

InGa). Саме їх часто використовують для синтезу різних гетероструктур для приладів надвисоких частот. Керуючись рис. 4.33, можна створювати гетеропереходи «на замовлення» з бажаною величиною розриву зон або квантових ям із заданою формою потенціалу.

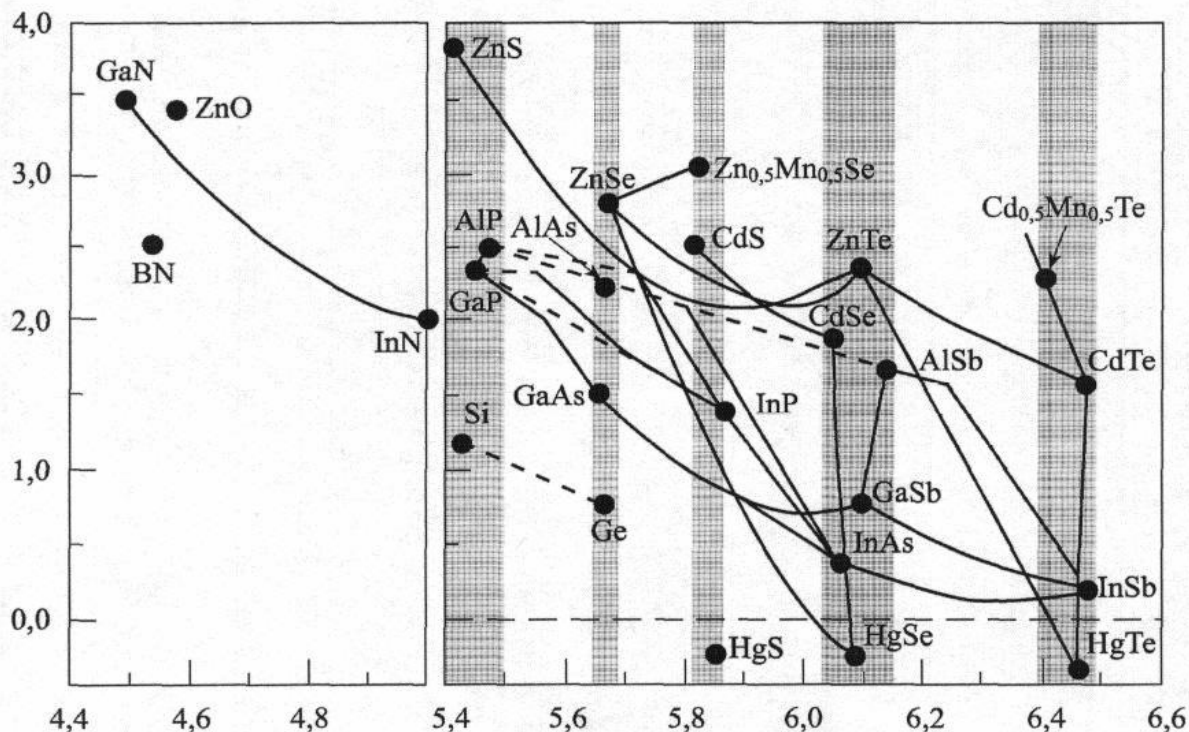


Рис. 4.33. Графік залежності енергії забороненої зони за низької температури від сталей ґраток для ряду напівпровідників зі структурою алмазу і цинкової обманки ($A^{III}B^V$)

Таким чином, напівпровідникові надґратки являють собою твердотільні структури, у яких, крім тривимірного періодичного потенціалу кристалічних ґраток, є додатковий *одновимірний потенціал*, період якого істотно перевищує постійну ґраток. Наявність такого потенціалу суттєво змінює енергетичний спектр, завдяки чому надґратки мають ряд цікавих властивостей, яких не мають звичайні напівпровідники.

Надґратки мають унікальну можливість довільно змінювати їх зонну структуру. Особливості люмінесценції надґраток (можливість перебудови випромінюваних довжин хвиль, екситонний характер випромінювання аж до кімнатних температур, велике обмеження домішкового захоплення, фемтосекундна кінетика й ін.) використовують для створення нового покоління світловипромінювальних приладів. Акустичні властивості надґраток характеризуються наявністю селективного відбиття фононів. Напівпровідникові надґратки характеризуються істотно нелінійними транспортними властивостями, обумовленими наявністю в їх енергетичному спектрі дуже вузьких мінізон.

4.7. Наномагнітні матеріали і магнітоелектроніка

Наноструктурування об'ємних магнітних матеріалів дозволяє в широких межах керувати їхніми характеристиками. Нанотехнології можна застосовувати передусім для створення матеріалів із заданим видом кривої намагнічування як для рекордно магнітом'яких матеріалів, так і для надзвичайно магнітотвердих матеріалів.

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

Таким чином, спінтроніка – напрям наноелектроніки, у якому для подання й опрацювання інформації поряд із зарядом використовують 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.

Магнітом'які наноматеріали. Зміна орієнтації магнітних ділянок під дією прикладеного ззовні магнітного поля може відбуватися як у дуже сильних полях (магнітна «твердість»), так і у вкрай слабких полях (магнітна «м'якість»). Наприклад, достатньо **магнітом'якими** є стрічки аморфного сплаву зі складом $Fe_{70}Si_{13}Nb_3Cu_9$, отримані методом швидкого охолодження розплаву, що розливається на обертовий холодний мідний барабан, складаються з 10 нм наночастинок цього сплаву. У разі великої індукції насичення (1,2 Тл) коерцитивна сила такого сплаву дуже мала (0,5 А/м).

Однією з причин підвищення «магнітом'якості» і, внаслідок цього, появи величезної магнітної проникності ($\mu \sim 5 \cdot 10^5$) є полегшена орієнтація спінових моментів електронів. У наночастинках концентрація дефектів набагато нижча (дефекти легко дифундують на поверхню), і тому орієнтація спінових моментів у зовнішньому магнітному полі



полегшується. Наномагнітний кластер може мати магнітні моменти, орієнтовані так, як показано на моделях, (рис. 4.34).

Рис. 4.34. Різна орієнтація магнітних моментів у наночастинці ферромагнетика

Під час експериментального дослідження

одного з магнітом'яких матеріалів (нанорозмірного порошку аморфних сплавів Fe₇₀Ni₁₀Co₂₀ з розміром зерен 10–15 нм) звичайний гістерезис пет-лі намагнічування не спостерігається (рис. 4.35, б), оскільки в кожному нанорозмірному зерні є тільки один домен. (У звичайних феромагнетиках гістерезис зумовлює орієнтація безлічі різних магнітних ділянок – доменів.)

Магнітні матеріали такого типу, у яких немає гістерезису, називають **суперпарамагнетиками**. Зміст цієї назви полягає в тому, що нижче від температури Кюрі й у широкому інтервалі температур вони залишаються немовби в парамагнітній фазі. У звичайному феромагнетикі або фериті спонтанна намагніченість, що виникає нижче від температури Кюрі, примусово утримує спіни в орієнтованому стані, і для зміни їх напрямку потрібно переборювати коерцитивне поле (H_c на рис. 4.35, а). При цьому виникає досить велика енергія анізотропії, що в різних феромагнетиках змушує магнітні моменти вибирати ті або інші сприятливі для них напрямки. Однак у наночастинках, через деяке порушення структурних зв'язків атомів цієї енергії немає, тому напрямки орієнтації спінів електронів стають немовби «байдужими». Це пояснюється, чому під час перемагнічування гістерезис не спостерігається.

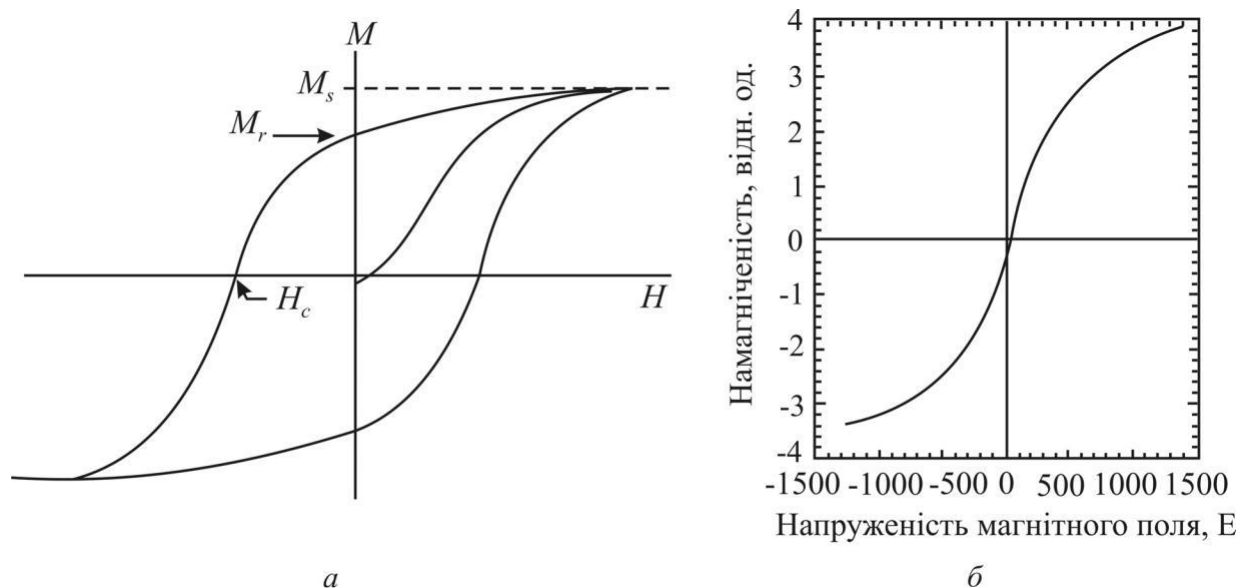


Рис. 4.35. Типовий магнітний гістерезис: а – M – намагніченість; H_c – коерцитивне поле; б – безгістерезисна крива намагнічування наноматеріалу Ni–Fe–Co

