дією імпульсу напруги

Видно, що перехід в інше положення відбувається приблизно за 4 пс, але для заспокоєння коливального руху імпульс напруги має тривати приблизно 10 пс. Наступне перемикавання варто проводити лише через 16–20 пс. Тобто частота перезапису інформації може бути порядку 50 ГГц. Затрати енергії на перемикавання становлять 5–10 еВ, тобто дуже малі.

Було показано, що подібно до металофулерена поводити себе всередині ВНТ також і наночастинки металів, розміри яких дозволяють знаходитись всередині нанотрубки. При цьому висота потенціального бар'єра, який треба здолати для переходу в інше стійке положення, значно зростає і становить багато електрон-вольт. Тому пам'ять на таких комітках надзвичайно довговічна і за теоретичними оцінками становить мільярди років [45]. Такої довговічності не досягає жоден з інших мікроелектронних видів пам'яті.

#### 4. Висновки

1. На основі нових форм існування вуглецю – фулеренів, вуглецевих нанотрубок (ВНТ) та плівок графену – вже практично реалізовані зразки швидкодіючих елементів і пристроїв інформатики нанометрових розмірів з рекордно малою споживаною потужністю та високою надійністю.
2. Зокрема, реалізовано та вивчено багато різних варіантів польових транзисторів з рекордно коротким часом перемикавання, швидкодіючих логічних схем на таких транзисторах, у тому числі аналогів відомої КМДН логіки з малим енергоспоживанням, та дуже широкополосних радіопідсилювачів сигналів. Як регульований канал провідності напівпровідникові ВНТ чи смужки графену мають ту перевагу перед каналами провідності в напівпровідниках, що рухливість носіїв електричного заряду в нанотрубках значно вища, ніж у кремнії, і навіть в арсеніді галію, а довжину каналу можна зменшувати аж до молекулярних масштабів.
3. На ВНТ з металевою провідністю побудовані нанорозмірні аналоги електромеханічних реле. А з них можна будувати логічні схеми за правилами вже призабутої «релейної» логіки, проте тепер вже з затримками порядку кількох пікосекунд на перемикання і з нанорозмірами.
4. З використанням ВНТ можна побудувати багато різних варіантів енергонезалежної пам'яті, зокрема, аналоги флеш-пам'яті на польових транзисторах з плаваючим затвором, на польових транзисторах з зарядовими пастками, на елементах зі зміною фазового стану та з мемристорами. Такі варіанти забезпечують на порядки більше число перемикань, ніж у схемах пам'яті, що нині випускаються, меншу споживану потужність, вищу швидкодію, а, головне, припускають масштабування аж до молекулярних розмірів. Реалізовані й дослі-

