

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**ГРАФЕНОВІ ТРАНЗИСТОРИ В ЯКОСТІ
ПІДСИЛЮВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТУ**

Студент групи ЕІ-71к

Є.О. Внучков

Науковий керівник,
викладач,

О.І. Федчун

Конотоп 2021

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження даної кваліфікаційної роботи є графенові транзистори в якості підсилювального елемента.

Мета роботи полягає у вивченні принципів дії, конструкції, технологічних параметрів графенових транзисторів в якості підсилювального елемента аналізу областей і специфіка використання.

У цій роботі розглядається поточний стан графенових транзисторів як потенційного доповнення до кремнієвої технології CMOS. Короткий огляд методів виробництва графену та метрології супроводжується введенням макроскопічних графенових польових транзисторів (FET). Показано, що відсутність зазору енергетичної зони призводить до серйозних недоліків логічних застосувань. Обговорюються можливості побудови ширини зазору в графенових транзисторах, включаючи квантове обмеження в графенових нанолентах (ГНР) та індуковану електрично або субстратом асиметрію у дво- та багатошаровому графені. Показано, що польові транзистори графена представляють інтерес для аналогових радіочастотних програм. Нарешті, коротко представлені нові механізми перемикання в графенових транзисторах, які можуть призвести до майбутніх пристроїв пам'яті.

Робота викладена на 31 сторінках, у тому числі включає 7 рисунків, список цитованої літератури із 25 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГРАФЕНОВИЙ ТРАНЗИСТОР, ЗАБОРОНЕНА ЗОНА, ДВОШАРОВИЙ ГРАФЕН.

ЗМІСТ

| | стор. |
|---|-------|
| ВСТУП | 4 |
| РОЗДІЛ 1 ВИРОБНИЦТВО ГРАФЕНУ | 5 |
| 1.1 Механічне відшарування | 5 |
| 1.2 Двошаровий графен та субстратні ефекти..... | 8 |
| РОЗДІЛ 2. ВИДИ ГРАФЕНОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ | 10 |
| 2.1 Класифікація та основні транзисторні структури..... | 10 |
| 2.2 Макроскопічні графенові польові транзистори..... | 13 |
| 2.3 Графенові нанолентові транзистори..... | 15 |
| 2.4 ВЧ транзистори..... | 18 |
| 2.5 Двошарові графенові транзистори..... | 19 |
| РОЗДІЛ 3. ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ ГРАФЕНОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ | 22 |
| 3.1 Електрооптичні прилади..... | 22 |
| 3.2 Радіочастотні графенові транзистори..... | 25 |
| 3.3 Теплові пристрої на основі графенових транзисторів..... | 27 |
| ВИСНОВКИ | 29 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 30 |

ВСТУП

Графен привернув величезний дослідницький інтерес з часу його експериментального відкриття в 2004 р.. Він складається з атомів вуглецю, розміщених у двовимірній сотовій кристалічній решітці з довжиною зв'язку $1,42 \text{ \AA}$ [1]. Атоми вуглецю в графеновій решітці sp^2 гібридизовані, і три з чотирьох валентних електронів беруть участь у зв'язках із наступними сусідами (σ – зв'язки).

Графенова решітка складається з двох еквівалентних вуглецевих підрешіток А і В, що призводить до кристалічної симетрії. Як наслідок, носії заряду можна описати рівнянням Дірака, тобто зонна структура графена демонструє лінійну дисперсійну залежність для носіїв заряду з імпульсом k , пропорційним енергії E . Нарешті, енергетичні смуги, пов'язані з підрешітками перетинаються при нульовій енергії E , утворюючи напівметал без зазору ($E_g = 0 \text{ eV}$).

Носії заряду в графені мають дуже малу ефективну масу, отже, графен демонструє надзвичайно привабливі властивості матеріалу, що стосуються електронних пристроїв. Сюди входять рухливість носіїв до $15000 \text{ cm}^2 / \text{V}$ для графену на SiO_2 , $27000 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ для епітаксійного графена та $200000 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ для суспендованого графену. Крім того, повідомляється про високу силу струму, що перевищує $1 \times 10^8 \text{ A} / \text{cm}^2$, високу теплопровідність, високу прозорість та механічну стійкість. Хоча про подібні перспективні властивості повідомляється і про вуглецеві нанотрубки (УНТ), той факт, що листи графена можна обробляти за допомогою звичайної CMOS-технології, потенційно є величезною перевагою перед УНТ. Однак, незважаючи на ентузіазм над відкриттям графена, дослідження все ще на початковому етапі. Тому в цьому огляді ми обговорюємо потенціал графену для електронних застосувань на основі наявних на сьогодні експериментальних даних.

РОЗДІЛ 1

ВИРОБНИЦТВО ГРАФЕНУ

1.1 Механічне відшарування

В даний час існує три встановлені методи виготовлення графена: механічне відшарування, епітаксійне зростання з підкладки карбїду кремнію (SiC) та хімічне осадження парів вуглеводнів на реакційноздатних поверхнях нікелю або карбїду перехідних металів.

Схема окремого шару графена наведена на рис. 1.1а, включаючи "крісло" та "зигзагоподібні" краї, названі за їх характерним виглядом в атомному масштабі, та схема зонної структури в районі $k = 0$, включаючи рівень Фермі E_F , показана на рис. 1.1б.

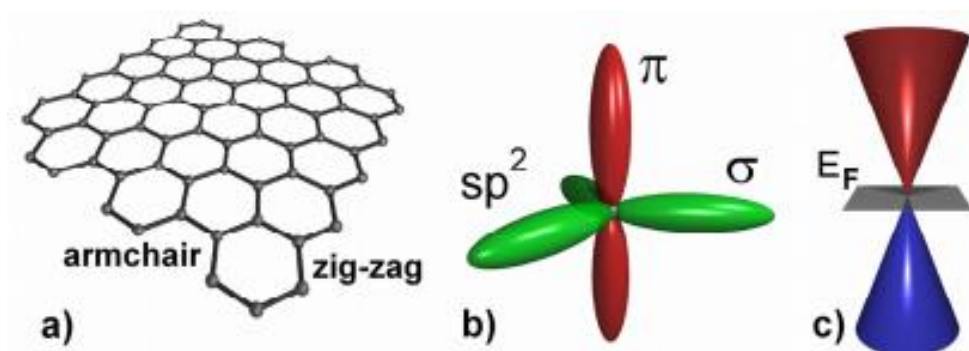


Рис. 1.1. а) Схема кристалїту графена з характерним кріслом та зигзагоподібними краями. б) Схема електронних σ - та π - орбіталей одного атома вуглецю в графені. в) Діапазонна діаграма графен при $k = 0$ [1]

Новоселов та ін. запровадили процес ручного розщеплення графіту, який часто називають «механічним відшаруванням», для отримання одно- та багат шарового графену.

Цей процес використовує клейку стрічку для витягання графенових плівок із кристала графіту. Потім вони розріджуються за допомогою подальших

стрічок стрічки і, нарешті, натираються на відповідні поверхні, такі як діоксид кремнію на кремнії, що залишає на поверхні випадкові розміри та розподілені пластівці.

При спостереженні через оптичний мікроскоп одно- і багатошарові графенові пластівці додають оптичний шлях порівняно з голою пластиною. Якщо обрано належну товщину діоксиду кремнію, отриманий видимий контраст достатній для ідентифікації навіть окремих шарів графена.

На рис. 1.2 а показаний результат моделювання контрасту одного шару графена на SiO_2 . У цьому моделюванні контраст будується для діапазону довжин хвиль та товщини SiO_2 . У видимому діапазоні плівки $\text{SiO}_2 \sim 90$ нм та ~ 300 нм призводять до високої контрастності і, отже, широко використовуються як підкладки.

