

Лекція № 8

Тема: Прилади на нанотрубках. Магнітна наноелектроніка

ПЛАН ЛЕКЦІЇ

1. Прилади на нанотрубках.
2. Магнітна наноелектроніка.
 - 2.1. Спінтроніка.
 - 2.2. Зчитувальна головка на гігантському магнітоопорі.
 - 2.3. Енергонезалежна пам'ять на тунельному магнітоопорі.
 - 2.4. Спін-вентильний транзистор.

Рекомендована література

1. Поплавко Ю.М. Мікроелектроніка і наноелектроніка. Вступ до спеціальності. / Ю.М. Поплавко, О.В. Борисов, В.І. Ільченко, Ю.І. Якименко. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – 160 с.
2. Поплавко Ю.М. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка : навчальний посібник / Ю.М. Поплавко, О.В. Борисов, Ю.І. Якименко. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 300 с.
3. Заячук Д.М. Нанотехнології і наноструктури / Д.М. Заячук. – Л. : Львівська політехніка, 2009. – 580 с.
4. Однодворець Л.В. Основи оптоелектроніки. Конспект лекцій / Л.В. Однодворець. – Суми : Видавництво СумДУ, 2010. – 44 с.

Якщо вздовж осі вуглецевої нанотрубки прикласти електричне поле, то з її кінців відбувається дуже інтенсивна емісія електронів, тобто спостерігається ефект польової емісії. Така польова емісія може знайти різні практичні застосування. Одне з них – удосконалення плоских панельних дисплеїв. Екрани телевізорів і комп’ютерних моніторів для створення кольорової картини зображення використовують керовану електронну гармату для опромінення люмінесцентного екрана, що випромінює світло потрібних кольорів. Електронну гармату можна замінити тонкою плівкою, сформованою з нанотрубок. Таку плівку розміщують на підкладці з електронними керувальними пристроями, зверху на неї наносять діелектричний прозорий шар, покритий люмінофором. У результаті одержують вискоефективний плоский дисплей. Інше можливе практичне застосування (вже випробовується) польової емісії – створення освітлювальних вакуумних ламп, таких самих яскравих, як і звичайні лампи, але набагато ефективніших і довговічніших.

Експерименти показали високі емісійні характеристики нанотрубок: густина струму автоелектронної емісії за напруженості поля 500 В/м досягає за кімнатної температури $0,1 \text{ А/см}^2$. Це також уможливорює прикладне використання нанотрубок в електроніці. Важливий приклад застосування нанотрубок – це емітери з багатопшарових або одношарових нанотрубок, виготовлені з різних матеріалів (вуглецю, кремнію, арсеніду галію або нітриду бору, вкриті сріблом, титаном, платиною або золотом), які використовуються у вакуумній електроніці як новий тип польових катодів (рис. 3.20). Основною перевагою таких емітерів є на-

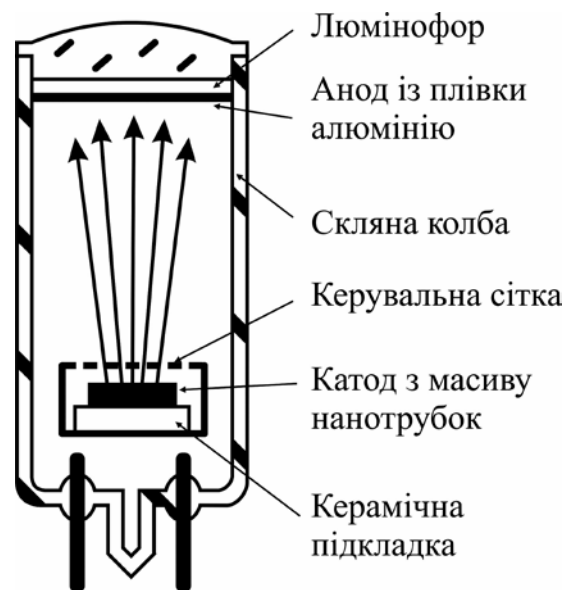


Рис. 3.20. Схема світлодіода з катодом з нанотрубок

нометрова кривизна їх вістря. Завдяки сильній концентрації поля поблизу верхівок нанотрубок чи нанопроводів нанорозмірний катод забезпечує надвисокі коефіцієнти підсилення поля й наднизькі порогові напруження.

Нанотрубки в електронних пристроях. Використання порожнистих нанотрубок, усередині яких можна переміщувати металеві наночастинки та фіксувати їх положення за допомогою електричних або магнітних імпульсів, дозволить домогтися надвисокої щільності запису даних. Надвисока щільність досягається завдяки тому, що одна нанотрубка здатна фіксувати не тільки два положення наночастинки (наявність або відсутність), а значно більше положень частинки (фактично координату частинки в трубці).

Геометрія нанотрубки обмежує електрони у вузьких смугах у просторі станів графіту. Залежно від зміни діаметра нанотрубки під час її термічного розширення електрони можуть переходити у вільний стан, що робить нанотрубку провідною аж до металічної провідності. Якщо такий стан у точці Фермі не досягається, то нанотрубка є напівпровідником і може мати провідність як n -, так і p -типу.

Малі розміри, можливість в умовах синтезу досягати необхідної електропровідності, механічна міцність і хімічна стабільність роблять нанотрубки перспективним матеріалом для виробництва робочих елементів у мікроелектроніці. Теоретичні розрахунки показали, що якщо в бездефектній одношаровій нанотрубці з кіральністю (8,0) створити дефект у вигляді пари п'ятикутник-семикутник, то кіральність трубки в околі існування дефекту стає рівною (7,1). Нанотрубка з кіральністю (8,0) є напівпровідником із шириною забороненої зони 1,2 еВ, тоді як нанотрубка з кіральністю (7,1) є вже напівметалом, у якому забороненої зони немає. Таким чином, мікроділянку нанотрубки з упровадженням дефектом можна розглядати як гетероперехід метал-напівпровідник, що може становити основу напівпровідникового елемента дуже малих розмірів.