джені також інші варіанти пам'яті на ВНТ і показано, що на них потенційно можна досягнути густини понад 1000 Гбіт/см<sup>2</sup> і частоти зчитування – понад 200 ГГц.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tans S.J. Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube / S.J. Tans, A.R.M. Verschueren, C. Dekker // *Nature*. – 1998. – Vol. 393. – P. 49 – 52.
2. Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors / R. Martel, T. Schmidt, H.R. Shea [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 1998. – Vol. 73. – P. 2447 – 2449.
3. Svensson J. A carbon nanotube transistor with 5 ps gate delay / J. Svensson // *Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 19. – P. 325201.
4. Avouris P. Carbon nanotube electronics and photonics / P. Avouris // *Physics Today*. – 2009. – Vol. 62. – P. 34 – 40.
5. Sub-10 nm Carbon Nanotube Transistor / A.D. Franklin, M. Luisier, S.-J. Han [et al.] // *Nano Lett.* – 2012. – Vol. 12 (2). – P. 758 – 762.
6. Logic Circuits with Carbon Nanotube Transistors / A. Bachtold, P. Hadley, T. Nakanishi [et al.] // *Science*. – 2001. – Vol. 294. – P. 1317 – 1320.
7. Carbon Nanotube Electronics / P. Avouris, J. Appenzeller, R. Martel [et al.] // *Proc. of the IEEE*. – 2003. – Vol. 91, N. 11. – P. 5532 – 5538.
8. Zukoski A. Universal logic modules based on double-gate carbon nanotube transistors / A. Zukoski, X. Yang, K. Mohanram // *DAC '11 Proc. of the 48th Design Automation Conference*. – ACM New-York, NY, USA, 2011. – P. 884 – 889.
9. Novel electrical switching behaviour and logic in carbon nanotube Y-junctions / P.R. Bandaru, C. Daraio, S. Jin [et al.] // *Nature Materials*. – 2005. – Vol. 4 (9). – P. 663 – 666.
10. Robust Digital VLSI using Carbon Nanotubes / J. Zhang, L. Wei, N. Patil [et al.] // *EEE Trans. – CAD*, 2012.
11. Carbon-Carbon Contacts for Robust Nanoelectromechanical Switches / O. Loh, X. Wei, J. Sullivan [et al.] // *Adv. Mater.* – 2012. – Vol. 24. – P. 2463 – 2468.
12. ACCNT – A Metallic-CNT-Tolerant Design Methodology for Carbon Nanotube VLSI: Analyses and Design Guidelines / A. Lin, N. Patil, J. Zhang [et al.] // *IEEE Trans. Electron Devices*. – 2010. – Vol. 31 (4). – P. 453 – 471.
13. A new paradigm in the design of energy-efficient digital circuits using laterally actuated double-gate NEMS / H.F. Dadgour, M.M. Hussain, K. Banerjee // *Proc. of Intern. Symp. On Low Power Electronics and Design*. – Austin, TX, USA, 2010. – P. 7 – 12.
14. Scaling and variability analysis of CNT-based NEMS devices and circuits with implications for process design / H.F. Dadgour, A.M. Cassell, K. Banerjee // *Pros. of Intern. Electron Devices Meeting*. – San Francisco, 2008. – P. 529 – 532.
15. Design considerations for complementary nanoelectromechanical logic gates / K. Akarvardar, D. Elata, R. Parsa [et al.] // *IEEE Int. Electron Devices Meeting*. – Washington, 2007. – P. 299 – 302.
16. A Graphene Field Effect Device / M.C. Lemme, T.J. Echtermeyer, M. Baus [et al.] // *IEEE Electron Device Letters*. – 2007. – Vol. 28, N 4. – P. 282 – 284.
17. Lemme M.C. Current status of graphene transistors / M.C. Lemme // *Solid State Phenomena*. – 2010. – Vol. 156. – P. 499 – 509.
18. Operation of graphene transistors at gigahertz frequencies / Y.-M. Lin, K. Jenkins, A. Valdes-Garcia [et al.] // *Nano Letters*. – 2009. – Vol. 9, N 1. – P. 422 – 426.
19. 100-GHz Transistors from Wafer-Scale Epitaxial Graphene / Y.-M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K.A. Jenkins [et al.] // *Science*. – 2010. – Vol. 327, N 5966. – P. 662.
20. Schwirz F. Graphene Transistors / F. Schwirz // *Nature Nanotechnology*. – 2010. – Vol. 5. – P. 487 – 496.
21. Rf performance of short channel graphene field-effect transistor / Y. Wu, Y.-M. Lin, K. Jenkins [et al.] // *Electron Devices Meeting (IEDM). IEEE International*. – Anaheim, CA, USA, 2010. – Dec. – P. 9.6.1 – 9.6.3.
22. High-frequency performance of graphene field effect transistors with saturating I-V characteristics / I. Meric, R.D. Cory, S.-Y. Han [et al.] // *IEDM (Electron Devices Meeting)*. – 2011. – Vol. 18. – P. 2.1.1–2.1.4.