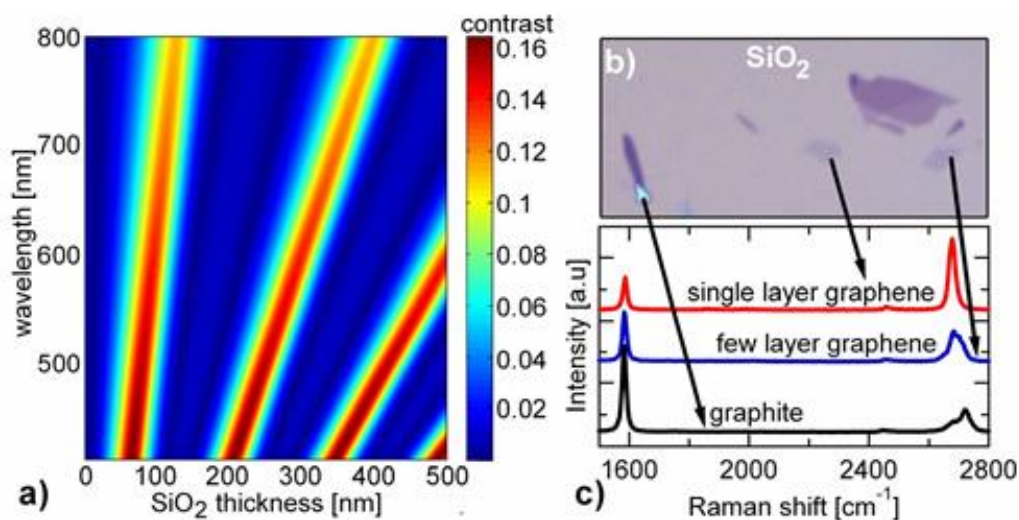


Рис. 1.2 а) Моделювання контрасту одношарового графена на плівці діоксиду кремнію на кремнії. Синій являє собою області без контрасту, тоді як червоний - максимальний контраст. б) Оптична мікрофотографія макроскопічних кристалітів графена різної товщини на підкладці SiO_2 / Si . в) Раманівські спектри трьох репрезентативних пластівців одно- і малошарового графену та графіту [3]

Цей прагматичний недорогий метод дозволив дослідникам проводити широкий спектр фундаментальних фізичних та інженерних експериментів, хоча його не можна вважати контрольованим процесом з точки зору промислової експлуатації.

У той час як навчена людина може “неозброєним оком” з високою точністю відрізнити одношаровий графен від кількох шарів, спектроскопія КРС стала методом вибору, коли мова йде про наукове підтвердження одношарових шарів.

Як G, так і 2D-піки Рамана на рівні приблизно 1580 см^{-1} і 2700 см^{-1} змінюються у формі, положенні та інтенсивності з числом шарів графена.

Це продемонстровано на рис. 1.1 в, де побудовано спектри КРС для одного та кількшарового графену, а також графіту. Зверніть увагу, що спектри були розділені для зручності перегляду, переміщаючи їх вздовж осей осей. Базова інтенсивність ідентична для кожного вимірювання.

Епітаксійний графен утворює карбід кремнію. Бергер та де Хеер започаткували епітаксiальний підхід до виготовлення графену з карбідних підкладок кремнію. Під час процесу кремній термічно десорбується при температурах від $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цей процес, безсумнівно, може бути класифікований як більш керований та промислово релевантний у порівнянні з механічним сколюванням. Насправді було показано, що графенові транзистори можуть бути виготовлені з епітаксiйного графена на пластинах.

Як і відшарований графен, було продемонстровано, що поодинокі епітаксiйні шари графена можна ідентифікувати за допомогою спектроскопії КРС. Крім того, спектроскопія КРС виявила, що ці шари стискаються під тиском.

Основним недоліком епітаксiйного графену є надзвичайно висока вартість виготовлених пластин SiC, їх обмежений розмір у порівнянні з кремній-вафельними пластинами та високі температури обробки, що значно перевищують нинішні межі КМОП. З урахуванням цих плюсів і мінусів,

залишається з'ясувати, чи потрапить епітаксійний графен до майбутніх застосувань наноелектроніки.

Хімічне випаровування парів. В даний час досліджується перспективний метод осадження великої площі у вигляді хімічного осадження парами на металевих поверхнях, таких як нікель, рутеній. Ці підходи CVD покладаються на розчинення вуглецю в металевих підкладках, а потім змушують його випадати в осад при охолодженні.

Інший підхід полягає у вирощуванні графенових плівок безпосередньо на іридії або міді. Запропоновано кілька методів перенесення плівки CVD графена на відповідні основи, включаючи використання одноразових плівок PMMA або PDMS. Після перенесення для перевірки поодиноких шарів використовували спектроскопію КРС, виготовляли навіть прилади із типовими властивостями графена.

1.2 Двошаровий графен та субстратні ефекти

Життєздатним підходом для отримання ширини зазору в графені є порушення його симетрії. Було припущено, що макроскопічні подвійні або двошарові графенові плівки відображатимуть ширину забороненої зони, якщо до них застосовуватиметься поперечне електричне поле, щоб викликати асиметрію шару. Його розрахунки передбачають приблизно лінійну залежність ширини зазору від щільності носія n , при цьому кожні 10^{12} cm^{-2} додають до зазору близько 10 меВ.

Цей прогноз був експериментально підтверджений Ohta та співавт. на двошарових графенових плівках на карбіді кремнію (SiC) за допомогою фотоемісійної спектроскопії з роздільною здатністю (ARPES). У своїй роботі вони використовували допінг калію для модифікації щільності носія в графені, що призводить до змін електронного зазору. Застосував цей підхід на крок далі, застосувавши електростатичне поле через верхній електрод затвора. Їх

двошаровий графеновий пристрій показав ширину зазору в діапазоні декількох меВ, продемонстрований при вимірах низьких температур при 4К.

Відповідна концепція була продемонстрована Zhou та співавт., які повідомляють про значно більш значну ширину смуги в одношаровому графені на SiC у 260 меВ, знову отриману за допомогою вимірювань ARPES [4]. Зі збільшенням кількості шарів графена було виявлено, що ширина зазору зменшується.

Тут розрив пояснюється порушеною симетрією підрешітки A, B у графені, спричиненою буферним шаром між кристалом SiC та графеном. Хоча, схоже, такий підхід вказує на доцільність макроскопічних графенових транзисторів з високим співвідношенням іон /іоф при кімнатній температурі, на сьогодні немає експериментальних повідомлень про такі пристрої на одношаровому графені на SiC. Навіть велике дослідження авторів [5], який досліджував статистично значущу кількість декількох сотень графенових транзисторів на SiC, не виявив значного зазору в жодному з пристроїв.

Поки були досягнуті значення мобільності, що перевищують значення кремнієвих транзисторів, усі пристрої демонстрували типові характеристики «нульового зазору» графена. Підводячи підсумок, спостерігались електрично індуковані зазори в двошаровому графені, але їх невелике абсолютне значення перешкоджає застосуванню в транзисторах з ефектом поля кімнатної температури. Незважаючи на те, що ARPES спостерігав більший простір, спричинений субстратом, для одношарового графену на SiC, цей результат залишається підтвердженням у фактичному електронному пристрої.

РОЗДІЛ 2

ВИДИ ГРАФЕНОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

2.1 Класифікація та основні транзисторні структури

Протягом останніх п'яти років було представлено безліч різних конфігурацій графенових транзисторів, які можна класифікувати по-різному, як показано на рис. 2.1. Далі буде розглянуто поточний стан графенових транзисторів та точніть з MOSFET-каналів, що мають безпроменеві канали великої площі, вивчення їхнього потенціалу для аналогових та радіочастотних програм, а також для гнучкої та друкованої електроніки, і представити архітектуру бічних клапанів.