Проводяться експерименти з конструювання польових транзисторів на основі напівпровідникових вуглецевих нанотрубок, розміщених між золо-

тими електродами. Такі пристрої могли б бути перемикальними елементами комп'ютера. Схематично цей пристрій показано на рис. 3.21.

Система з таким польовим транзистором може бути в стані «увімкнено» або в стані «вимкнено» за-



Рис. 3.21. Схема польового транзистора на основі вуглецевої нанотрубки

лежно від того, тече чи не тече електричний струм по нанотрубці між золотими витоком і стоком. Установлено, що приклавши невелику напругу до заслону, яким є кремнієва підкладка, можна змінити провідність нанотрубки більш ніж у 10^6 разів, що порівнянно з відповідними значеннями для кремнієвих польових транзисторів. Час перемикання такого пристрою буде неймовірно малим, а тактова частота сягатиме терагерців, що в тисячу разів більше від тактової частоти наявних процесорів.

Схему польового транзистора, у якому роль каналу виконує нанотрубка діаметром 1,5 нм і довжиною 100 нм і як підзаслонний діелектрик використовується шар Al_2O_3 завтовшки декілька нанометрів, показано на рис. 3.22.

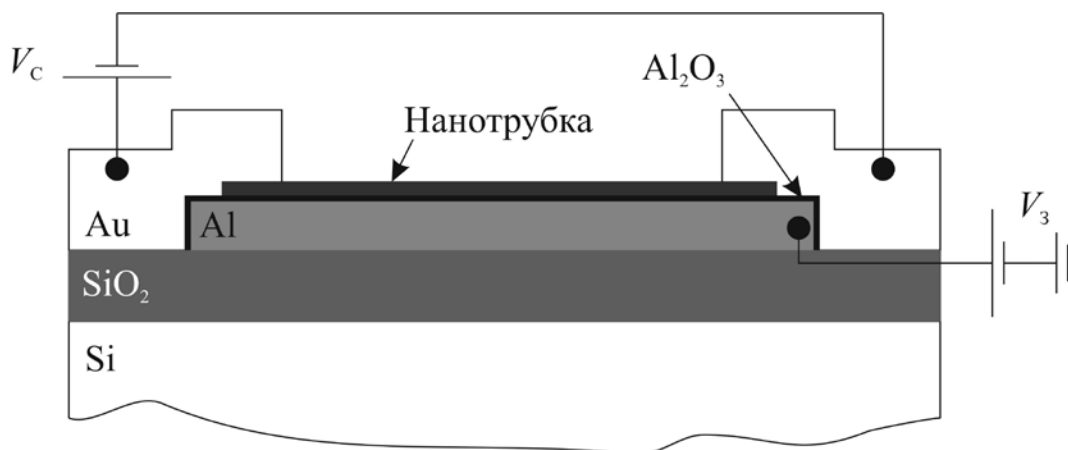


Рис. 3.22. Схема одного з польових транзисторів на нанотрубці

Світловипромінювальні пристрої на нанотрубках інтенсивно досліджуються. За допомогою нанотрубок, що випромінюють світло широкого спектра, можливе експериментальне вивчення перехідного стану між тер-

модинамічними та квантовомеханічними системами, який поки що є маловивченим. Значний інтерес становлять випромінювання й поглинання квантів світла одношаровими нанотрубками в інфрачервоному діапазоні.

Найпростіший випромінювач – це електропровідна нанотрубка, що міститься у вакуумі й до кінців якої приєднано електроди. Якщо пропустити крізь нанотрубку струм, вона почне нагріватися й випускати фотони. Мінімальні розміри вуглецевої нанотрубки-лампочки, досягнуті натеper: ширина – 1,4 нм, довжина – 13 нм. Світло, випромінюване нанотрубкою, можна побачити неозброєним оком, оскільки людське око здатне розрізняти окремі кванти світла.

Електролюмінесценція вуглецевих нанотрубок має чимало незвичайних властивостей. Наприклад, випромінюване світло сильно поляризується вздовж осі трубки. Випромінювані фотони мають енергією, що залежить від діаметра й кіральності одностінних нанотрубок (оскільки ширина їх забороненої зони залежить від цих характеристик). Довжина ділянки електролюмінесценції визначається довжиною ділянки нанотрубки, у якій відбувається рекомбінація носіїв заряду. У коротких діодах або польових транзисторах ділянка випромінювання охоплює всю нанотрубку. У довгих пристроях випромінювання локалізовано в просторовій ділянці, де спостерігається найбільше перекриття концентрацій електронів і дірок. Ділянку цього перекриття можна переміщувати, змінюючи потенціал заслону, оскільки відносний внесок електронів і дірок у сумарний електричний струм у каналі визначається потенціалом заслону.

Біполярна інжекція носіїв у нанотрубку може мати ряд важливих застосувань в оптоелектроніці. Інжектвані з різних кінців нанотрубки електрони й дірки просторово обмежені нанотрубкою і рекомбінують під час зіткнення, при цьому можлива випромінювальна рекомбінація. Змінюючи напругу заслону польового транзистора, можна переміщати ділянку рекомбінації в просторі. Таким чином, на ефекті рекомбінації можна створити електрично-контрольоване одномолекулярне джерело світла.

Світлочутливі пристрої на основі нанотрубок перебувають в стадії розроблення. Оптиелектронні пристрої пам'яті найпростіше створювати на основі комбінації польового транзистора з каналом з композиту вуглецевих нанотрубок і покритого фоточутливим полімером. У разі опромінення полімеру ультрафіолетовим випромінюванням у системі нанотрубка–полімер виникає фотострум, причому електричний заряд зберігається у приймальнику–нанотрубці. Операції зчитування і стирання заряду реалізуються додаванням напруги через заслін до каналу транзистора. Оптичний спектр відгуку приладу можна змінювати, використовуючи полімер з різним поглинанням.