Як видно з рис. 4.36, а, «магнітом'якість» стає тим виразнішою, чим менші частинки. Однак на відміну від звичайних парамагнетиків, у яких за як завгодно низьких температур виконується закон Кюрі, для суперпарамагнетиків існує деяка обмежувальна температура, нижче за яку можливості «м'якого» безкоерцитивного орієнтування магнітних моментів припиняються (рис. 4.36, б). Причиною цього обмеження є та обставина, що орієнтація магнітних моментів «підтримується» тепловим хаотичним рухом у

кристалах, що за низької температури виявляється недостатнім. Температура, яка блокує цей рух, залежить від розміру наночастинок (рис. 4.36, б).

Магнітотверді наноматеріали. Нанотехнології дозволяють керувати коерцитивним полем і досягати великого його значення. За традиційною рецептурою сильні постійні магніти виготовляють зі сплавів неодиму, заліза і бору. У разі великої залишкової індукції (до 1,3 Тл) їх коерцитивна сила досягає 10^6 А/м, тобто стає більш ніж у мільйон разів вищою, ніж у магнітом'яких сплавах. Нанотехнологія дозволяє значно поліпшити ці дані.

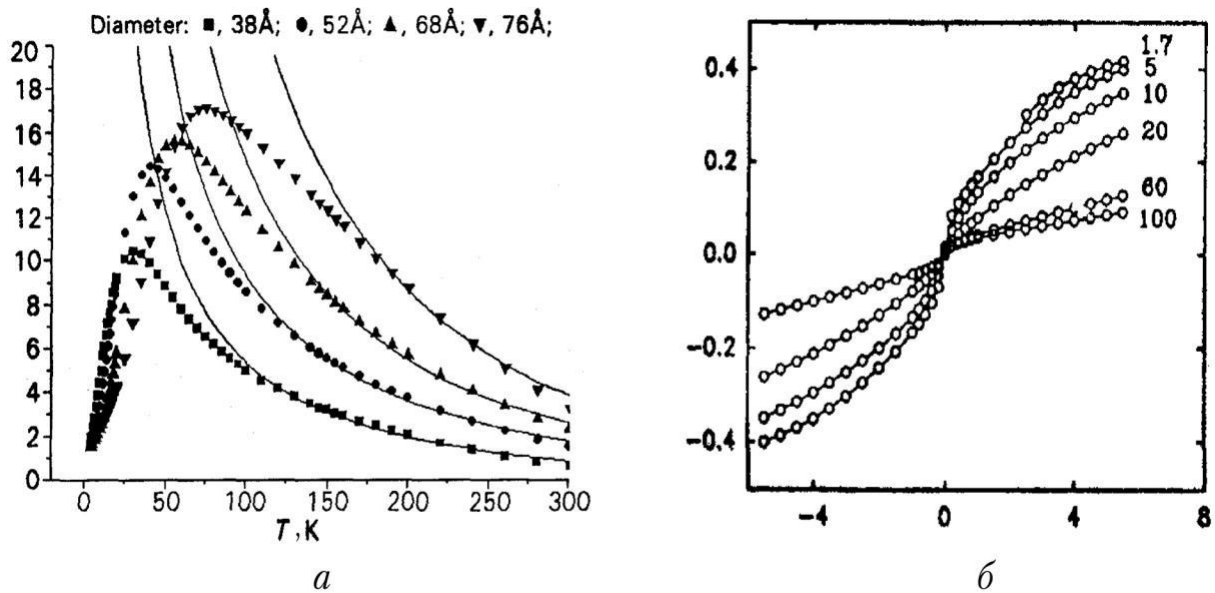


Рис. 4.36. Залежність магнітного моменту наночастинок кобальту:
 а – від напруженості магнітного поля H для частинок розмірами 1,7 – 100 нм;
 б – температурна залежність намагніченості

Результати дослідження впливу розміру наномасштабних зерен на властивості сплаву $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ подано на рис. 4.37, з якого видно, що для сполуки Nd–B–Fe залишкова намагніченість істотно зростає, якщо розмір зерна менший за 40 нм (при цьому в три рази збільшується і коерцитивне поле).

Інший підхід до зміни параметрів кривої намагнічування цього матеріалу полягає у створенні наномасштабної суміші магнітотвердих частинок $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ і магнітом'якої α -фази заліза. Дослідження впливу магнітом'яких частинок заліза, змішаних з магнітотвердою речовиною, підтверджують, що коерцитивне поле таким способом можна

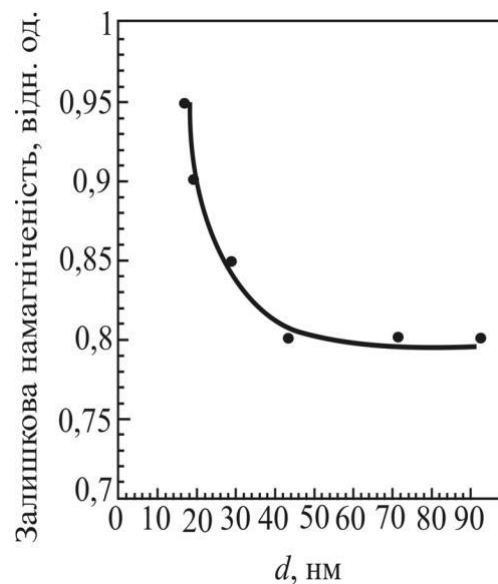


Рис. 4.37. Залежність залишкової намагніченості M_r від розміру d частинок, що складають Nd-B-Fe постійний магніт

ще збільшити. Це відбувається внаслідок обмінної взаємодії між твердими і м'якими наночастинками, що орієнтує вектори намагніченості частинок м'якої фази в напрямку намагніченості частинок твердої фази.

Таким чином, зменшуючи розмір наночастинок зернистого магнітного матеріалу, можна істотно поліпшити якість виготовлених з нього постійних магнітів.

Наномагнітні плівки в пристроях пам'яті ЕОМ. Вивчення магнітних матеріалів, переважно плівок, виготовлених за нанотехнологіями, має на меті збільшити ємність магнітних нагромаджувачів інформації, таких, як тверді диски комп'ютерів. У механізмі зберігання інформації використано намагнічування у визначеному напрямку дуже малої ділянки магнітного носія, яку називають *бітом*. Для досягнення щільності 10 Гбіт (10^{10} біт) на квадратний дюйм окремий біт має займати місце довжиною 70 нм і шириною 1 мкм. Товщина магнітної плівки має становити близько 30 нм.

Магнітні пристрої зберігання інформації, такі як тверді диски, ґрунтуються на застосуванні дрібних кристаликів зі сплаву хрому і кобальту. Одна з проблем, що виникають за розмірів біта менших ніж 10 нм, є «самоستيرання» пам'яті через те, що вектор намагніченості в намагніченому мікроб'ємі може змінити напрямок під дією теплових флуктуацій. Розв'язання цієї проблеми потребує використання нанорозмірних зерен з великими значеннями намагніченості насичення, що характеризуються більш сильною взаємодією між зернами.

Наприклад, за допомогою нанотехнології були отримані магнітні нанозерна сполуки FePt з набагато більшим значенням намагніченості, ніж в аналогах. Частинок FePt утворювалися внаслідок нагрівання розчину ацетилацетонату платини і карбонілу заліза з додаванням відновника. Після розпилення розчину на підкладку він випаровувався, залишаючи на ній пасивовані частинки. Тонка плівка, утворена в результаті цієї операції, складається з твердого вуглецевого шару, що містить частинки FePt розміром близько 3 нм. Такий розмір магнітних наночастинок може забезпечити щільність запису 150 Гбайт на квадратний дюйм, тобто в 10 разів більшу, ніж у більшості комерційно доступних носіїв.