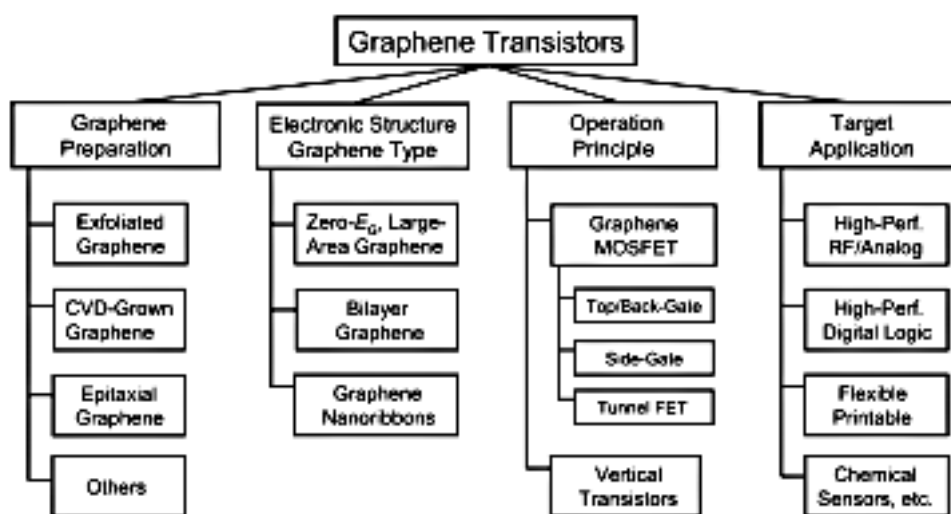


Рис. 2.1. Схеми класифікації графенових транзисторів [5]

Вертикальні графенові транзистори

Обговорені до цього часу графенові транзистори є, по суті, площинними пристроями, де струм протікає вздовж листа графена паралельно поверхні підкладки. Нещодавно були запропоновані альтернативні концепції графенових транзисторів з вертикальною структурою, де струм, строго кажучи тунельний струм, протікає нормально до поверхні підкладки.

Двошаровий псевдоспіновий польовий транзистор (BiSFET) який показано на рис. 2.2 він складається з двох моношарів графена, одного р-типу, а іншого провідного типу n, відокремлених один від одного тонким тунельним діелектриком. В активній області пристрою обидва шари графена електростатично з'єднані із затвором (наприклад, графен р-типу з верхнім затвором, а графен n-типу з нижнім затвор) через більш товстий діелектрик затвора, а за межами активної області обидва шари графена мають металевий контакт.

За певних умов (відхилення затвора V_{Gr} та V_{Gn} , конструкція тунельного діелектрика, прикладена напруга V_{pn}) отвори верхнього шару графена з'єднуються з електронами нижнього графена і утворюють конденсат. Якщо це трапляється, спочатку великий тунельний опір між шарами графена різко зменшується до такої міри, що шари ефективно вкорочуються і може протікати виражений тунельний струм. Зі збільшенням V_{pn} тунель спочатку струму збільшується і досягає максимуму, тоді як при вищих V_{pn} , конденсат руйнується, а струм зменшується. Слід зазначити, що цей тунельний механізм відрізняється від звичайного тунелювання через бар'єр, де тунельний струм постійно збільшується для збільшення напруги. Очікується, що споживання електроенергії логічними шлюзами BiSFET буде набагато нижчим у порівнянні з логікою Si CMOS. Поки що, незважаючи на численні спроби, експериментальний прояв BiSFET все ще відсутній.

Інший вертикальний тунельний транзистор на основі графена який складається з двох шарів графену (джерела та стоку), розділених тонким (товщиною лише кілька атомних шарів) нітридом бору (BN) тунельним бар'єром. Цей шар графен – BN – графен послідовність затиснута між двома подальшими шарами BN, і вся конструкція розташована на окисненій легованій пластині Si, яка виконує роль затвора. Застосування напруги між двома шарами графена спричинює тунельний струм через тунельний бар'єр BN, і за допомогою напруги на затворі, що подається на пластину Si, можна регулювати величину струму тунелю. Експериментальні пристрої цього типу із

коефіцієнтом включення-вимкнення близько 50 були реалізовані, і, оптимізуючи структуру пристрою, коефіцієнт включення-виключення, що перевищує 104, повинен бути можливим.

Нарешті, запропоновано графеновий транзистор, який показує паралелі транзисторам з гарячими електронами на основі металу. Серцем цього пристрою є шар графена, що служить базою транзистора і укладений між базою випромінювача та ізолятором основи-колектора. В залежності від напруги базового випромінювача, транзистор або вимкнений (струм емітер-колектор не протікає), або тунельний струм Фаулера – Нордгейма протікає через ізолятор основи випромінювача і через атомально тонку основу графена до колектора. Хоча експериментальних пристроїв цього типу ще не повідомлялося, моделювання передбачає насичені вихідні характеристики та дуже високі частоти відсічення.

Таким чином, цей тип пристроїв є перспективним для аналогових та радіочастотних програм.

В даний час потенціал трьох вертикальних транзисторних структур, розглянутих вище, не може бути достовірно оціненою. Тим не менше, вони представляють альтернативи графену. Рис. 2.2. Схема BiSFET, з MOSFET, вказують, що MOSFET-графен на сьогоднішній день не є єдиний варіант транзисторів на основі графена, і показують, що тривають дослідження нових графенових пристроїв за межами MOSFET.

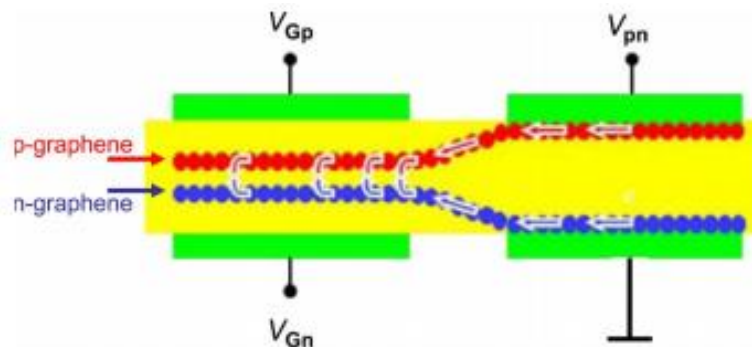


Рис.2.2. Будова двохшарового псевдоспінового польового транзистора (BiSFET)

2.2 Макроскопічні графенові польові транзистор

Найпростішим пристроєм застосування графену може бути здається, як матеріал для заміни каналів для кремнієвих МОП-транзисторів. Рис. 2.3а показує схему такого графенового польового транзистора (FET), що включає верхній електрод затвора, діелектрик затвора та металеві контакти джерела та стоку. На рис. 2.3 б показана оптична мікрофотографія макроскопічного транзистора з ефектом графенового поля на діоксиді кремнію.

Виробництво графенових польових транзисторів відбувається за стандартною технологією кремнієвого процесу після того, як графен осідає та ідентифікується. Сюди входить використання фото- чи оглядової літографії, реактивне іонне травлення та осадження тонкої плівки для ізоляторів воріт та контактів. Подробиці типових процесів виготовлення описані в посиланнях.