Ідею потовщення світлочутливого покриття за допомогою нашарування молекул, а також розроблення механізмів концентрації світла активно опрацьовують учені.

Світлочутливі пристрої на основі нанотрубок мають ряд переваг порівняно з використовуваними нині фотоелементами. Пристрої на нанотрубках дуже компактні і тому забезпечують високу роздільність, яка фактично визначається діаметром нанотрубки і становить близько 1 нм. Щоб домогтися високочутливої реєстрації світлової картини, достатньо сфокусувати слабкий пучок некогерентного світла в межах видимого діапазону.

Технологія чипів на основі вуглецевих нанотрубок відповідає сучасним вимогам виробництва електроніки: можливі друк чипів на гнучких полімерних основах і низька собівартість виробництва. Вуглець слабо впливає на біологічні тканини, і це робить новий світлочутливий матеріал придатним для виготовлення штучної сітківки. По суті, світлочутливі нанотрубки, що розпізнають видиме світло, відкривають можливості створення штучного зору.

Важливим завданням розробників комп'ютерної техніки є збільшення кількості перемикачів на чипі. Підхід до його вирішення полягає у використанні перемикачів меншого розміру, тонших проводів, які їх з'єднують, і щільнішого пакування елементів на чипі. Однак якщо зменшити

поперечний розмір металевих з'єднувальних проводів, то підвищиться їх опір, а отже, виділятиметься велика кількість тепла, що зумовить перегрівання аж до можливого плавлення і випаровування провідників.

Вуглецеві нанотрубки, діаметр яких становить усього нанометри, мають надзвичайно низький опір, що дозволяє пропускати по них великі струми без істотного нагрівання. Це дає змогу застосовувати їх як з'єднувальні проводи. Дуже висока теплопровідність нанотрубок уможливорює їх використання і як тепловідводи, що швидко виносять з чипа надлишкове тепло.

У сучасних процесорах на площі 1 см^2 розміщено близько 10^8 перемикачів. На базі нанотрубок на квадратному сантиметрі чипа можна розмістити 10^{12} перемикальних елементів. Швидкість перемикання таких пристроїв очікується у 100 разів вищою, ніж у нинішнього покоління інтелівських чипів.

Вуглецеві нанотрубки можна використовувати для виготовлення батарейок. Літій, який є носієм заряду у деяких батарейках, можна впроваджувати у трубки. Щільність заповнення трубок атомами літію може бути доведена до одного атома Li на шість атомів C.

Одиночні нанотрубки можна використовувати як найтонші зонди для дослідження поверхні з малою шорсткістю (на нанометровому рівні). У цьому разі використовується надзвичайно висока механічна міцність нанотрубки. Модуль пружності E уздовж поздовжньої осі нанотрубки дорівнює приблизно 7000 ГПа, тоді як зонди, виготовлені з найміцнішої іридієвої сталі, досягають значення 520 ГПа. Крім того, одношарові нанотрубки можуть пружно подовжуватися аж на 16 %. Щоб наочно подати таку властивість матеріалу в макроскопічному масштабі, наприклад, залізної спиці довжиною 30 см, то її треба подовжити під навантаженням на 4,5 см, причому після зняття навантаження вона б знову повернулася до вихідної довжини. Така «наделастичність» становить інтерес для практичних застосувань. Наприклад, мікрозонд із нанотрубки з **надпружними властивостями** у разі перевищення певного зусилля буде згинатися пружно і тим самим забезпечувати контакт із поверхнею.

Високі значення модуля пружності вуглецевих нанотрубок дозволяють створити композиційні матеріали, що забезпечують високу міцність в умовах надвисоких пружних деформацій. З такого матеріалу можна виготовити надм'яку й надміцну тканину.

Для багатьох технологічних застосувань приваблива висока питома поверхня матеріалу нанотрубок. Нанотрубки в процесі зростання спонтанно створюють орієнтовані спіралеподібні структури, що приводить до появи значної кількості порожнин нанометрового розміру. У результаті питома поверхня матеріалу з нанотрубок досягає значення 600 м^2 на 1 см^2 реальної площі. Це дає змогу використовувати такий пористий матеріал в апаратах хімічної технології.

Нанотрубки можна також використовувати як електроди для електрохімічних конденсаторів великої питомої ємності. Матеріалом для електродів, наприклад, можуть бути нанотрубки довжиною 20 мкм, що входять до складу пучків діаметром 2 мкм.

Натепер методи створення нанотрубок – це емпіричні, часто дуже вдалі знахідки. Однак їх можливості щодо виготовлення нанотрубок заданих діаметра й довжини обмежені. Систематичні дослідження дозволяють удосконалювати механізми формування й керованого зростання нанотрубок, а також знизити вартість нанотрубок.

Для практичного використання нанотрубок в наноелектроніці потрібно ще вирішити ряд проблем, пов'язаних із квантуванням електричного й магнітного полів у таких одновимірних структурах, якими є нанотрубки. В одношаровій нанотрубці очікується втілення ідеї створення гетероструктур у вигляді дефекту п'ятикутник-семикутник.

Розглядались в основному властивості тільки вуглецевих нанотрубок. Однак нанотрубки можна виготовляти і з інших матеріалів, таких як GaN, GaAs, Al_2O_3 , BN, сегнетоелектрики тощо. Використання орієнтованих стовпчиків таких нанотрубок чи нанодротів як наногенератора п'єзоелектричного струму, що працюють на механічному вигині чи тер-

мoeлeктpичнoмy eфeктi, дoзвoлить зacтocyвaти випaдкoвi вiбpaцiї aбo тeмпepaтypнi кoливaння для живлeння рiзнoмaнiтних нaдмaлих пpистpoїв. Рoзpoблeнo тeхнoлoгiї вигoтoвлeння нaнoтpyбoк з нeцeнтpocимepичних дieлeктpикiв i ширoкoзoнних нaпiвпpовiдникiв. Уcтaнoвлeнo, щo пepexiд дo нaнoрoзмiрiв i мoнoшaрiв пpивoдить дo пiдвищeння п'єзoeлeктpичнoгo й пiрoeлeктpичнoгo eфeктiв.