Коли розміри магнітних наночастинок стають надто малими, магнітні вектори атомів за наявності зовнішнього магнітного поля орієнтуються однаково в межах зерна (див. рис. 4.34, *a*), усуваючи складності, що в інших випадках їх створюють спільні доменні стінки і ділянки з різними напрямками намагніченості. Це зумовлено особливостями нанокластерів – зниження концентрації дефектів структури всередині кластера (дефекти, зумовлені технологією, легко дифундують на поверхню).

Зазвичай в магнітних носіях використовують витягнуті магнітні зерна. Динамічні властивості поведінки системи витягнутих нанорозмірних магнітних частинок описуються моделлю, у якій передбачається, що без магнітного поля еліпсоїдальні зерна мають тільки два можливі стійкі напрямки магнітного моменту: «вгору» або «вниз» відносно довгої осі магнітної частинки, як показано на рис. 4.38. Залежність магнітної енергії від орієнтації вектора магнітного моменту являє собою симетричну потенціальну яму з двома мінімумами, розділеними потенціальним бар'єром. Під дією теплової флуктуації частинка може поміняти орієнтацію магнітного вектора.

Частинка також може (але з набагато меншою імовірністю) змінити свою магнітну орієнтацію за допомогою квантовомеханічного тунелювання. Це може спостерігатися, коли теплова енергія $k_B T$ набагато менша від висоти бар'єра. Тунелювання – чисто квантовомеханічний ефект. Розв'язанням хвильового рівняння системи є невелика ймовірність зміни напрямку магнітного стану «вгору» на напрямок «вниз». У зовнішньому магнітному полі потенціал змінюється так, як це показано на рис. 4.38 пунктирною лінією, і в разі досягнення полем значення, що дорівнює коерцитивній силі, один з рівнів стає нестійким.

Наведена модель дає просте пояснення багатьох магнітних властивостей малих магнітних частинок, наприклад, формі петлі гістерезису. Однак така модель має обмеження. У ній переоцінено величину коерцитивного поля, оскільки можливий тільки один спосіб переорієнтації. Магнітна енергія частинок у моделі є функцією колективної орієнтації спінів магнітних атомів, що складають частинку, і орієнтації магнітного моменту без зовнішнього магнітного поля. В моделі припускається найпростіша (лінійна) залежність магнітної енергії ча-

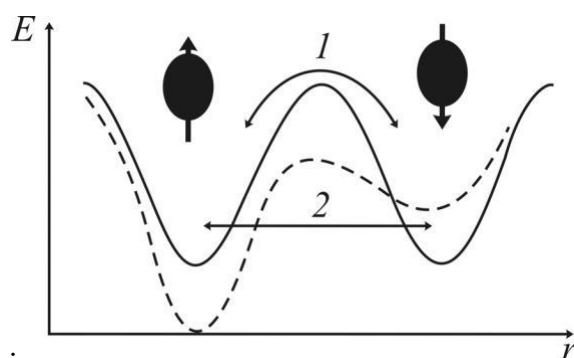


Рис. 4.38. Схема потенціалу подвійної ями; залежність енергії від орієнтації магнітного моменту без магнітного поля (суцільна лінія) і за його наявності (переривчаста лінія):
1 – термічний перехід;
2 – тунельний

стинок від їх об'єму. Однак, коли розмір частинок наближається до 6 нм, більшість атомів перебувають на поверхні. Це означає, що вони можуть мати такі магнітні властивості, які сильно відрізняються від параметрів великих частинок. Показано, що обробка поверхні наночастинок магнітом'якого α -заліза довжиною 600 нм і шириною 100 нм різними хімічними речовинами приводить до зміни коерцитивної сили до 50 %, що свідчить про **важливу роль поверхні** нанорозмірних магнітних частинок у формуванні магнітних властивос-

тей зерна. Таким чином, динамічне поведіння дуже малих магнітних частинок виявляється більш складним, ніж випливає з розглянутої моделі.

Магнітні частинки в нанопорах. Напрямом досліджень у наномагнетизмі є створення матеріалів шляхом заповнення пористих субстанцій магнітними наночастинками. У природі існують матеріали з молекулярними порожнинами, заповненими нанорозмірними магнітними частинками. Наприклад, феритин – біологічна молекула, що містить 25 % заліза за масою й у формі, що складається із симетричної білкової оболонки, порожньої сфери з внутрішнім діаметром 7,5 нм і зовнішнім діаметром 12,5 нм. Ця молекула в біологічних системах відіграє роль «сховища» заліза Fe^{3+} в організмі. Одна чверть заліза, що наявна в тілі людини, міститься в молекулах феритину, а 70 % – у гемоглобіні.

Порожнина феритину в нормальних умовах заповнена квазікристалічним оксидом заліза $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Оксид заліза з навколишнього розчину може попадати в порожнину молекули, у якій кількість атомів заліза може змінюватися від декількох одиниць до декількох тисяч. Магнітні властивості молекули залежать від кількості й типу частинок у порожнині. Вона може бути як феромагнітною, так і антиферомагнітною.

За дуже низьких температур у феритині спостерігається квантове тунелювання (рис. 4.38). Тоді навіть у разі нульового постійного магнітного поля і температури 0,2 К намагніченість когерентно тунелює між двома мінімумами.

Ефект тунелювання характеризується резонансною лінією в частотній залежності магнітної сприйнятливості. Результати вимірювання резонансної частоти магнітної сприйнятливості залежно від кількості атомів заліза в кожній молекулі показано на рис. 4.39, б. Видно, що частота зменшується з $3 \cdot 10^8$ Гц для 800 атомів до 10^6 Гц для 4600 атомів у кластері. За наявності зовнішнього магнітного поля резонанс зникає, оскільки симетрія подвійної потенціальної ями (див. рис. 4.38) порушується.

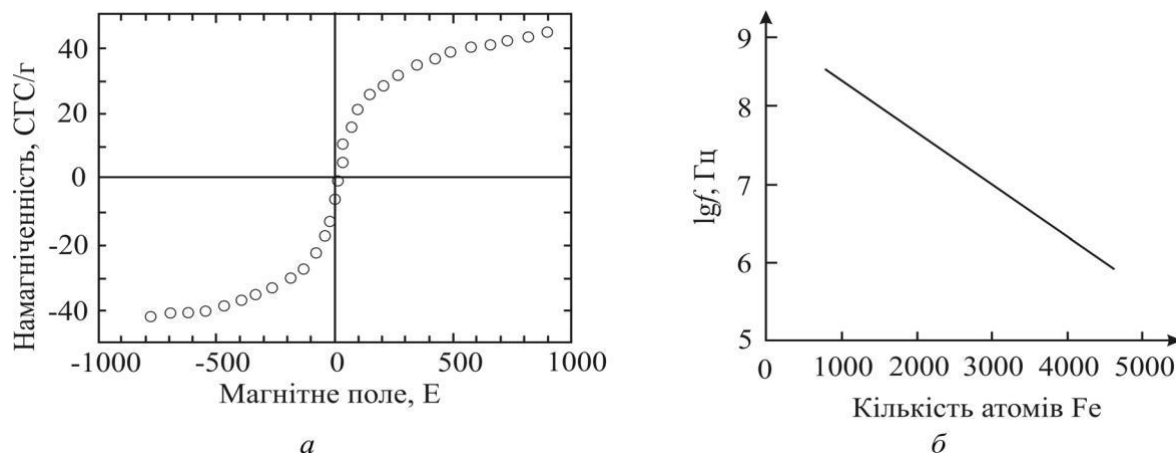


Рис. 4.39. Магнітні властивості феритину: а – крива намагнічування; б – залежність резонансної частоти від кількості атомів заліза в порожнині молекули

Гігантський і колосальний магнітоопір. Магнітоопором називається ефект, зумовлений зміною електричної провідності твердого тіла у разі поміщення його в магнітне поле. У металах і напівпровідниках це явище давно відоме і пояснюється тим, що електрони провідності в магнітному полі ма-ють рухатися по спіральних траєкторіях. У звичайних металах ефект магні-тоопору невеликий – опір змінюється до часток відсотка.

Ефект магнітоопору стає помітним лише у сильних магнітних полях і за низьких температур, коли траєкторія електрона істотно спотворюється *на до-вжині вільного пробігу* (середній відстані, на яку зміщується електрон у металі під дією електричного поля між двома зіткненнями з атомами кристалічної ґратки, з дефектами структури або атомами домішки). Електричний опір виникає внаслідок розсіювання електронів під час таких зіткнень, оскільки напрямок їх руху після зіткнення змінюється. У немагнітних провідниках, таких як мідь або золото, ефект магнітоопору дуже малий. Через потребу прикладення сильних полів і забезпечення низької температури магнітоопір у металах мало використовується на практиці.