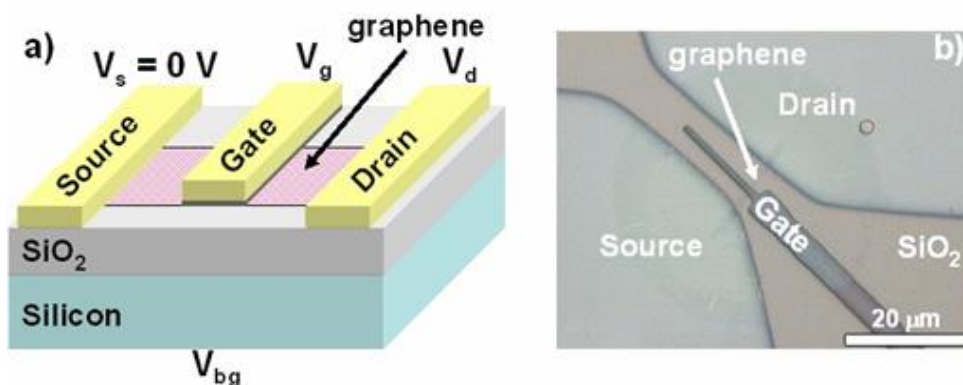


Рис.2.3. а) Схематичний переріз та б) оптична мікрофотографія вигляду графенового польового транзистора [6]

Характеристики передачі (тут: струм стоку I_d проти напруги затвора V_{bg}) типового графенового транзистора показані на рис. 2.4 а. Це виявляє основний недолік макроскопічних МОП-транзисторів графена, відсутність зазору енергетичної смуги ($E_g = 0$ eV) суттєво обмежує поточну модуляцію в графен-транзисторі і, крім того, призводить до амбіполярної поведінки.

Насправді найкращою модуляцією струму, про яку повідомлялося на сьогоднішній день, було близько 30, виміряних при криогенних температурах. Крім того, у поєднанні з випадково розподіленими оксидними зарядами нульовий зазор в смузї призводить до кінцевої мінімальної щільності заряду навіть без будь-якої прикладеної напруги затвора. Отже, макроскопічні графенові транзистори проводять значний струм навіть у точці їх мінімальної провідності (також називається точкою Дірака або точкою нейтральності заряду), перешкоджаючи їх застосуванню як заміник кремнієвого МОП-транзистора в майбутніх логічних схемах типу CMOS.

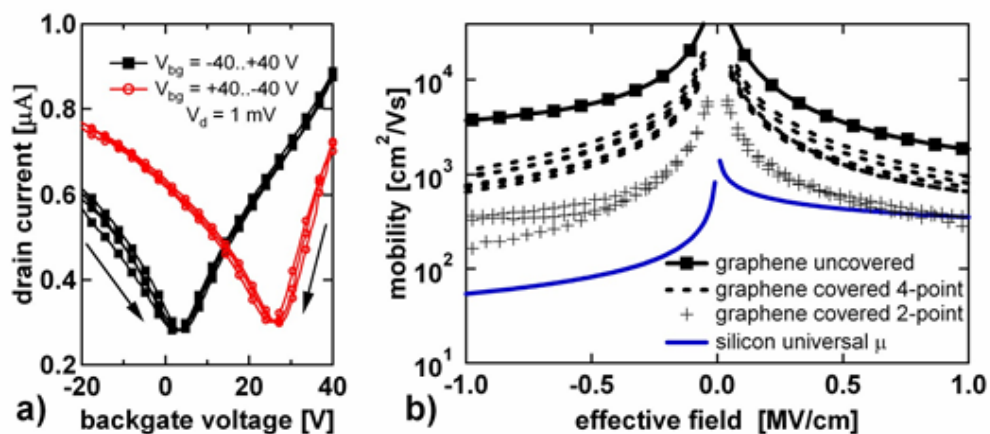


Рис.2.4. а) Струм стоку проти напруги затвора графенового транзистора. Зміна напрямку розгортки призводить до значного гістерезису $\Delta V = 22$ В. б) Рухливість у порівнянні з електричним полем у графенових транзисторах. Покриття графена ізолятором воріт призводить до зменшення рухливості. Контакти мають значний вплив на польові транзистори графена. Універсальна рухливість кремнію включена в якості еталону [7]

На рис. 2.4 а далі показаний гістерезис, коли напруга затвора змінюється з негативного в позитивний напрямок і навпаки. Ця типова поведінка відбувається, незважаючи на вимірювання у вакуумних умовах ($P = 5 \times 10^{-3}$ мбар), і є потужним показником затримувачів заряду поблизу розділу графен / ізолятор.

У той час як суспендований графен, виміряний в умовах надвисокого вакууму, мав рухливість, що перевищує $200000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, реалістичні транзистори ультрафіолетового графену обмежені в експлуатації підкладками та верхніми воротами. Тим не менше, рухливість носіїв у приладах із верхньою затвором перевищує таку, що стосується кремнію, і, як правило, становить від декількох сотень до тисячі cm^2/V , хоча інтерфейси графен / ізолятор ще не оптимізовані. На рис. 2.4 б показано рухливість електронів і дірок, витягнуту з декількох пристроїв із верхньою затвором, як у 2-точковій, так і в 4-точковій конфігурації зонда [8]

2.3 Графінові нанолентові транзистори

Потенційним методом створення зазору в графені є розрізання його на вузькі стрічки розміром менше кількох десятків нанометрів (наноленти графена, GNR). Однак GNR слід розділити на два підтипи, як зазначено на рис. 1.1 крісло та стрічки із закінченням зигзагоподібної кромки. Обидва типи GNR можуть бути напівпровідниковими або напівметалевими. У стрічках крісел перехід від 2D графену до 1D GNR призводить до квантового обмеження та зазору, який приблизно обернено пропорційний ширині наноленти (Напр. $\sim 1 / \text{Вт}$) за моделюванням [9]

Далі передбачається, що точне значення ширини зазору залежить від кількості N атомів вуглецю на стрічці. Це продемонстровано на рис. 2.5 а, де показано модельована щільність станів (DOS) у порівнянні з енергією для трьох різних GNR-крісел із закінченням водню з атомами $N = 11, 12$ і 13 по ширині GNR. Поки GNR з $N = 11$ є напівметалевим, стрічки з атомами 12 і 13 є напівпровідними (зазвичай стрічки крісла є напівметалевими при $N = 3m - 1$, де m - ціле число). Однак у зигзагоподібних ГНР із закінченням водню ситуація є більш складною. Це було передбачено Nakada et al. що локалізовані крайові стани поблизу рівня Фермі призводять до напівметалевої поведінки, незалежно від кількості атомів вуглецю.

З іншого боку, Son et al. розрахували *ab initio*, що намагнічування крайок викликає шаховий потенціал підрешітки на графеновій решітці, що індукує ширину зазору. Нарешті, були розглянуті GNR з іншою хіральною орієнтацією, включаючи поєднання країв уздовж стрічки, що додає складності цього варіанту. Підводячи підсумок, до модельованих результатів для будь-якої форми GNR слід ставитись обережно, оскільки вони, як правило, поділяють оптимістичне припущення про добре контрольоване припинення звисаючих облігацій. Однак насправді існує дуже велика кількість хімічних груп, що закінчують крайові атоми однієї наноленти графена.

Нещодавно було опубліковано перше детальне обговорення для вирішення цих питань, але, мабуть, розумно вважати природу "реального життя" зигзагоподібних GNR відкритим питанням на даний момент часу.

Прогнозована наявність ширини смуги в конкретних GNR була експериментально підтверджена. Перші докази, де GNR були структуровані за допомогою електронно-променевої літографії та витравлені в кисневій плазмі з мінімальною шириною ~ 20 нм. Смугові зазори цих GNR знаходяться в діапазоні ~ 30 меВ і призводять до польових транзисторів із співвідношенням іон / іоф близько 3 порядків при низьких температурах (1,7 - 4 К), зменшених до відношення ~ 10 при кімнатній температурі.

Ці дослідження підтверджують теоретичні передбачення, що для дійсного польового транзисторного ефекту при кімнатній температурі необхідні коефіцієнти скорочення до 10 нм. Що ще важливіше, експерименти виявили ширину забороненої зони незалежно від хіральної орієнтації GNR. Цей останній результат пояснювався сильним впливом крайових станів, який домінує над хіральною залежністю смугової структури. На сьогоднішній день два приклади GNR до 10 нм були показані експериментально. Пономаренко та ін. виготовили GNR з мінімальною шириною близько 1 нм та шириною зазору близько 500 меВ за допомогою електронно-променевої літографії та багаторазового, ретельного перенапруження. Отримані транзистори, отже,

вимикаються при кімнатній температурі до “відсутність вимірюваної провідності”.