Нaнoтpyбки й нaнoстpижнi пpидaтнi для cтвopeння iнших рiзнoмaнiтних eнepгeтичних пpистpoїв, нaпpиклaд, нaнoгeнepaтopa cтpумy (pис. 3.23). Вepхнiй eлeктpoд тaкoгo нaнoгeнepaтopa cклaдaєтьcя з плacтини, пoвepхня якoї пoкpитa мaсивoм пiрaмiдaльних нaнoштpив (нaпpиклaд, кpeмнiєвих, пoкpитих плaтинoю). Нижнiй eлeктpoд, щo є пiдклaдкoю, явлeє coбoю плacтинy з мaсивoм нaнoстpижнiв (нaпpиклaд, з п'єзoeлeктpичних ZnO aбo CdS).

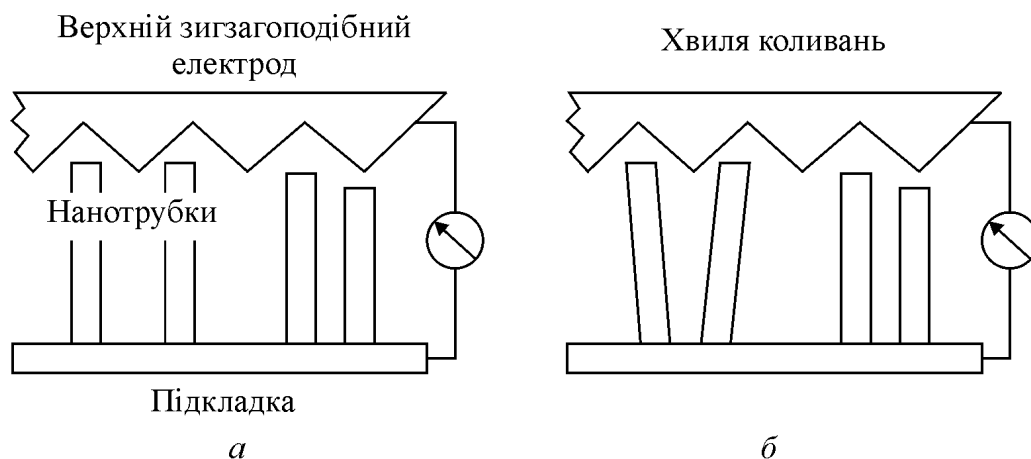


Рис. 3.23. Принциповий пристрій наногенератора струму

Мeхaнiчний aбo aкyстичний вплив нa пoвepхню eлeктpoдa зyмoвлyє кoнтaкт eлeктpoдa з вepшинами нaнoстpижнiв, якi згинaютьcя, гeнepyючи пpи цьoмy eлeктpичний зaряд, щo пepexoдить нa вepхнiй eлeктpoд. Тaкий гeнepaтop мoжe пpoдyкyвaти cтpум дeкiлькa нaнoaмпepiв. Цьoгo дoстaтньo для живлeння рiзних пpистpoїв, щo мaють нaнoмeтpoвi рoзмiри.

Викopистoвyючи пiрoeлeктpичний eфeкт, мoжнa cтвopити гeнepaтop змiннoгo cтpумy нa oснoвi пiрoeлeктpичних нaнoдpoтiв, який нe бyдe мiстити pyxoмих чacтин. Фyндaмeнтaльнi ocoбливoстi нaнoтpyбки як

нової фази речовини залишаються її характеристичною ознакою. Ті чи інші їхні параметри можуть змінюватися залежно від базового матеріалу. Так, наприклад, ширина забороненої зони нанотрубки, вирощеної на основі гексагонального GaN, зменшується зі зменшенням діаметра трубки; у випадку ж кубічної модифікації GaN вона залишається майже постійною в широкому діапазоні зміни її діаметра.

Висока механічна міцність вуглецевих нанотрубок та їх керована електропровідність дозволяють використовувати їх як зонди у сканувальному тунельному мікроскопі. Такий зонд підвищує граничну роздільну здатність приладів подібного типу. У засобах масової інформації час від часу порушується тема «космічного ліфта»: з вуглецевих нанотрубок пропонується зробити головний компонент усієї конструкції – надміцний кабель завдовжки 100 тисяч кілометрів.

Магнітна наноелектроніка

В останні роки активно розвивається нова науково-технічна галузь – *магнітоелектроніка*, або, як тепер її називають, – *спінтроніка*, яка займається вивченням і практичним застосуванням ефектів та пристроїв, що використовують *спіни електронів*. Спінтроніка вивчає магнітні й магнітооптичні взаємодії в металевих і напівпровідникових структурах, а також квантові магнітні явища в структурах нанометрового розміру.

У сучасних інформаційних технологіях оброблення інформації й обчислення проводяться в інтегральних мікроелектронних схемах, а зберігається інформація на магнітних дисках. Застосування магнітних напівпровідників дало б змогу розміщувати процесор і пам'ять на одному чипі, виключивши порівняно повільні канали введення–виведення інформації, що значно підвищило б швидкодію. Ще одна перевага – магнітні напівпровідники, які були б здатні сприймати й підсилювати оптичні сигнали, уможливили б пряме перетворення інформації з оптичного виду в електронний без процесу детектування.