Однак у феромагнітних матеріалах ефект магнітоопору досягає вже декількох відсотків. Річ у тім, що у феромагнетику без дії зовнішнього магнітного поля утворюються магнітні домени, всередині яких магнітні моменти однако-во напрямлені. У разі прикладення магнітного поля, значення якого для кожного матеріалу індивідуальне, ці мікроскопічні магнітні домени зникають, і весь зразок феромагнетику перетворюється в єдиний домен, тобто цілком на-магнічується. При цьому електроопір магнітних матеріалів залежить від кута між магнітним полем і струмом. Це явище назвали *анізотропним магніто-опором*. Незважаючи на порівняно малу величину цього ефекту, його все ж використовують у приладах для вимірювання магнітних, електричних, механічних й інших фізичних величин, у системах автоматизації і сигналізації, у засобах зберігання інформації.

Недавно ситуація кардинально змінилася через відкриття гігантського магнітоопору в матеріалах, штучно створених методом осадження на підкладку прошарків феромагнітного і неферомагнітного металів нанометрової товщини. Схему цієї шаруватої структури і напрямки орієнтації вектора намагніченості феромагнітних прошарків показано на рис. 4.40, *a*.

Ефект гігантського магнітоопору вперше спостерігався на плівках, у яких чергувалися прошарки заліза і хрому, але потім були виявлені й інші можливі комбінації прошарків, що складають плівку. Так, у шаруватих плівках, складених із прошарків кобальту й міді, магнітоопір набагато більший, ніж у Fe-Cr.

Найпростіший пристрій може складатися з двох паралельно розташованих феромагнітних прошарків, причому електричний опір залежить від відносної орієнтації спінів у магнітних прошарках. Якщо у феромагнітних прошарках результуючі магнітні моменти напрямлені однаково, то пристрій має малий опір.

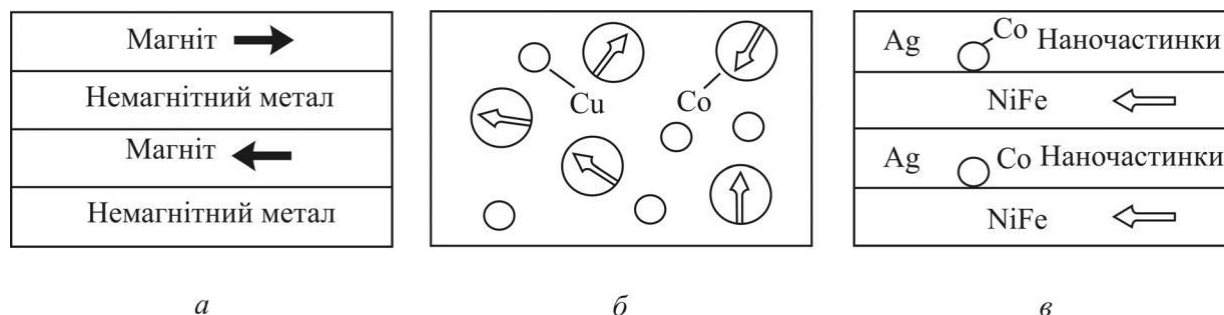


Рис. 4.40. Три структури, у яких спостерігається гігантський магнітоопір: *a* – прошарки немагнітного матеріалу з феромагнітними прошарками, що намагнічені в протилежних напрямках (напрямок намагніченості показано стрілками); *б* – випадково орієнтовані феромагнітні наночастинки кобальту (великі кружки) у немагнітній мідній матриці (маленькі кружки); *в* – змішана система, що складається зі срібних прошарків з наночастинками кобальту і магнітних прошарків зі сплаву Ni-Fe та протилежних напрямків намагніченості (показано стрілками)

Якщо ж магнітні моменти антипаралельні, то опір різко зростає (антиферомагнетизм характеризується ефектом величезного зниження провідності в зв'язку з *антиполярною* орієнтацією спінів). Електричний струм може протікати як перпендикулярно, так і паралельно шарам. В обох випадках зміна опору виявляється досить великою (–40 %) і може регулюватися зміною магнітних моментів у феромагнітних прошарках.

Уплив постійного магнітного поля на опір багатошарової системи залізо–хром показано на рис. 4.41, *a*. Величина зміни опору залежить від товщини шарів заліза і досягає максимуму за товщини 7 нм, як показано на рис. 4.41, *б*. Ефект виникає через залежність розсіювання електронів від напрямку їх спіну відносно вектора намагніченості. Електрони, спін яких напрямлений протилежно напрямку намагніченості B , розсіюються інтенсивніше, ніж ті електрони, спін яких напрямлений однаково з B . Додаток постійного магнітного поля уздовж шарів орієнтує вектори намагніченості у всіх шарах в одному напрямку. Електрони провідності, спін яких напрямлений убік або протилежно намагніченості, розсіюються на межі метал–феромагнетик інтенсивніше, ніж електрони зі спіном, орієнтованим у напрямку намагніченості. Канал з меншим опором визначає повний опір плівки, оскільки обидва канали працюють паралельно.

Ефект магнітоопору в шаруватих матеріалах – чутливий детектор постійного магнітного поля і основа для створення нових високочутливих головок для магнітних дисків, що зчитують інформацію. До відкриття цього ефе-

кту пристрої магнітного зберігання інформації використовували індукційні обмотки як для намагнічування малої ділянки носія у визначеному напрямку (режим запису), так і для визначення напрямку намагніченості (режим зчитування інформації). Магніторезистивні головки зчитування істотно досконаліші, ніж індукційні, але не можуть записувати інформацію.

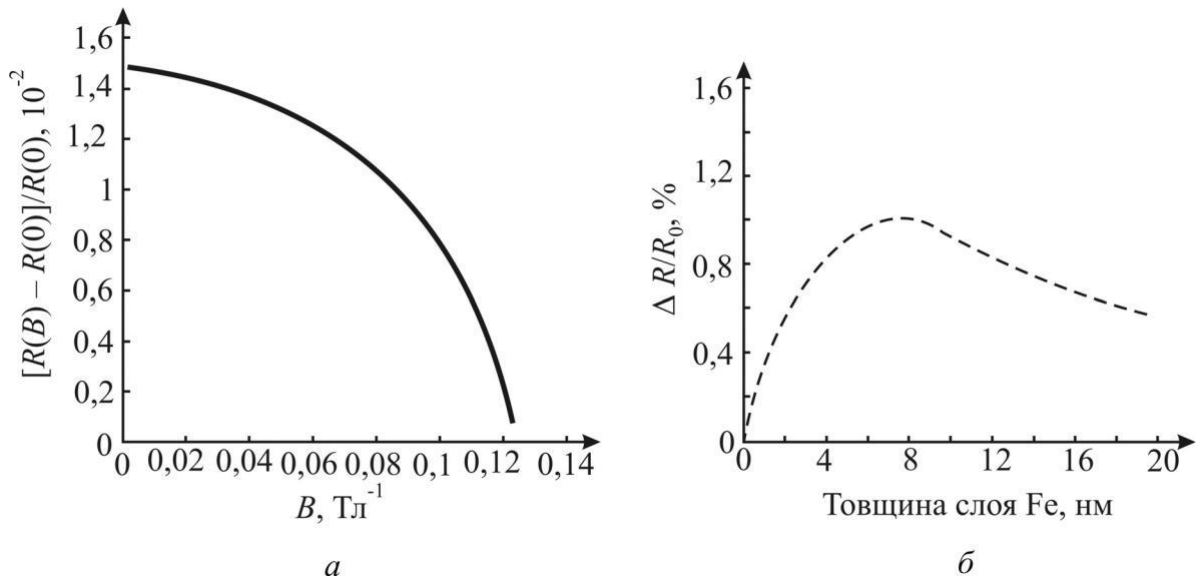


Рис. 4.41. Залежність магнітоопору багат шарової структури Fe–Cr:
a – від магнітного поля, прикладеного паралельно поверхні шарів;
б – від товщини магнітного шару заліза у постійному магнітному полі

Матеріали, що складаються з однодомених феромагнітних наночастинок з випадково орієнтованим вектором намагніченості, що містяться в немагнітній матриці, також характеризуються гігантським магнітоопром. Схему такої системи показано на рис. 4.40, *б*. На відміну від шаруватих структур магнітоопір в цій системі є ізотропним. Якщо помістити її в магнітне поле, вектори намагніченості феромагнітних наночастинок орієнтуюватимуться по полю, що зменшує електричний опір. Вплив магнітного поля на опір збільшується у разі збільшення напруженості поля і зменшення розмірів магнітних частинок. На рис. 4.42, *а* показано типові результати вимірювань на плівці, що складається з наночастинок кобальту в мідній матриці за температури 100 К. Гібридні системи, що складаються з наночастинок у металевій матриці, розташованій між двома феромагнітними прошарками (рис. 4.40, *в*), демонструють аналогічні магніторезистивні властивості.