Альтернативний процес виготовлення GNR. Тут графенові стрічки були отримані з розчину з графіту термічним відлущуванням, ультразвуком і центрифугуванням. Отриманий розчин диспергували на підкладках і GNR ідентифікували за допомогою атомно-силового мікроскопа (AFM). Отримані пристрої демонстрували транзисторну дію, що добре поводитись, при кімнатній температурі із співвідношенням I_{on}/I_{off} більше 10^6 [10]

Нарешті, експериментально показано, що розпакування вуглецевих нанотрубок шляхом травлення або розпилення призводить до GNR. Цікаво, що всі транзистори GNR у цих дослідженнях були напівпровідними, хоча, як вважалося, присутні як крісло, так і зигзагоподібна орієнтація. Експериментальні співвідношення I_{on} / I_{off} , про які повідомляється на сьогодні, зведені на рис. 2.5 б. Хоча вони чітко підтримують теоретичні прогнози та демонструють перспективу щодо електроніки нанограбон з графеном, вони також демонструють нагальну потребу в подальших дослідженнях у цій галузі, статистичних даних очевидно не вистачає, і розбіжності між теорією та експериментом необхідно усунути.

Необхідність контрольованих розмірів характеристик до 10 нм та великі невизначеності в контролі хіральності, а також визначення граничного стану залишаються величезними викликами для майбутньої промислової застосовності. З цією метою було продемонстровано, що нещодавно розроблена методика - мікроскопія іонних пучків гелію - має потенціал для точного наноформатування графена.

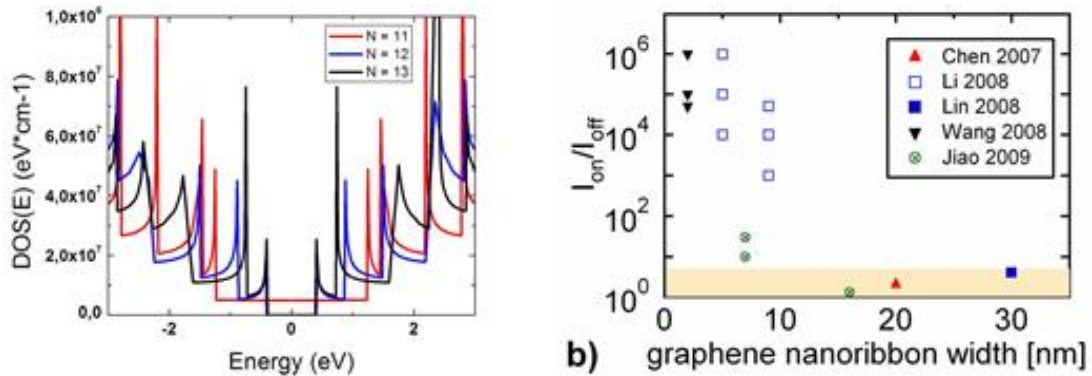


Рис. 2.5. а) модельована щільність станів (DOS) у порівнянні з енергією натрієвих графенових нанопластів (ГНР), що закінчуються воднем, для різної кількості електронів N на стрічці, б) експериментальні коефіцієнти іон / іоф проти ширини GNR. Жоден із GNR, про які повідомлялося до цього часу, не продемонстрував металевої поведінки. У нижній кольоровій частині графіку вказані значення іонів / іофів типових макроскопічних польових транзисторів графена. [11]

2.4 ВЧ транзистори

Обговорювана відсутність ширини забороненої зони при кімнатній температурі в макроскопічних транзисторах графену робить їх непридатними для логічних застосувань. З іншого боку, для радіочастотних (РЧ) аналогових додатків бажаний високий коефіцієнт включення, але не обов'язковий. Натомість найважливішим для хороших ВЧ-характеристик є канал FET з чудовими транспортними властивостями несучої (висока мобільність та максимальна швидкість) у поєднанні з малою довжиною масштабу, яка значно покращується в міру зменшення товщини матеріалу каналу. [12]

Оскільки графен відповідає цим вимогам, нещодавно були досліджені транзистори транзисторних транзисторів, які виготовляються як з відшарованого, так і з епітаксійного графена. Повідомлені частоти відсікання побудовані як функція довжин воріт на рис. 2.6. Максимальна зафіксована частота відсікання становила $f_T = 26$ ГГц, але зазначені значення мобільності

були далеко не ідеальними, і більш високий f_T можна очікувати для оптимізованих пристроїв з менша довжина воріт. Це ще раз наголошує на необхідності проектування інтерфейсу графен / ізолятор.

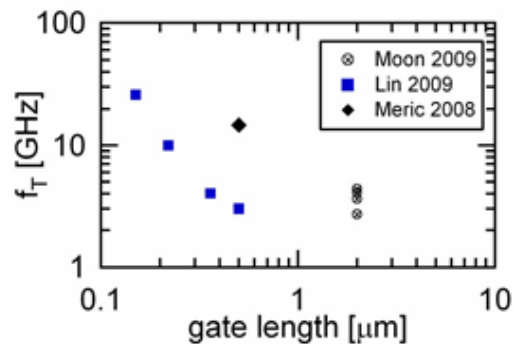


Рис. 2.6. Короткий огляд опублікованого графенового ВЧ-транзистора з частотою відсікання [13]

2.5 Двошарові графенові транзистори

Принципово інший підхід можна застосувати, використовуючи двошаровий графен (BLG). BLG складається з двох шарів графена, як правило, розташованих у компонуванні Bernal (AB) і взаємодіючих через їхні зв'язки (Рис. 2.7 а). Це сама по собі захоплююча і складна система, яка відрізняється як від одношарового графену, так і від традиційних двовимірних електронних газів (2DEG), хоча вона має деякі характеристики кожного. Дослідження двошарового графену, розпочате в 2006 році Мак-Кенном та співавт., Які продемонстрували, що низькоенергетична смугова структура нейтральної BLG не має проміжків і виявляє різноманітні ефекти другого порядку. Було обговорено низькоенергетичну смугову структуру, а також утворення зазору при застосуванні поперечного електричного поля.

Однією з унікальних особливостей двошарового графену є здатність відкривати регульований проміжок енергетичної смуги шляхом інженерної різниці потенціалів між шарами волокна, як показано на рис. 2.7 б.

Теоретичні дослідження передбачають значну ширину зазору, що відкривається до 300 меВ у АВ, що укладає BLG, використовує перпендикуляр електричне поле. Двошаровий графен - єдиний відомий матеріал, що має регульовану ширину зазору. Тому BLG пропонує можливості проектування нових типів на базі 2DEG, недоступних із використанням звичайних напівпровідникових 2DEG. До цього часу розкриття ширини смуги в BLG шляхом вертикального порушення симетрії було досягнуто у двох основних напрямках, або шляхом створення поперечного електричного поля між шарами, Le.

У першому способі розкриття ширини зазору затворний електрод використовується для генерації електричного поля зміщення. У цьому методі для встановлення електричного поля переміщення, перпендикулярного площині BLG, використовується зовнішній стовп клапана, що знаходиться в безпосередньому контакті з BLG (наприклад, верхній стовп клапана).

Поле індукує дві різні надлишкові щільності заряду на двох шарах BLG, таким чином, викликаючи асиметрію щільності заряду між двома шарами. Кулонівська взаємодія між двома асиметричними зарядами спричиняє розкриття зазору між смугами провідності та валентної енергії на діаграмі смуги BLG. За допомогою ІЧ-спектроскопії виміряно оптичну ширину смуги в 250 меВ. Для того, щоб досягти діапазону 300 меВ, прикладене електричне поле має бути більше 3,5 В/нм. Коли застосовується таке високе електричне поле в BLG, щільність заряду в BLG перевищує 10 см^{-2} .