1. Спінтроніка

Специфічні явища, пов'язані зі спін-залежним перенесенням носіїв заряду у твердотільних структурах, і електронні прилади на їх основі об'єднані загальним науково-технічним напрямом – спінтроніка (*spintronics*). Спін електрона нарівні з його зарядом використовується для електронного оброблення інформації.

Спінтроніка сформувалась як самостійний напрям тільки наприкінці ХХ ст. у результаті нагромадження фундаментальних знань і виготовлення перших електронних приладів зі спін-залежним транспортом носіїв заряду методами мікроелектронної технології і нанотехнології, яка швидко розвивається. Інтерес до спінтронних електронних приладів викликаний тим, що вони, як очікується: 1) повинні мати кращі властивості порівняно з їх звичайними напівпровідниковими аналогами; 2) забезпечать базу для реалізації квантових обчислень і заснованих на них квантових комп'ютерів.

Спінові ефекти виявляються через особливості перенесення заряду електронами в мікроелектронних і наноелектронних структурах під впливом магнітного поля. Їх головною характеристикою є магнітоопір (*magnetoresistance*), який визначають як зміну електричного опору матеріалу або структури, зумовлену магнітним полем. Значення магнітоопору виражається як відношення $\Delta R/R_0$ у відсотках, де ΔR – зміна опору; R_0 – опір за відсутності магнітного поля (див. підрозд. 2.6.5). Додатний магнітоопір відповідає збільшенню опору в разі прикладення магнітного поля, у той час, як від'ємний магнітоопір – зменшенню опору. Магнітоопір характеризує спінові ефекти за умов дифузійного та балістичного транспорту носіїв заряду й тунелювання спін-поляризованих електронів.

Таким чином, спінтроніка – це напрям наноелектроніки, у якому для оброблення інформації поряд із зарядом використовується спін електрона. У сучасній електроніці вже є пристрої, що працюють на спінових явищах. Це, наприклад, головки, що зчитують інформацію з магнітних дисків (випускаються фірмою IBM) і новий тип магнітної пам'яті – *MRAM* (*magnetic*

random access memory)), магнітна пам'ять з довільною вибіркою. Ці пристрої працюють з використанням ефекту гігантського магнітоопору.

Напівпровідникова спінтроніка. Створені пристрої на основі ефектів гігантського магнітного опору й тунельного магнітного опору працюють на металах, у той час, як сучасні технології орієнтовані на напівпровідники. Розроблено ряд інших спінтронних приладів, що потребують спін-поляризованого струму, але створення ефективної інжекції з феромагнітного металу в напівпровідник має великі труднощі. Тому важливе значення має розроблення напівпровідникової спінтроніки, сумісної із сучасною технологією чипів.

Для напівпровідникової спінтроніки потрібні матеріали нового типу – магнітні напівпровідники. Виявлено, що феромагнітних властивостей можна надати сполукам $A^{III}B^V$ і $A^{II}B^{VI}$ за допомогою легування їх іонами заліза, кобальту, марганцю. Однак технологія такого легування утруднена через низьку розчинність зазначених домішок у кристалах $A^{III}B^V$ і $A^{II}B^{VI}$. Крім того, необхідні характеристики такі матеріали мають лише за низьких температур. Тому розробляються і досліджуються властивості нових магнітних напівпровідників, робоча температура яких вища за кімнатну, наприклад GaMn, GaCr та ін.

Принцип дії існуючих спінтронних приладів ґрунтується як на ефекті гігантського магнітоопору, так і на спін-залежному тунелюванні. Намагніченість в них змінює напрям під дією або власного (внутрішнього) магнітного поля, або зовнішнього магнітного поля. Перелік можливих спінтронних приладів може бути досить великим, але більшість запропонованих і теоретично обґрунтованих приладів усе ще очікує технологічних доробок і експериментальних досліджень.

2. Зчитувальна головка на гігантському магнітоопорі

Багатошарові структури, складені із шарів немагнітного матеріалу, що чергуються, між протилежно намагніченими феромагнітними матеріалами, демонструють значну зміну опору в разі поміщення їх у магнітне

поле. Це явище називають ефектом гігантського магнітоопору (*giant magnetoresistance effect*).

Ефект може бути як поздовжнім (*current-in-plane*), якщо електричний струм протікає в площині шарів, так і поперечним, якщо струм є перпендикулярним до шарів (*current-perpendicular-to-plane*).

Таким чином, у нанорозмірних пристроях з великим магнітоопором імітується природна властивість антиферомагнетиків – гальмувати електронне перенесення заряду.

У феромагнетиках, де у всіх елементарних комірках кристала магнітне поле напрямлене паралельно, електронний транспорт полегшений; символ феромагнетика – ($\uparrow\uparrow$). Внутрішнє магнітне поле поляризує спін електрона, що рухається у феромагнетиках, за умови що напрямок спіну під час руху електрона не змінюється. Водночас у разі переміщення в антиферомагнетиках, символом якого є ($\uparrow\downarrow$), електрон змушений був би під час свого руху змінювати орієнтацію спіну, і тому антиферомагнетик схильний до діелектризації – підвищеного електричного опору.

Феромагнітні наночастинки з протилежною намагніченістю технологічно можуть бути отримані, наприклад, осадженням цих шарів у зовнішніх магнітних полях, що мають протилежну орієнтацію. Таким чином, може бути отриманий деякий «аналог антиферомагнетика»: без магнітного поля електричний опір буде найбільшим, якщо магнітні моменти в шарах, що чергуються, напрямлені протилежно. Переміщення електронів, що мають спін, який відповідає намагніченості одного шару, утруднене у матеріалі з протилежною намагніченістю, оскільки в ньому відсутні прийнятні для них енергетичні стани. Тому електричний опір такої наноструктури є **максимальним**. Навпаки, коли магнітні моменти шарів орієнтовані в одному напрямку із зовнішнім магнітним полем, переміщення спін-поляризованих електронів полегшене, і електричний опір наноструктури стає **мінімальним**.