Ефект гігантського магнітоопору набув застосування не тільки в головках твердих дисків. На основі цих структур виготовлено цілий ряд сенсорів, перемикачів і невзаємних пристроїв – вентилів-ізоляторів. Низька вартість і мале енергоспоживання забезпечують високу конкурентоспроможність цих приладів. Магнітні запам'ятовувальні пристрої на основі приладів з гігантським ма-

гнітоопором можуть конкурувати з традиційними напівпровідниковими запам'ятовувальними пристроями за щільністю інтеграції, швидкості й вартості.

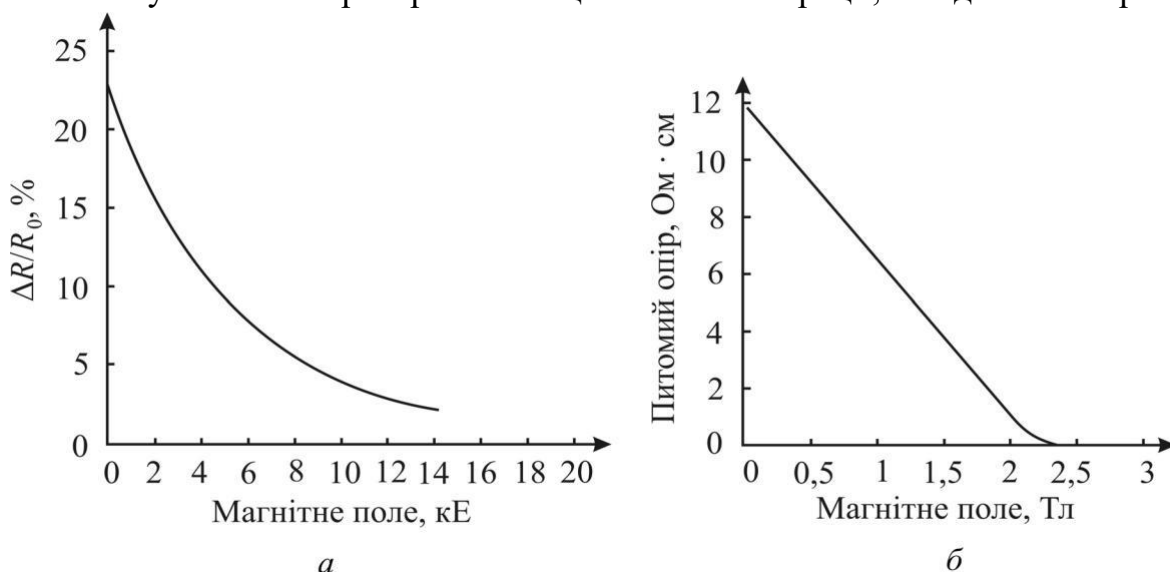


Рис. 4.42. Залежність зміни магнітоопору від прикладеного магнітного поля:
 а – для тонкої плівки наночастинок кобальту в мідній матриці;
 б – для складу La–Ca–Mn–O в околі точки Кюрі (250 К)

Існують матеріали із ще більшим значенням магнітоопору, ніж у розглянутих системах; через таку їх здатність вживають термін «*колосальний магнітоопір*». Ці матеріали також мають багато можливостей для застосування, наприклад, у записувальних магнітних головках або в чутливих елементах магнітометрів. Це матеріали зі структурою типу перовскіту, наприклад, LaMnO_3 , де марганець, як і лантан, має валентність +3. Якщо La^{+3} частково замінити двовалентними іонами, наприклад Ca, Ba, Sr, Pb або Cd, то для збереження електронейтральності деякі іони марганцю змінюють стан із Mn^{+3} на Mn^{+4} . У результаті утворюється система зі змішаною валентністю $\text{Mn}^{+3}/\text{Mn}^{+4}$, у якій наявна значна кількість рухливих носіїв заряду. Виявлено, що така система демонструє надзвичайно великий магнітоопір. Наприклад, опір системи $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_x$ в постійному магнітному полі 6 Тл змінюється більш, ніж у тисячу разів. Залежність питомого опору тонкої плівки цього матеріалу від прикладеного постійного магнітного поля показано на рис. 4.43, б.

Щодо практичного застосування ефектів у нанорозмірних прошарках магнітного і немагнітного металів треба зазначити, що опір може змінюватися до 100 %, що значно більше, ніж звичайний магнітоопор у таких самих умовах. Для практичних застосувань використовують як магнітом'який, так і магнітотвердий матеріал для того, щоб під дією зовнішнього магнітного поля змінював напрямок намагніченості тільки один з них. Принцип зчитування інформації з магнітного диска з використанням ефекту гігантського магнітоопору показано на рис. 4.43.

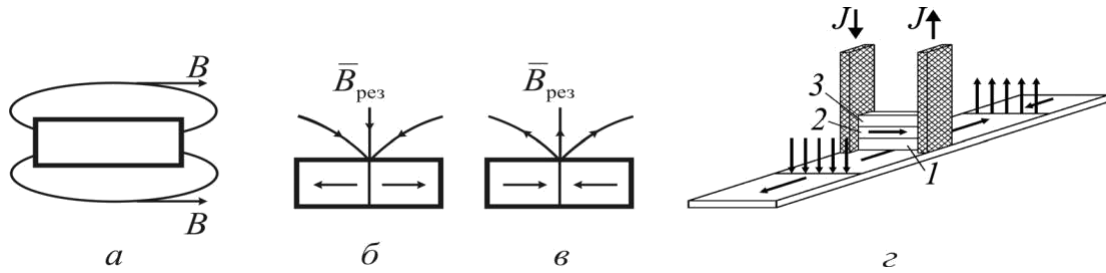


Рис. 4.43. Принцип зчитування: *a* – напрямок ліній вектора магнітної індукції одного домену; *б, в* – індукція на межі двох доменів; *г* – схематичне зображення головки, що зчитує інформацію з магнітного носія

Цифрова інформація (у вигляді бітів) зберігається на магнітних дисках або стрічках у вигляді доменів. Лінії вектора індукції магнітного поля B одиночного домену показано на рис. 4.43, *a*. Під час записування намагніченість кожного домену реалізується один із двох напрямків (наприклад, $\leftarrow \rightarrow$ на рис. 4.43, *б*, або $\rightarrow \leftarrow$ на рис. 4.43, *в*). Якщо перший напрямок ототожити з нулем, то другий буде позначати «одиницю». Магнітне поле домену майже не виходить за межі внутрішньої ділянки домену, за винятком ділянок поблизу полюсів. Результуюча індукція $B_{\text{рез}}$ зчитується головкою. Для різних матеріалів ділянка міждоменної стінки становить від десяти до декількох десятків нанометрів.

На рис. 4.43, *г* зображено схему головки, що зчитує інформацію, записану на магнітній стрічці: *1* – шар NiFe, *2* – прошарок Си (2 нм) і *3* – шар Со (2,5 нм). Стрілки на стрічці позначають напрямок намагніченості доменів. Намагніченість шару Со (магнітотвердого матеріалу) напрямлена стабільно перпендикулярно до площини стрічки, наприклад, угору. Намагніченість магнітом'якого шару NiFe набуває напрямку $B_{\text{рез}}$ на кожному стикку $\uparrow\uparrow$ або $\downarrow\downarrow$ відносно шару Со. Відповідно струм у головці J підвищується або зменшується.

До відкриття ефекту гігантського магнітоопору намагнічування малих ділянок носія (режим записування) і подальшого визначення напрямку намагніченості (режим зчитування) використовувалися індукційні котушки. Головки нового типу набагато досконаліші від індукційних, тому ємність магнітних дисків збільшилась на два порядки.

Після зміни намагнічування магнітний елемент зберігає намагніченість до наступної зміни, тому його можна використовувати як елемент пам'яті. Такі елементи застосовують у магнітній пам'яті MRAM. Розвиток спінтроники має істотно підвищити швидкодію комп'ютерів і щільність записування інформації.

Тунельний магнітоопір. Це ефект спін-залежного тунелювання електронів через нанометровий прошарок діелектрика або напівпровідника, поміщений між двома ферромагнетиками. Ця структура має такий самий вигляд, як на рис. 4.40, *a, б*, але замість шару міді використано шар діелектри-

ка (Al_2O_3) або напівпровідника. Як і у випадку гігантського магнітоопору, електрони тунелюють, створюючи струм, що тече з одного феромагнетика в інший, якщо їх намагніченості паралельні. Якщо намагніченості феромагнетиків антипаралельні, то ймовірність тунелювання різко зменшується, а отже, струм через структуру різко падає, тобто істотно збільшується її опір (~30% за кімнатної температури). Це дозволяє використовувати розглянутий ефект у приладових структурах. Як і у випадку гігантського магнітоопору застосовують м'який і твердий феромагнетики.