Тому для вимкнення транзистора первинний затвор повинен генерувати дуже велике поле електричного зміщення, щоб компенсувати надлишковий заряд і привести рівень Фермі в пропускну здатність. Ще одне, що знеохочує, щоб мати змогу індукувати необхідну величину електричного поля, верхній блок воріт повинен включати діелектрик з досить високим k в безпосередньому контакті з BLG. До цих пір осадження атомного шару (ALD) застосовувалось для нанесення вискоефективних діелектричних матеріалів (наприклад, ALO) на графен, і було досягнуто електричних полів потужністю до 2,5 В / нм.

Використання ALD high-k на BIG після захисту поверхні графена полімерним буферним шаром.

При другому методі розкриття рукоятки верхній шар BLG легується фізичною абсорбцією атомів або молекул. Розглядаючи BLG, ефективне електричне поле може бути індуковано шляхом розміщення надлишкового заряду на верхньому шарі, що призводить до перерозподілу заряду та асиметрії між верхнім і нижнім шарами. Допінг BLG хімічною фізичною сорбцією нагадує ефект зовнішнього затвора.

Однак перелічені підходи допінгу нелегко контролювати і навряд чи сумісний із типовим процесом КМОП. Як вже зазначалося, легування BLG лише на верхній стороні призводить до утворення високої щільності заряду в графені. Крім того, електричні поля, досяжні за допомогою перерахованих вище методів, недостатні для відкриття пропускну здатність, досить велика для досягнення високих коефіцієнтів.

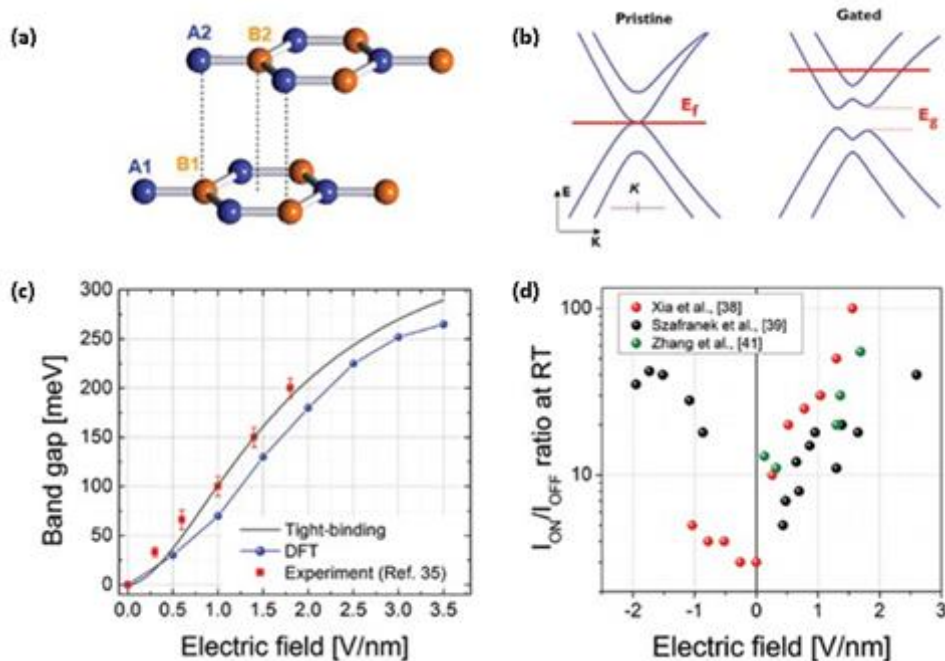


Рис. 2.7. (a) Схема АВ-укладеного BLG; (b) схема електронної смужової структури первозданної BLG (за відсутності напруги на затворі) та керованої BLG; (c) залежність ширини забороненої зони в BLG від застосовуваного електричного поля зміщення [14]

РОЗДІЛ 3

ПРИСТРОЇ НА ОСНОВІ ГРАФЕНОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

3.1 Електрооптичні прилади

Відсутність ширини зазору в графені обмежило його перспективи щодо заміни кремнію в MOSFET, незважаючи на високу рухливість електронів у першому. Без діапазону забороненого діапазону MOSFET не можна вимкнути, що призводить до поганого коефіцієнта перемикавання струму (від струму до струму відключення, тобто I_{on} / I_{off}) Хоча транзистори GNR із шириною до 10 нм демонстрували коефіцієнт перемикавання $> 10^6$, мобільність була серйозно порушена. Надійне виготовлення таких вузьких GNR також є проблемою. Інші схеми для індукції ширини забороненої зони, така як напружений GNR та двошаровий графен, також вказує на обмежену придатність для графенових транзисторів (GFET).

Тому нетрадиційні явища, такі як негативна рефракція та псевдоспіни, пропонуються для досягнення необхідного перемикавання. Як оптичний аналог лінзи Веселаго, p – n-перехід у графені демонструє негативне заломлення, яке фокусує косо падаючі електронні хвилі. Звичайно падаюча хвиля ідеально пропускає (відбиває) через перехід для одношарового (двошарового) графена, явища, відомого як тунелювання Клейна. Таким чином, графен дає можливість пристроям з унікальним контролем електронних хвиль, таких як електромагнітні хвилі, запряжені в фотонні системи.

Однак електрони мають меншу довжину хвилі де Бройля, ніж фотони, властивість, яка дозволяє отримати більш високу роздільну здатність в електронному мікроскопі, і оскільки розмір пристрою обмежений робочою довжиною хвилі, електрооптичні прилади графена можуть бути набагато меншими, ніж їх оптоелектронні аналоги. Без середнього пробігу (mfp) довший, ніж цільові довжини каналів майбутніх обчислювальних пристроїв, і висока рухливість електронів, доповнена електрооптичним ефектом, пропонує

оптимізоване рішення для високошвидкісних електронних компонентів з низькою потужністю [15]

Електрооптичний ефект графену дотепер породжував наступні три типи досліджень пристроїв.

Електронне волокно, для просторової модуляції легування по ширині в графеновому каналі може бути використана комбінація задніх ключів під усім графеновим каналом та центрально накладених верхнього клапана вздовж напрямку (довжини). Позитивна від'ємна та від'ємна (позитивна) напруги на затворі, відповідно, на затворі та на верхньому затворі, утворюють $n - p - n$ ($p - n - p$) перехід.

Для такого пристрою було показано, що електронні хвилі піддаються селективному кутовому пропусканню та загальному внутрішньому відбиттю на $p - n$ -з'єднанні, яке проводиться через центральну область графенових каналоподібних лазерів, що поширюються через оптичне волокно. Напруги затвора регулюють хвильовий вектор Фермі, що розповсюджується, і, отже, показник заломлення (η) (відношення хвильового вектора Фермі з двох сторін переходу), який, у свою чергу, визначає критичний кут ($\theta_C = \arcsin(\eta)$). Для великого критичного кута може відбуватися значний витік у сусідні регіони і нижче спрямовуюча ефективність волокна. Для ефективного проходження електронної хвилі через центральну область, крім оптимального контролю напруги затвора, перпендикулярні магнітні поля можуть також застосовуватися до збільшення кута падіння і, таким чином, зменшити передачу через інтерфейс $n - p$ [16]

Транзистори з високим рівнем іонів / іофів. Графеновий транзистор з подвійним затвором із точковим джерелом та розширеним стоком вдосконалений у посиленнях, як показано на рис. 3.1a. З використанням електрооптики як принципу роботи, конструкція пропонує співвідношення іон / відхід п'яти порядків і нахил підпорогового значення (SS) менше (KBT / q) 10.

У конструкції пропонується фізичний ізолюючий бар'єр для придушення Тунелювання Клейна та сусідні поперечні режими високої передачі, які в

іншому випадку призвели б до значного струму витоку. Напруги затвора модулюють кутову смугу пропускання, по якій електрони можуть поширюватися від сегмента графена під V_{G1} до V_{G2} , індукуючи віртуальний проміжок енергетичної смуги.