23. High Mobility Flexible Graphene Field-Effect Transistors with Self-Healing Gate Dielectrics / C.-C. Lu, Y.-C. Lin, C.-H. Yeh [et al.] // ACS Nano. – 2012. – Vol. 6 (5). – P. 4469 – 4474.
24. Self-Aligned Fabrication of Graphene RF Transistors with T-Shaped Gate / A. Badmaev, Y. Che, Z. Li [et al.] // ACS Nano. – 2012. – Vol. 6 (4). – P. 3371 – 3376.
25. 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 – 669.
26. Electronic properties of a biased graphene bilayer / E.V. Castro, K.S. Novoselov, S.V. Morozov [et al.] // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2010. – Vol. 22. – P. 175503.
27. Triple-mode single-transistor graphene amplifier and its applications / X. Yang, G. Liu, A.A. Balandin [et al.] // ACS Nano. – 2010. – Vol. 4, N 10. – P. 5532 – 5538.
28. Lemme M.C. Current Status of Graphene Transistors / M.C. Lemme // Solid State Phenomena. – 2009. – Vol. 156-158. – P. 499 – 509.
29. Brey L. Electronic States of Graphene Nanoribbons / L. Brey, H.A. Fertig // Phys. Rev. – 2006. – Vol. B73. – P. 235411.
30. Room-Temperature All-Semiconducting Sub-10-nm Graphene Nanoribbon Field-Effect Transistors / X. Wang, Y. Ouyang, X. Li [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 100. – P. 206803.
31. Sordan R. Logic gates with a single graphene transistor / R. Sordan, F. Traversi, V. Russo // Applied Physics Letters. – 2009. – Vol. 94, N 7. – P. 073305.
32. Зебрев Г.И. Графеновая наноэлектроника: электростатика и кинетика / Зебрев Г.И. // Графен: теория и приложения. – Москва: ИНТЕХ, 2011. – С. 218 – 225.
33. Zebrev G. I. Graphene nanoelectronics: electrostatics and kinetics / Zebrev G. I. // Proc. SPIE 7025, Micro- and Nanoelectronics. – 2008. – M. 70250.
34. A fast and low-power microelectromechanical system-based non-volatile memory device / S.W. Lee, S.J. Park, E.E.B. Campbell [et al.] // Nature Communications. – 2011. – Vol. 2. – P. 1 – 6.
35. Carbon nanotube memory devices of high charge storage stability / J. B. Cui, R. Sordan, M. Burghard [et al.] // Appl. Phys. Letters. – 2002. – Vol. 81, N 17. – P. 3260 – 3262.
36. High-speed memory from carbon nanotube field-effect transistors with high-K gate dielectric / M. Rinkio, A. Johansson, G.S. Paraoanu [et al.] // Nano. Lett. – 2009. – Vol. 9. – P. 643 – 647.
37. Lu X.B. Memory effects of carbon nanotubes as charge storage nodes for floating gate memory applications / X.B. Lu, J.Y. Dai // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 88. – P. 113104.
38. High-Mobility Nanotube Transistor Memory / M.S. Fuhrer, B.M. Kim, T. Durkop [et al.] // Nano Lett. – 2002. – Vol. 2, N 7. – P. 755 – 759.
39. Low-Power Switching of Phase-Change Materials with Carbon Nanotube Electrodes / F. Xiong, A.D. Liao, D. Estrada [et al.] // Science. – 2011. – Vol. 332, N 6029. – P. 568 – 570.
40. Breaking the Speed Limits of Phase-Change Memory / D. Loke, T.H. Lee, W.J. Wang [et al.] // Science. – 2012. – Vol. 333. – P. 1566 – 1569.
41. Carbon Nanotube-Based Nonvolatile Random Access Memory for Molecular Computing / T. Rueckes, K. Kim, E. Joselevich [et al.] // Science. – 2000. – Vol. 289, N 5476. – P. 94 – 97.
42. Xiao S. Design and analysis of nanotube-based memory cells / S. Xiao, D. R. Andersen, W. Yang // Nanoscale Res. Lett. – 2008. – Vol. 3. – P. 416 – 420.
43. Chan Y. Metallofullerenes in composite carbon nanotubes as a nanocomputing memory device / Y. Chan, R. K. F. Lee, J. M. Hill // IEEE Trans.Nanotechnol. – 2011. – Vol. 10. – P. 947 – 952.
44. Lee R.K.F. Nanocomputing Memory Devices Formed from Carbon nanotubes and Metallofullerenes / R.K.F. Lee, J.M. Hill // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2011. – Vol. 60. – P. 1413 – 1416.
45. Nanoscale Reversible Mass Transport for Archival Memory / G.E. Begtrup, W. Gannett, T.D. Yuzvinsky [et al.] // Nano Lett. – 2009. – Vol. 9 (5). – P. 1835 – 1838.

*Стаття надійшла до редакції 29.10.2012*