Стан намагніченості зберігається до нового перемикання, тому магнітний перехід можна використовувати як носій одного біта інформації в електронній пам'яті. Основою ефекту тунельного магнітоопору є розроблення пам'яті ЕОМ. Такі пристрої ґрунтуються на досить слабких струмах, тому вони мають низьке енергоспоживання. Недоліком є те, що в них струми напрямлені перпендикулярно до шарів. Тому зі зменшенням площі шарів загальний електричний опір приладу зростає.

Напівпровідникова спінтроніка. Хоча вже і створено пристрої на основі ефектів гігантського магнітного опору і тунельного магнітного опору, але ці пристрої працюють на металах, у той час, як сучасні технології орієнтовані на напівпровідники. Розроблено ряд інших спінтронних пристроїв, що потребують спін-поляризованого струму, але створити ефективну інжекцію з феромагнітного металу в напівпровідник дуже трудно. Тому важливе значення має розроблення напівпровідникової спінтроніки, сумісної із сучасною технологією чипів.

Для напівпровідникової спінтроніки необхідні матеріали нового типу – магнітні напівпровідники. Виявлено, що феромагнітні властивості можна додати сполукам $A^{III}B^V$ і $A^{II}B^{VI}$ за допомогою легування їх іонами заліза, кобальту, марганцю. Однак технологія легування досить складна через низькі межі розчинності таких домішок у кристалах $A^{III}B^V$ і $A^{II}B^{VI}$. Крім того, задовільні характеристики такі матеріали мають лише за низьких температур. Тому розробляють і досліджують властивості нових магнітних напівпровідників. Створено матеріали з робочою температурою, що вища за кімнатну (наприклад, GaMn, GaCr і ін.).

У сучасних інформаційних технологіях опрацювання й обчислення інформації використовуються інтегральні мікроелектронні схеми, а зберігається інформація на магнітних дисках. Застосування магнітних напівпровідників дало б змогу розміщувати процесори і пам'ять на одному чипі, вилучивши порівняно повільні канали «введення – виведення» інформації, що значно підвищило б швидкодію. Ще одна перевага – магнітні напівпровід-

ники здатні сприймати і підсилювати оптичні сигнали, що дозволяє прямо перетворювати інформацію з оптичного подання в електронне без процесу детектування.

Цікавим приладом спінтроники є *спіновий польовий транзистор*. Схему приладу показано на рис. 4.44. Як і в традиційному польовому транзисторі, вузький канал 2 поміщено між джерелом 1 і стоком 3. Над каналом розташовано третій електрод – затвор. Тут витік і стік – феромагнетики, на-магнічені в одному напрямку (показано горизонтальними стрілками), канал – напівпровідник з 2D-електронним газом.

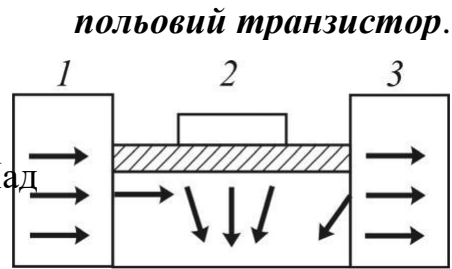


Рис. 4.44. Схематичне зображення спінового польового транзистора

Струм, що входить у канал із джерела, спін-поляризований. Якщо напруги на затворі немає, струм вільно надходить у стік (стан низького опору). Якщо на затвор подано напругу, спін електронів струму прецесує (показано нахиленими стрілками в каналі). Підбираючи напругу на затворі, можна регулювати величину зміни орієнтації спіну електронів під час проходження каналу. Якщо в кінці каналу спіни електронів мають орієнтацію, показану на рис. 4.44, то електрони відхиляються від межі стоку. У цьому стані транзистор має високий опір. Таким чином, опір спінового польового транзистора може керуватися електричним полем затвора.

4.8. Молекулярна електроніка (молетроніка)

У молекулярній електроніці виокремлюють два основні напрями: макромолекулярну електроніку, або *органічну електроніку* та мікромолекулярну електроніку, або просто *молекулярну електроніку* (молетроніка).

Макромолекулярна електроніка. Як елементи електронних схем тонкі (20 – 200 нм) плівки в макромолекулярній електроніці використовують *органічні матеріали*. Площина плівок у різних пристроях може становити від декількох квадратних мікрометрів (у транзисторах) до декількох квадратних сантиметрів (у фотоелементах). Найчастіше використовують різні полімери. У них поєднано багато електричних і оптичних властивостей діелектриків, напівпровідників і металів із властивою полімерам легкістю, пластичністю, більш простою і дешевою технологією.

За допомогою легування електропровідність полімерів може змінюватися від малої електропровідності (діелектриків) до надто великої електропровідності (високопровідних металів). *Провідні полімери* застосовують у мембранах гучномовців, для антистатичних покриттів (зокрема, для комп'ютерних

дисків *Hitachi*) можна використовувати для захисту від електромагнітного ви-промінювання, а також у літографії як компоненти резистів.

Полімери (наприклад, поліанілінові) мають здатність легуватися електрохімічним способом. На їх основі виробляють легкі акумуляторні батареї. Їх електрорушійна сила приблизно така сама, як і свинцевих батарей, але густина струму все ж на порядок менша.

Нелеговані полімери – це зазвичай діелектрики, але іноді мають властивості напівпровідників. Різні полімери можуть мати як донорні, так і акцепторні властивості. На основі напівпровідникових полімерів за допомогою простої і дешевої технології були створені полімерні транзистори. Компанія *Philips* уже виготовила цілком полімерний чип площею 27 мм^2 з розміром елементів близько 5 мкм.

Однак полімерні транзистори мають низьку рухливість носіїв заряду і непридатні для застосування на частотах понад 100 кГц. Тому полімерні інтегральні мікросхеми не можна використовувати в комп'ютерах (через низьку швидкість опрацювання інформації), але їх застосовують у кодових замках, електронних ярликах тощо, де з успіхом можуть замінити кремнієві мікросхеми.

Дедалі більше полімери застосовують в оптоелектроніці (цю галузь називають *органічною оптоелектронікою*). Тут використовують нелеговані або слабологовані полімери. Натепер створено цілком полімерні фотодіоди і сонячні елементи на полімерних *p-n* переходах з досить високим коефіцієнтом корисної дії.

Перспективна, що швидко розвивається, галузь – *органічні світлодіоди*. Метою багатьох розробок є створення дешевих джерел освітлення, кольорових плоских дисплеїв і самих органічних світлодіодів. Ефективність органічних перетворювачів електричної енергії у світлову досягає рівня кращих неорганічних приладів. Перевагами органічних світлодіодів є низька вартість і можливість створювати великі поверхні, що потрібно, наприклад, для висвітлення панелей і стін. Органічні світлодіоди можна застосовувати у плоских кольорових дисплеях, які мають бути тоншими і дешевшими, ніж рідкокристалічні. Уже розроблено світлові дорожні знаки, а також застосовні в різних приладах плоскі дисплеї. Розробляють і телевізійні плоскі екрани.

Принцип роботи органічного світлодіода дуже простий. Прилад складається з електропровідного полімеру як одного електрода, напівпровідникового полімеру в центрі і другого електрода (металевого). Якщо напруга подається на структуру, негативний металевий електрод інjektує у середній прошарок електрони, а позитивний електрод – у дірки. Під час рекомбінації цих зарядів генерується випромінювання. Ефективність перетворення

електричної енергії у світлову становить 4 – 20 %, що можна порівняти з параметрами кристалічних світлодіодів. Полімерні світлодіоди можна виробляти швидко, дешево й у великих кількостях.

Мікромолекулярна електроніка. Як елементи мікроелектронних схем можна використовувати окремі органічні молекули або навіть їхні фрагменти. Ідеї молекулярної електроніки – *молетроніки* – виникли ще в 70-ті роки минулого століття, але дотепер багато технологічних труднощів ще не переборені.

Теоретично було показано, що різні молекули можуть не тільки бути ізоляторами, але й проводити струм, а також діяти як діоди, елементи пам'яті і навіть транзистори. Однак експерименти з окремими молекулами в минулі роки були надзвичайно важкими. Тільки в останні роки інтерес до молекулярних пристроїв стрімко зріс, оскільки, наближається мініатюризації технологія інтегральних мікросхем на кремнії, тому ведеться пошук нових рішень, що сприяли б прогресу мікроелектроніки. По-друге, з'явилися нові експериментальні засоби в нанотехнологіях, що дають змогу як оперувати окремими молекулами, так і створювати до них контакти.

Уперше ідея використовувати органічні молекули як елементну базу мікроелектроніки виникла в 1974 р., коли провідні вчені фірми ІВМ А. Авірам і М. Ратнер запропонували модель випрямляча (діода), що складається з однієї органічної молекули. Дві половинки цієї молекули мають протилежні властивості стосовно електрона: одна може тільки віддавати електрон (донор), а друга – тільки приймати електрон (акцептор). Якщо помістити таку асиметричну молекулу між двома металевими електродами, то вся система проводитиме струм тільки в одному напрямку.