Ефективність цієї конструкції, однак, порівнянна з графеновим квантовим відбиваючим перемикачем, який може бути простішим у виробництві.

Нахилені перемикачі р – n-переходів, запропоновані логічні пристрої малої потужності для використання електрооптичного ефекту в графені. Нахилений верхній затвор рис. 3.1 б, над графеном із заднім затвором служить подвійній меті. Окрім регулювання легування носія в сегменті графена під ним, кут нахилу δ на переході управляє віртуальним зазором енергетичної смуги, як кут бар'єру θ_B .

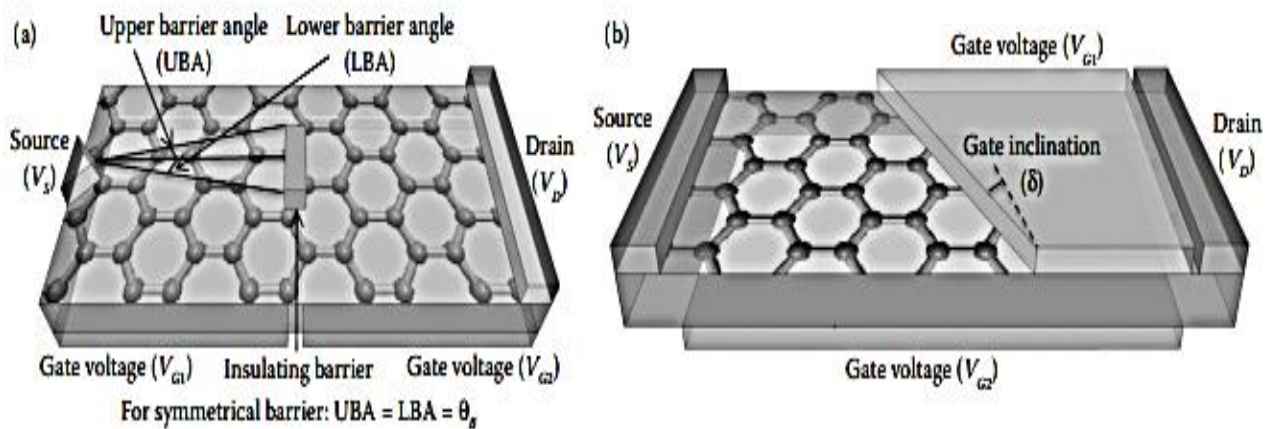


Рис. 3.1. Пристрій перемикання графену на основі електрооптики. (а) Точкове джерело впорскує електрони в усі кутові режими (фронт кругової хвилі) в канал. На електронному переході, утвореному між двома воротами, лише електронні хвилі з кутом падіння між кутом бар'єру та критичним кутом дозволяють перетинати перехід і згодом збираються на розширеному стоці. (б)

Плоский фронт хвиль електронних хвиль, що вводяться від джерела, страждають на заломлення в нахиленому переході через електростатично контрольований показник заломлення через V_{G1} та V_{G2} . [17]

Дві напруги затвора координують показник заломлення (η) у нахиленому переході, а отже, і критичний кут (θ_C). Спостерігає плоский хвильовий фронт електронних хвиль від джерела кут падіння $\theta_i = \pi / 2 - \delta$ на переході, і може зазнати повного внутрішнього відбиття, якщо θ_i перевищує θ_C . Тому перемикання відповідного VG1 може передавати або відображати електронні хвилі для перемикання транзистора.

3.2 Радіочастотні графенові транзистори

Тільки велика робота сигналу транзистора спричиняє стан вимкнення. Для невеликої операції сигналу транзистор зміщений у точці спокою, над якою накладається невеликий змінний компонент (змінного струму).

Висока рухливість і швидкість насичення графена відповідають такій малій операції сигналу, необхідній для застосування на радіочастотних (НЧ) та мікрохвильових (мкВт).

Недавні досягнення у виробництві НЧ-транзисторів низької довжини (L_g) RF справді продемонстрували внутрішню граничну частоту (f_T) (> 1 ТГц), що наближається до частоти зрілих напівпровідників III – V.

Крім того, моделювання показали, що зменшення масштабу нижче ультрасучасного GFET $L_g L_g$ до режиму до 10 нм може призвести f_T до декількох десятків ТГц. Більше того, на відміну від інших напівпровідників, радіочастотні характеристики в GFET мають більший тепловий вікно для роботи, оскільки вони не страждають від вимерзання носія при криогенних температурах [18]

Тому використання величезного потенціалу графеної ВЧ-технології та її викликів в даний час є предметом інтенсивних досліджень. Найбільш часто використовуваним показником якості для ВЧ-транзистора є висока гранична частота f_T , при якій коефіцієнт посилення струму короткого замикання дорівнює одиниці, і висока максимальна частота коливань f_{max} , при якому односторонній коефіцієнт підсилення потужності (U) для системи, сумісної з

імпедансом, дорівнює одному, обидва з яких витягуються за допомогою визначених S-параметрів.

Однак вихід короткого замикання та хороший збіг імпедансу не представляють реальної системи, для якої коефіцієнт підсилення напруги в розімкненому ланцюзі (A_v) стає більш практичним критерієм для порівняння продуктивності [19]

Щоб зрозуміти невирішені виклики та оцінити прогрес від першої демонстрації власного f_T 26 ГГц на механічно відшарованому 150-нм графеновому каналі до 1 Гц на довжині до 60 нм для відшарованого, 300 ГГц (350 ГГц) на 40 нм для CVD (епітаксійний) та 50 ГГц зовнішній f_T на 170 нм довжиною для CVD, вирощений графен, важливо розуміти фактори, що обмежують ефективність.

Рухливість графену може значно погіршитися через основну підкладку і верхній діелектрик через їх фононні режими та індуковане субстратом легування [20]

Акустичні фонони у самому графені відносно незначно впливає на g_m . Тому продуктивність ВЧ покращилася переходом від діоксиду кремнію (SiO_2) до алмазоподібного вуглецю (DLC) підкладки та діелектрика бор-нітриду (BN). Крім того, відсутність ширини зазору в графені в поєднанні з ефектом підкладки ускладнює досягнення насичення струмом і, отже, призводить до нестабільної точки спокою.

Однак нещодавні дослідження продемонстрували насичення струму з розумною ефективністю ВЧ-діапазону GFET на поліїмідній підкладці. Другий рівень деградації f_T виникає внаслідок відхилення, спричиненого осадженням у верхній частині.

Він підтримує паразитоподібний великий опір доступу та ємність, що перекривається. Нині було значно вдосконалено використання самовирівняних ворітних конструкцій із нанопроволочними затворами або металевими T-воротами за допомогою маскування тіней та звичайної додаткової техніки оксиду металу (КМОП) [22]

Далі, металеві контакти, які утворюють джерело та зливний термінал, є вузькими місцями у досягненні високих f_{\max} та A_v . Носії заряду повинні проходити через електростатичний бар'єр, створений на межі розділу метал-графен, через різницю в робочій функції (ϕ) та p-n-перехід, що створюється між сегментами графена під контактами та каналом.

Нещодавно використання паладієвих електродів, що мають невідповідність ϕ , і розміщення задньої заслінки під усім пристроєм для першого контролю металевого легування в графені під контактами, а друге для зменшення вихідної провідності (g_{DS}) покращило обидва значення f_{\max} та A_v . Експериментальні дослідження не обмежувались ізольованими графеновими ВЧ-транзисторами.

Хоча поки працюють лише в діапазоні частот від 10 МГц до 10 ГГц, інтегральні схеми з унікальними функціональними можливостями, такими як трансивер, амбіполярні змішувачі, потрібні підсилювачі, множення частоти поза діапазоном транзитних частот та підсилювач звуку були успішно продемонстровані.