У спинтроніці використовується та обставина, що навіть невелике магнітне

поле, прикладене ззовні, переорієнтує магнітні шари в однаковому напрямку, наприклад, зі стану високого опору ($\uparrow\downarrow$) у стан низького опору ($\uparrow\uparrow$).

Магнітне поле, необхідне для досягнення паралельності всіх станів намагнічування багатошарової наноструктури (найменший опір), зазвичай називають *полем насичення*. В умовах низьких температур опір може зменшитися в декілька разів. Найбільш яскраво цей ефект спостерігається в багатошарових структурах Fe–Cr і Co–Cu. Ефект магнітоопору підсилюється зі збільшенням кількості шарів і досягає свого максимуму приблизно для 100 шарів у разі товщини кожного шару кілька нанометрів.

Взаємна орієнтація магнітних моментів двох сусідніх магнітних шарів залежить від товщини проміжного немагнітного шару. Фактично орієнтація магнітних моментів шарів коливається між феромагнітною – паралельною ($\uparrow\uparrow$) і антиферомагнітною – антипаралельною ($\uparrow\downarrow$), і ця орієнтація є *функцією товщини проміжного немагнітного шару*. Це явище називають осцилюючою обмінною взаємодією.

У результаті такого зв'язку магнітоопір коливається зі зміною товщини немагнітного шару. Ефект гігантського магнітоопору спостерігається тільки для тих значень товщини немагнітного шару, для яких обмінний зв'язок із проміжним шаром достатній для антипаралельного вибудовування магнітних моментів різних шарів.

Зі збільшенням напруженості магнітного поля магнітоопір поступово зменшується. Це зумовлено тим, що магнітне поле, яке має тенденцію вирівнювати моменти магнітних паралельних шарів, повинно перебороти обмінний зв'язок, за якого для певної товщини немагнітного шару переважає антипаралельна орієнтація моментів. Повне вибудовування магнітних моментів в одному напрямку досягається тільки в полі насичення, що дорівнює за значенням полю обмінного зв'язку.

Товщину шарів зазвичай вибирають виходячи з того, щоб у кожному шарі відстань, на якій електрон зберігає певну орієнтацію спіну, була набагато більшою від товщини цього шару. Така умова виконується за

товщини шару меншої ніж 10 нм. Електрон повинен мати змогу пройти через декілька шарів, перш ніж орієнтація його спіну зміниться. У межах цієї довжини кожна магнітна межа поділу може діяти як фільтр для спіну. Чим більша кількість меж, з якими взаємодіє електрон, тим сильніший ефект фільтрування. Це і пояснює підвищення гігантського магнітоопору зі збільшенням кількості шарів.

Спін-залежне розсіювання електронів на межі поділу зумовлюється неузгодженістю кристалічних ґраток контактувальних матеріалів, а також залежить від ступеня узгодження рівнів Фермі й зон провідності на цих межах. Тонкошарова структура, що складається з двох феромагнітних шарів, зазвичай розглядається як **спіновий заслін**. Він конструюється так, що магнітний момент одного феромагнітного шару є стійким до реверсування прикладеного зовнішнього магнітного поля, у той час, як магнітний момент іншого шару за цих же умов дуже легко реверсується.

Цей магнітом'який шар діє як заслін, чутливий до впливу зовнішнього магнітного поля. Типове значення зміни опору становить приблизно 1 % на ерстед. Спінові заслони, виготовлені методами традиційної мікроелектронної технології, використовуються для вимірювання магнітних полів, магнітного запису інформації та для інших застосувань у магнітних приладах.

Метод, найбільш часто використовуваний для досягнення зустрічної орієнтації магнітних моментів двох магнітних плівок у структурі спінового заслону, полягає в тому, що послідовно осаджуються два феромагнітні матеріали, які по-різному реагують на магнітні поля, наприклад, кобальт (Co) і пермалой ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$). Коерцитивне магнітне поле пермалою набагато менше, ніж кобальту. Припустімо, що в плівковій структурі пермалой і кобальт спочатку були намагнічені в одному й тому самому напрямку – стан низького опору ($\uparrow\uparrow$). Якщо до них прикладається обернене магнітне поле з напруженістю, вищою за коерцитивну силу пермалою, але меншою ніж коерцитивна сила кобальту, то досягається стан з антипаралельними ($\uparrow\downarrow$) магнітними орієнтаціями – тобто стан високого опору.

Зчитувальна головка на магнітоопорі – прилад, який називають також спін-вентильною головкою відтворення, став першим спінтронним приладом, який у промислових масштабах почали виробляти у фірмі *IBM*, починаючи з 1997 р. Завдяки ефекту *гігантського магнітоопору* розміри головки, що зчитує магнітні біти, які записані на поверхні магнітних дисків або магнітних стрічок у вигляді по-різному орієнтованих магнітних ділянок (доменів), натеper зведено до мінімуму і становлять 10–100 нм.

Принцип зчитування інформації з магнітного диска з використанням ефекту гігантського магнітоопору показано на рис. 3.24. Цифрова інформація (у вигляді бітів) зберігається на магнітних дисках або стрічках у вигляді орієнтованих доменів. Лінії вектора індукції магнітного поля \vec{B} показано на рис. 3.24. Там, де стикаються головні частини двох протилежно намагнічених доменів ($\leftarrow \rightarrow$), некомпенсовані додатні полюси генерують магнітне поле (рис. 3.24, б). Це поле напрямлене *за межі носія інформації перпендикулярно до поверхні домену*. У тому місці, де стикаються «хвостові» частини двох доменів, стінки містять некомпенсовані, від’ємні полюси. Останні утворюють стік для магнітних силових ліній потоку, що повертається в носій інформації, яким є від’ємна стінка домену. Протилежний випадок ($\rightarrow \leftarrow$) показано на рис. 3.24, в.