Інтерес до молекулярної електроніки зумовлено перспективами використання окремих молекул як базових елементів електронних схем. Виникає реальна можливість створення тривимірних схем з надвисокою щільністю елементів, надзвичайно високою швидкодією та низьким енергоспоживанням.

Основні труднощі використання окремих молекул – створення відповідної схемотехніки. Молекулярні пристрої мають являти собою складні розгалуження, що складаються з різних атомних угруповань. Методів синтезу таких пристроїв поки не розроблено.

У світі натеper функціонують понад десять науково-технологічних центрів, що займаються розробленням пристроїв молекулярної електроніки. Щорічно проводяться конференції, у яких беруть участь сотні фахівців. Фінансування розробок за кордоном співрозмірне з витратами в галузі традиційних технологій мікроелектроніки. Головні зусилля розробників спрямовані на створення молекулярного комп'ютера.

Існує багато видів *молекул – провідників струму*. Роль таких провідників щонайкраще виконують довгі ланцюжкові молекули з послідовними одинарними і подвійними (або потрійними) зв'язками вуглецю. Два приклади таких молекул – полієну (C_nH_{n+2}) і поліфеніленетинілену показано на рис. 4.45.

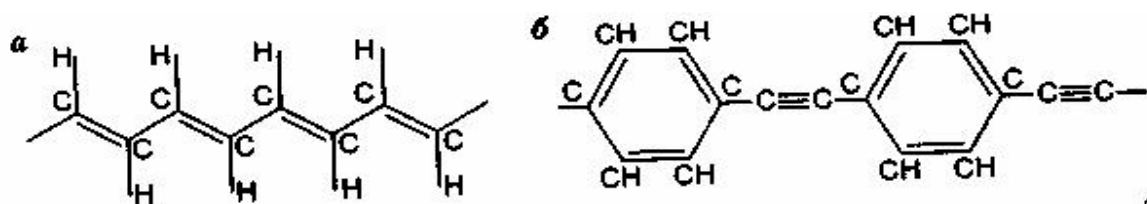


Рис. 4.45. Структура молекул полієну (а) і поліфеніленетинілену (б)

У таких молекулах «зовнішні», молекулярні (розташовані на π -орбіталі) електрони атомів вуглецю вільно поширюються по всій молекулі. Це – делокалізовані орбіталі, що забезпечують можливість перенесення електронів про-відності вздовж усієї молекули. Молекул з *електроізоляційними* властивостями дуже багато (наприклад, алкани C_nH_{2n+2} .) У них зв'язки С–С і С–Н утворені локалізованими σ -орбіталями.

Знайдено багато молекул, що можуть виконувати ролі діодів, транзисторів, перемикачів і логічних елементів (рис. 4.46 – 4.48). За допомогою таких молекул можна розробляти молекулярні інтегральні схеми.

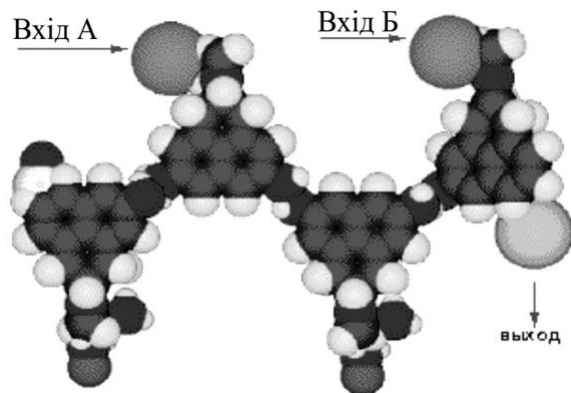


Рис. 4.46. Молекулярний логічний елемент «НІ – І» з двома входами. (Електрон буде проходити через молекулярний ланцюжок тільки в ті моменти, коли сигналу на обох входах немає)

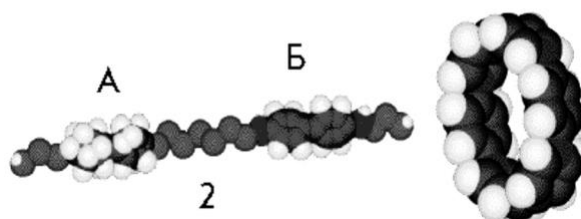


Рис. 4.47. Логічний елемент на основі молекул ротаксану: 1 – циклічний компонент, або «бусина»; 2 – лінійний компонент, або «нитка».

У робочому положенні «бусина» нанизана на «нитку». Елемент перемикається за рахунок переміщення «бусини» з положення А в положення Б (і назад)

Розмір молекулярного транзистора становить близько 1 нм. Якщо створити інтегральну схему з 10^9 таких транзисторів, то вона буде розміром з піщину. При цьому її продуктивність підвищиться в $10^2 - 10^3$ разів, а енергоспоживання зменшиться до досить малих величин.

Важливим кроком у розвитку молекулярної схемотехніки стала відмова

від простого копіювання напівпровідникових схем із заміною в них звичайних транзисторів на молекулярні. Річ у тім, що існує безліч як природних, так і синтезованих людиною молекул, що самі по собі можуть бути логічними елементами. Їх розділяють на два типи. Природними є молекули, що мають два стійкі стани, яким можна приписати

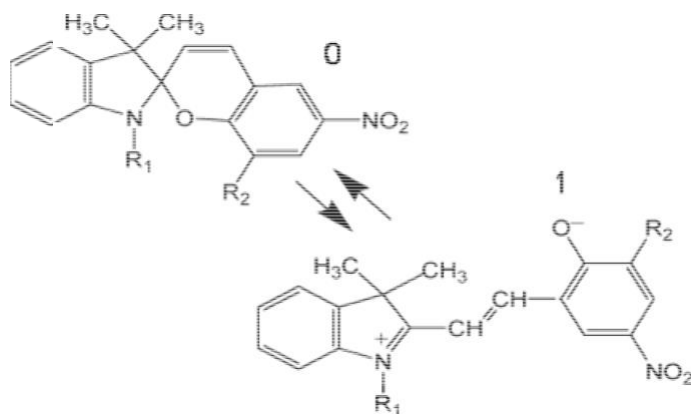


Рис. 4.48. Молекула-фотоізомер (сполука типу спіробензипірану).

значення «0» і «1». Навчившись перемикаєти їх з одного стану в інший за допомогою зовнішніх впливів, можна фактично одержати вже готовий вентиль. Молекули другого типу містять фрагменти, здатні виконувати роль згаданих вище керувальних угруповань. Одна така молекула може працювати як логічно активний елемент «НІ – І», «НІ – АБО» та інші опції (при цьому керувальні угруповання будуть служити входами елемента).

Недавно компанія *Hewlett-Packard* оголосила про свої успіхи у виготовленні логічних вентилів на основі молекул ротаксанів. Такий вентиль складається з молекул двох типів: циклічної («бусини») і лінійної («нитки»). У працюючому пристрої «бусина» може бути нанизаною на «нитку» в одному з двох можливих стійких станів. Перехід з одного стану в інший, тобто перемикаєння вентиля, відбувається за рахунок зміни кислотного-лужного балансу середовища. Такий перехід є відновлювальним, і ним можна керувати за допомогою електричних сигналів. У процесі перемикаєння значно зміщується смуга поглинання світла молекулами ротаксанів, що дає можливість зчитувати інформацію оптичним способом.

Молекули ротаксанів можуть бути об'єднані в полімерні ланцюги різної довжини і складності, що будуть виконувати логічні функції передавання сигналу перемикаєння уздовж ланцюгів.

Як тригери найзручніше використовувати молекули, що мають ізомерні форми. Вони характеризуються однаковими молекулярною масою і складом, але розрізняються будовою або розташуванням атомів у просторі. Деякі з них можна переводити з однієї форми в іншу через зовнішній вплив. Наприклад, молекула сполуки типу спіробензипірану, що перебуває у стані «0», можна переводити у стан «1» за допомогою ультрафіолетового випромінювання, а в зворотному напрямку – за допомогою світла видимого діапазону. На основі такого тригера можна будувати як пристрої оперативної

пам'яті, так і елементи, що виконують логічні функції. Подібні фотоперемикальні системи відіграють важливу роль у процесах зорового сприйняття у тварин і фотосинтезу в рослин: поглинаючи фотон, молекули родопсину і хлорофілу перебудовують свою структуру, змінюючи при цьому реакційну здатність.

Фахівці пророкують появу молекулярних комп'ютерів приблизно до 2015 р. Нині уже розроблено багато варіантів схем молекулярного комп'ютера. На 1 см^2 поверхні можливе розміщення близько 10^{13} молекулярних логічних елементів. Це в 10^4 разів більші щільності складання в сучасних чипах. Теоретично час відгуку молекулярного транзистора на зовнішній вплив становить близько 10^{-15} с, тоді як сучасних пристроїв – близько 10^{-9} с. У підсумку ефективність молекулярного комп'ютера порівняно із сучасними мала б підвищитися приблизно в 10^{10} разів.