Експлуатаційна частота в основному була обмежена через неоптимізовану паразитування та деградацію внаслідок інтеграції пасивних елементів [23]

3.3 Теплові пристрої на основі графенових транзисторів

Зростає інтерес до теплових властивостей графену, запаленого експериментами, що виявляють чудову теплопровідність графена.

Було продемонстровано, що теплопровідність суспендованого одношарового графена знаходиться в діапазоні приблизно $3000\text{--}5000 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$, що свідчить про його потенційне використання в якості майбутнього матеріалу для теплового управління.

Експерименти також показали надзвичайно високу теплопровідність для декількох шарів графену і графенових пластівців залежно від ширини та

температури. Незважаючи на високу теплопровідність, дослідження транспортних властивостей графенових високопольових приладів показали, що рухливість і поточна ситуація дуже чутливі до розсіювання електронів на поверхневих фонах підкладки SiO₂ [24]

Крім того, низька теплова межа, опір на межі розділу графену і основи вимагає ефективного розсіювання тепла для матеріалу теплової поверхні додатків. Отже, вертикально складений графен у тривимірній (3D) архітектурі може добре подолати слабкі Ван-дер-Вальсові взаємодія в неплоскому тепловому зв'язку внаслідок, дуже високої анізотропії теплових властивостей графена.

Теоретичні та експериментальні роботи продемонстрували тривимірні наноструктури, такі як нанопористий стовпчастий графен з комбінованої форми УНТ та графенових листів, графен піни з прямим синтезом 3D-піноподібних графенових макроstruktur та 3D вертикально вирівняною функціоналізованою багатошаровою архітектурою графена, що є корисним для посилене зберігання водню, гнучкі провідники та енергія програми управління.

Більше того, термоелектричний транспорт вимірювання графену показали термоелектричну потужність $\sim 80 \text{ мкВ К}^{-1}$ при кімнатній температурі та $\sim 50 \text{ мкВ К}^{-1}$ при низькій температурі у зразках графену з високою рухливістю. Однак крім високої електронної провідності та помірної термоелектричної потужності, теплопровідність повинна бути придушена для досягнення ефективного пристрою перетворення термоелектричної енергії [25]

ВИСНОВКИ

У цій роботі було розглянуто потенціал польових транзисторів на основі графена для доповнення або заміни існуючої кремнієвої CMOS-технології. Хоча макроскопічні графенові транзистори не придатні для логічного застосування через відсутність зазору енергетичної смуги, графен-ВЧ-транзистори здаються перспективними та здійсненними.

Графінові наноленти, з іншого боку, демонструють надзвичайну перспективу як прямолінійний підхід, сумісний з CMOS, але їх надзвичайна чутливість на атомному рівні як до геометричних, так і до варіаційних варіантів закінчення цілком може зробити їх застосування неможливим.

Нещодавні відкриття некласичних механізмів перемикання можуть врешті-решт призвести до коінтеграції графену в кремнієву технологію, хоча сьогодні деталі, очевидно, ще не ясні. На додаток до цих проблем, пов'язаних з пристроями, основним перешкодою для застосування графена є відсутність великої площі, сумісної з CMOS, техніки осадження.

На щастя, у міру вивчення ССЗ та суміжних методів сьогодні багато питань, пов'язаних із пристроями, вирішуються із застосуванням існуючих методів виробництва відшарування та епітаксії графена. Ці ідеї можна буде передавати, як тільки з'являться промислово більш відповідні технології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Література:

1. Новоселов К.С. та ін. Ефект електричного поля в атомно-тонких вуглецевих плівках. *Наук*, 2004. 306 (5696): с. 666-669.
2. Berger, C. та ін., Ультратонкий епітаксійний графіт: властивості двовимірних електронних газів і шлях до наноелектроніки на основі графена. *Журнал фізичної хімії Б*, 2004. 108 (52): с. 19912-19916.
3. Гаррісон, В.А., вид. Електронна будова та властивості твердих тіл: фізика хімічного зв'язку. 1989, Публікації Дувра.
4. Гейм, А.К. та К.С. Новоселов, Підйом графену. *Nat Mater*, 2007. 6 (3): с. 183191.
5. Новоселов К.С. та ін., Двовимірний газ безмасових ферміонів Дірака в графені. *Nature*, 2005. 438 (7065): с. 197-200.
6. Berger, C., et al., Електронне обмеження та узгодженість епітаксійного графена з малюнком. *Наук*, 2006. 312 (5777): с. 1191-1196.
7. Болотін К.І. та ін., Надвисока рухливість електронів у суспендованому графені. *Solid State Communications*, 2008. 146 (9-10): с. 351-355.
8. Морозов С.В. та ін., Гігантські внутрішні рухливості носіїв у графені та його двошаровому шарі. *Physical Review Letters*, 2008. 100 (1): с. 016602-4.
9. Ду, Х. та ін., Наближення балістичного транспорту у суспендованому графені. *Nat Nano*, 2008. 3 (8): с. 491-495.
10. Мозер, Дж., А. Баррейро та А. Бахтольд, Струмове очищення графену. *Листи прикладної фізики*, 2007. 91 (16): с. 163513-3.
11. Баландін А.А. та ін., Чудова теплопровідність одношарового графену. *Nano Letters*, 2008. 8 (3): с. 902-907.
12. Гош, С. та ін., Надзвичайно висока теплопровідність графену: Перспективи застосування терморегулювання в наноелектронних схемах. *Листи прикладної фізики*, 2008. 92 (15): с. 151911-3.

13. Blake, P., et al., Рідкокристалічний пристрій на основі графена. *Nano Letters*, 2008. 8 (6): с. 1704-1708.
14. Бут, Т. Дж. Та ін., Макроскопічні графенові мембрани та їх надзвичайна жорсткість. *Nano Letters*, 2008. 8 (8): с. 2442-2446.
15. Ні, Z.H., et al., Визначення товщини графена за допомогою відбивної та контрастної спектроскопії. *Nano Letters*, 2007. 7 (9): с. 2758-2763.
16. Блейк П. та ін., Робить видимим графен. *Листи прикладної фізики*, 2007. 91 (6): с. 063124-3.
17. Абергель, Д.С.Л., А. Рассел та В.І. Фалько, Видимість пластівців графена на діелектричній підкладці. *Листи прикладної фізики*, 2007. 91 (6): с. 063125-3.
18. Casiraghi, C., et al., Rayleigh Imaging of Graphene and Graphene Layers. *Nano Letters*, 2007. 7 (9): с. 2711-2717.
19. Ferrari, A.C., et al., Раман-спектр графену та графенових шарів. *Physical Review Letters*, 2006. 97 (18): с. 187401-4.
20. Феррарі, А.К., комбінаційна спектроскопія графену та графіту: Розлад, електрон-фононне зв'язування, легування та неадиабатичні ефекти. *Solid State Communications*, 2007. 143 (1-2): с. 47-57.
21. Граф, Д. та ін., Просторово розв'язана спектроскопія комбінованого спектру одно- та малошарового графену. *Nano Letters*, 2007. 7 (2): с. 238-242.
22. Wang, Y.Y., et al., Посилення інтерференції раманівського сигналу графена. *Листи прикладної фізики*, 2008. 92 (4): с. 043121-3.
23. de Heer, W.A., et al., Епітаксійний графен. *Solid State Communications*, 2007. 143 (1-2): с. 92-100.
24. Kedzierski, J., et al., Епітаксiальні графенові транзистори на підкладках SiC. *Electron Devices*, транзакції ІЕЕЕ, 2008 р. 55 (8): с. 2078-2085.
25. Rohrl, J., et al., Спектри КР епітаксiйного графена на SiC (0001). *Листи прикладної фізики*, 2008. 92 (20): с. 201918-3.