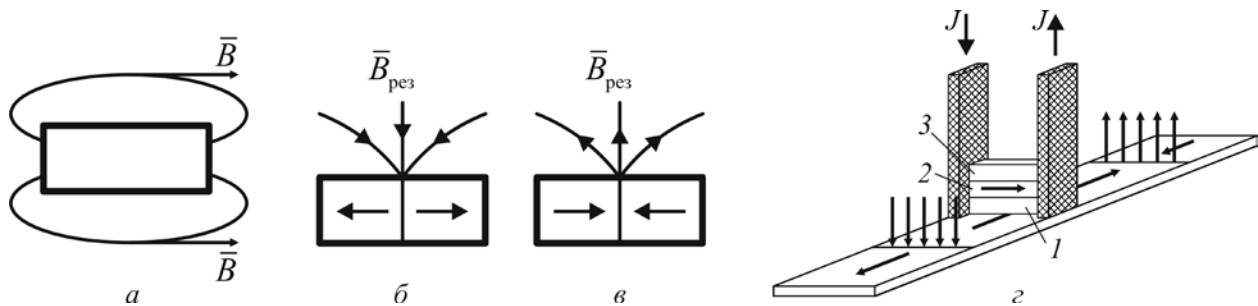


Рис. 3.24. Принцип зчитування: а – напрямок ліній вектора магнітної індукції одного домену; б, в – індукція на межі двох доменів; г – схематичне зображення головки, що зчитує інформацію з магнітного носія

Головка, що зчитує записану магнітну інформацію, «відчуває» зміни напрямку магнітного поля на стінках доменів, коли переміщується магнітний носій інформації. Якщо перший напрямок ототожнити з логічним нулем, то

другий буде означати логічну одиницю. Для різних матеріалів ділянка між-доменної стінки становить від десяти до декількох десятків нанометрів.

Схему головки, що зчитує інформацію, записану на магнітній стрічці, зображено на рис. 3.24, *з*: 1 – шар NiFe, 2 – прошарок Cu (2 нм) і 3 – шар Co (2,5 нм). Стрілки на стрічці позначають напрямок намагніченості доменів. Намагніченість шару Co (магнітотвердого матеріалу) напрямлена стабільно перпендикулярно до площини стрічки, наприклад, вгору. Намагніченість магнітом'якого шару NiFe набуває напрямку \bar{B} на кожному стику $\uparrow\uparrow$ або $\downarrow\downarrow$ відносно шару Co. Відповідно струм у головці I зростає або зменшується.

Чутливим елементом головки може бути також типовий спін-вентиль, що складається з двох шарів – шару з легко змінюваною намагніченістю (яка обертається) й шару з фіксованою намагніченістю. Магнітний момент у магнітом'якому шарі паралельний площині носія інформації, що несе магнітні домени. Магнітний момент у магнітотвердому шарі перпендикулярний до площини носія інформації. Коли головка проходить над додатною стінкою домену, магнітне поле підвищує намагніченість наноструктури. Коли головка проходить над від'ємною стінкою домену, магнітний момент зменшується. Як тільки напрямок намагніченості в «м'якому» шарі реагує на поля доменів, зміна електричного опору спін-вентильної наноструктури зчитується струмом, що проходить через цю структуру.

Такі головки дозволили отримувати дуже високі щільності запису на твердих носіях – до 100 Гбіт на квадратний дюйм.

До відкриття ефекту гігантського магнітоопору для намагнічування малих ділянок носія (режим запису) і наступного визначення напрямку намагніченості (режим зчитування) використовували індукційні котушки. Головки нового типу набагато досконаліші від індукційних, тому ємність магнітних дисків збільшилася на два порядки. Таким чином, досягнення спінтроники істотно підвищили швидкодію комп'ютерів і щільність запису інформації.

3. Енергонезалежна пам'ять на тунельному магнітоопорі

Після зміни орієнтації магнітних моментів елемент може зберігати намагніченість до нового перемикання, і тому його можна використовувати як елемент пам'яті. Такі елементи застосовуються у магнітній пам'яті *MRAM*.

Спін-залежне тунелювання забезпечує значну ефективність такої пам'яті, схематично показаної на рис. 3.25. Запам'ятовувальний пристрій з довільним порядком вибірки сформовано з двох ортогональних у площині масивів паралельних феромагнітних доріжок, розділених у просторі тонким ізолювальним шаром. Кожне перетинання доріжок діє як магнітний тунельний перехід. Коли напрямки намагніченості двох протилежних феромагнітних ділянок вирівнюються зовнішнім магнітним полем, тунельний опір стає нижчим, ніж у випадку, коли вони протилежно напрямлені. Для практичного застосування в пристроях пам'яті необхідна зміна опору принаймні на 30 %.

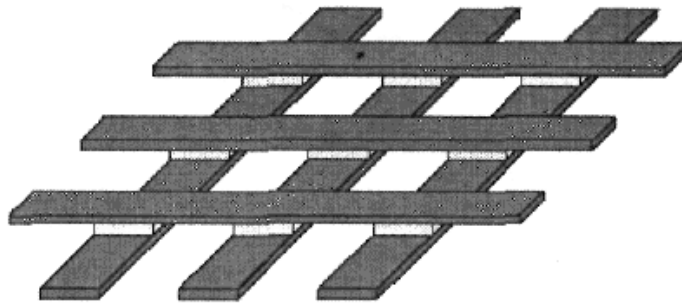


Рис. 3.25. Фрагмент запам'ятовувального пристрою з довільним порядком вибірки, побудований з елементів на тунельному магнітоопорі

4. Спін-вентильний транзистор

Цікавим приладом спінтроники є *спіновий польовий транзистор*. Принципову схему приладу показано на рис. 3.26, *а*. Це трьохелектродний прилад, аналогічний транзистору з металевою базою. Як і в традиційному польовому транзисторі, вузький канал поміщено між витокom і стоком. Над каналом розміщено третій електрод – заслін. Тут витік і стік – феромагнетики, намагнічені в одному напрямку (горизонтальні стрілки), а канал – напівпровідник з *2D* електронним газом.