Однак ключова проблема молекулярної електроніки – це інтеграція молекул у схему. Молекулярний пристрій має являти собою складні розгалужені ланцюги з атомних угруповань. Підходи до створення базових елементів схем добре розроблені, але їх інтеграція яка б забезпечувала роботу схеми, ще далека від вирішення.

Принцип інтеграції зрозумілий – це має бути процес *самосполучення*, заснований на молекулярному розпізнанні взаємно доповняльних структур. Такий принцип передбачає використання природи створення складних функціональних структур типу ДНК. Натепер розроблено технології деяких простих процесів самоскладання. Молекули ДНК можуть бути сполучені з неорганічними і органічними частинками, тобто приєднані до кремнієвої поверхні. Це дасть змогу створити «гібридні» пристрої. Наприклад, розроблено способи приєднання нанодротів до вільних кінців ДНК. Створено ДНК-чипи і ДНК-матриці – пристрої, у яких ланцюги ДНК закріплені на твердотільній підкладці (скляній, кремнієвій і т. ін.).

ДНК-матриці можуть містити від 10^2 до 10^4 сайтів (ділянок) на поверхні чипа. Розмір таких сайтів становить $10 - 100$ мкм, причому кожен сайт містить від 10^6 до 10^9 амінокислотних послідовностей ДНК. ДНК-чипи уже використовують у мікробіологічних дослідженнях. Розробляють електронно-активні матриці ДНК, що створюють регульовані електричні поля на кожному сайті. Поля, що утворюються при реакції гібридизації ДНК, направляють самоскладання молекул ДНК на визначених сайтах на поверхні чипа. Такі активні пристрої здатні переносити заряджені молекули (ДНК, РНК, білки й ін.) із заданого сайту на поверхню пристрою або навпаки (технологія керуваної ДНК-самоскладання). Ця технологія дає змогу виконувати самосполу-

чення молекулярних схем (двовимірних і тривимірних). Є також і інші методи самосполучення агрегатів молекул на твердотільних підкладках.

Якщо використовувати органічні молекули як базові елементи в межах традиційних схемотехнічних і технологічних способів, то ключовою проблемою є якість контактів. У будь-якому разі для проектування молекулярних пристроїв необхідно знати електричний опір контакту «молекула – з'єднувальний провідник» та характеристики молекул–діодів, тріодів, перемикачів. Для їх експериментального визначення треба приєднати джерело струму, амперметр, вольтметр до кінців індивідуальної молекули. Частково ці проблеми вирішено.

Післямова

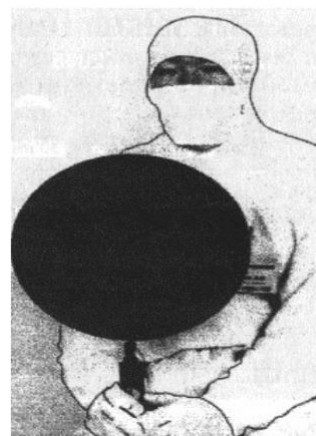
Успіхи мікроелектроніки відчутно впливають на сучасне суспільство. Досягнення обчислювальної техніки, інформатики, радіоелектроніки й інших напрямів техніки майже завжди ґрунтуються на досягненнях мікроелектроніки. По-перше, мікроелектроніка формує елементну базу всіх сучасних засобів приймання, передавання й опрацювання інформації, автоматизованих систем керування. По-друге, вона впливає на різні галузі техніки технологічними принципами і досягненнями в галузі синтезу та застосування нових матеріалів для створення приладових структур.

Принципова технологічна перевага мікроелектроніки перед іншими напрямками техніки – це **груповий спосіб виробництва**. Виробничою одиницею в мікроелектроніці є напівпровідникова пластина, що містить безліч елементних чипів, з яких складаються прилади. Крім зменшення вартості виробництва (що важливо), груповий спосіб виробництва власне привів до послідовного зменшення розмірів електронних компонентів. При цьому стало можливим не тільки збільшувати вихід приладів з однієї пластини, але й підвищити їх швидкодію та надійність функціонування.

У свою чергу, досягнення мікроелектроніки ґрунтуються на дослідженнях і відкриттях у галузі фізики твердого тіла і твердотільної технології. Тепер мікроелектроніка використовує ті фізичні принципи й ідеї, що



а



б

Фотографії: Монокристал кремнію діаметром 400 мм, вирощений методом Чохральського (а); оператор із кремнієвою пластинною діаметром 300 мм (б)

були розвинуті 10 – 20 років тому. Нинішні ж концепції будуть визначати подальший успішний розвиток мікроелектроніки й наноелектроніки.

Наноелектроніка – один з найбільш перспективних науково-технічних напрямів, що продовжує мікроелектроніку. Очікується, що в майбутньому наноелектроніка змінить багато найважливіших характеристик електронної апаратури. Імовірно, саме наноелектроніка стане інструментальною базою реалізації проєктів штучного інтелекту і дозволить створювати роботи що мають мікророзміри.

Дослідження в галузі наноелектроніки досить різноманітні й характеризуються багатьма новими принципами та методами, а також застосуванням нових матеріалів. Деякі з цих методів і матеріалів можуть стати для наноелектроніки базовими і приведуть до серійного виробництва високонадійних економічно конкурентних приладів, схем і систем.

Не виключена можливість, що майбутня наноелектроніка може ґрунтуватися на нанотрубках і фулеренах – вуглецевих структурах (*вуглецева* наноелектроніка). Деякі дослідники переконані, що основою майбутньої електроніки стане *молекулярна* електроніка. Однак до розроблення надійних, економічно привабливих мікроелектронних систем ще досить далеко. На цьому шляху потрібно перебороти чимало принципівих і технологічних труднощів. Тому домінуючою для створення наноприладів є *напівпровідникова мікроелектроніка*, а базовим матеріалом – кремній. Цей матеріал легко обробляється і забезпечує виготовлення субмікронних схемних елементів. Крім того, кремній хімічно стабільний – як він сам, так і формовані на ньому приладові структури. Саме тому той напрям наноелектроніки, що ґрунтується на кремнієвій інтегральній технології, уже використовують у масовому виробництві.

Однак виявилось, що цей напрям перспективний для освоєння лише початкового діапазону нанорозмірів (100 – 10 нм). Для освоєння наступного діапазону (10 – 1 нм) необхідні принципово інші підходи. Їх можна реалізувати як на напівпровідникових, так і на нових матеріалах. На напівпровідникових матеріалах удається створювати нанoelementи для опрацювання і зберігання інформації, у яких використовуються особливі напівпровідникові структури. Це квантові точки, квантові дроти і квантові ями. У цьому напрямі наноелектроніки вдається застосовувати добре розроблену в мікроелектроніці технологію створення багатоелементних інтегральних мікросхем.

Одна з переваг спеціальності – висока наукоємність. Вона ґрунтується на новітніх досягненнях фізики, хімії і біології. Навчання за цією спеціальністю дозволяє студентів освоїти закони фундаментальних наук досить ґрунтовно.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кравченко А. Ф. Електронні процеси у твердотільних системах ти / А. Ф. Кравченко, В. Н. Овсюк – Наукова думка: – 2016 – 448 с.
2. Воронов С. А. Фізичне матеріалознавство / С. А. Воронов, Л. П. Переверзена, Ю. М. Поплавко. – К.: НТУУ «КПІ» – 2014 – 194 с.
3. Драгунов В. П. Основи наноелектроніки: Фізматкнига / В. П. Драгунов – 2006 – 494 с.
4. Зайчук Д. М. Навнорозмірні структури і надгратки. – Львів : Вид-во «Львівська політехніка», 2016 – 415 с.
5. Гусев А. І. Наноматеріали, наноструктури, нанотехнології. – Фізматкнига: 2007 – 415 с.
6. Зайчук Д. М. Нанотехнології і наноструктури. – Львів: Вид-во «Львівська політехніка», 2009 – 580 с.
7. Hari Singh Nalva. Nanostructured materials and nanotechnology // Academic Press. – 2002 – 834 p.. pp. 65 - 70.
8. Степаненко І.П. Основи теорії транзисторів. К.: Енергія, 1997. 480с.
9. Тугов Н.М. Напівпровідникові прилади. К.: Енергія, 1990. 166с.
10. Викулін І.М. Фізика напівпровідникових приладів . Харків: Радіо і зв'язок, 1990. 542с.
11. Матвійків М.Д. Елементна база електронних апаратів. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка 2007. 428с.

Інформаційні ресурси:

1. Наукова бібліотека Запорізького національного університету. URL: <http://library.znu.edu.ua/>
 2. Система електронного забезпечення навчання ЗНУ. URL: <https://moodle.znu.edu.ua/>
 3. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського. URL: <http://www.nbuv.gov.ua/>
- AnyLogic: імітаційне моделювання для бізнесу URL: <https://www.anylogic.com/>