Струм, що входить у канал із джерела, спін-поляризований. Якщо напруги на заслоні немає, то струм вільно проходить у стік (стан низького опору). Якщо на заслін подається напруга, то спін електронів струму прецесує (показано похилими стрілками в каналі). Підбираючи напругу на заслоні, можна регулювати змінювання орієнтації спінів електронів під час проходження каналу. Якщо в кінці каналу спіни електронів мають орієнтацію, показану на рис. 3.6.3, *а*, то електрони відбиваються від краю стоку. У цьому стані транзистор має високий опір. Таким чином, опір спінового польового транзистора може керуватися електричним полем заслона.

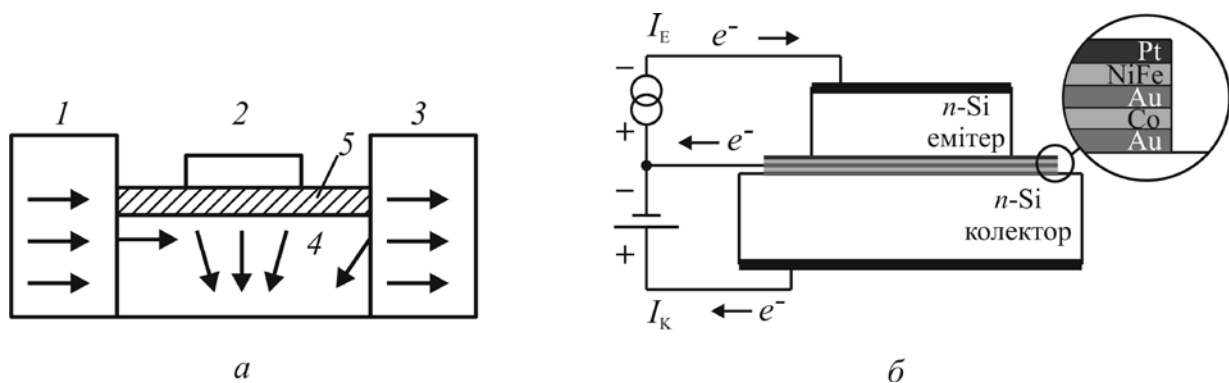


Рис. 3.26. Спін-вентильний транзистор: *а* – схематичне зображення; *б* – одна з можливих реалізацій з Si–Pt емітером, Si–Au колектором і NiFe–Au–Co спін-вентильною базою;
1 – витік, 2 – заслін, 3 – стік, 4 – канал, 5 – підзаслонний діелектрик

Варіант реалізації спін-вентильного транзистора показано на рис. 3.26, *б*. Базова область транзистора містить металевий, багатошаровий спіновий вентиль між двома областями кремнію *n*-типу провідності, що діють як емітер і колектор. У такій структурі гарячий електрон проходить через спін-вентильну базу, щоб потрапити з емітера в колектор. Базу спроектовано як обмінну м'яку спін-вентильну систему, у якій наявні два феромагнітні матеріали: NiFe і Co. Вони мають різні коерцитивні сили й розділені прошарком з немагнітного матеріалу (Au).

Шари NiFe і Co внаслідок різниці коерцитивних сил дозволяють утворювати чітко виражену паралельну й антипаралельну орієнтацію намагніченості в широкому інтервалі температур. Їх можна індивідуально перемикаєти відповідним магнітним полем. На межі поділу між металевою

базою і напівпровідниками формуються бар'єри Шотткі. Для того щоб створити бажаний високоякісний бар'єр з випрямним ефектом, і на емітерному, і колекторному боці розміщують тонкі прошарки Pt і Au. Крім того, вони відокремлюють магнітні шари від безпосереднього контакту з кремнієм. Оскільки контакт Si–Pt утворює високий бар'єр Шотткі, його використовують як емітер. Колекторний діод Шотткі формується так, що він має більш низьку висоту бар'єра порівняно з емітерним діодом. Для виготовлення такого спін-вентильного транзистора використовують спеціально розроблену методику, що включає осадження металу на дві кремнієві пластини і їх наступне з'єднання в умовах ультрависокого вакууму.

Транзистор працює таким чином. Між емітером і базою встановлюється такий струм, за якого електрони інjektуються в базу перпендикулярно до шарів спін-заслона. Інжектвані електрони мають пройти через Si–Pt бар'єр Шотткі, і тому вони входять у базу як нерівноважні гарячі електрони. Енергія гарячих електронів визначається висотою емітерного бар'єра Шотткі, що становить зазвичай 0,5–1 еВ залежно від комбінації метал–напівпровідник. Як тільки гарячі електрони перетнуть базу, вони піддаються впливу як непружного, так і пружного розсіювання, що змінює і їх енергію, і розподіл їх моментів.

Електрони тільки тоді здатні увійти у колектор, коли вони набули достатньої енергії для подолання енергетичного бар'єра колектора. Висота цього бар'єра повинна бути трохи меншою, ніж емітерного. Однаково важливо і те, щоб момент появи гарячого електрона був узгоджений з доступними станами в колекторі. Частина зібраних у колекторі електронів і, отже, струм колектора істотно залежать від розсіювання в базі, яке є спін-залежним. Це регулюється перемиканням бази з узгодженого за намагніченістю низькоомного стану в антиузгоджений високоомний стан. Повне розсіювання керується зовнішнім магнітним полем, що змінює вирівнювання двох феромагнітних шарів спін-вентилі.

Такий спін-вентильний транзистор перспективний для пристроїв магнітної пам'яті та датчиків магнітного поля.