

Д. М. Заячук

Нанотехнології

НАНОТЕХНОЛОГІЇ (від *нано...* та *технологія*). Нині немає єдиного визначення чи стандарту щодо Н. Зважаючи на те, що розробки, які зазвичай належать до цього наук. напрямку, мають у багатьох випадках міждисциплінар. характер, поєднуючи в собі особливості різних галузей науки і техніки, таку всеохоплювал. дефініцію буде складно зробити і в майбутньому. Згідно з пропозиціями International Organization for Standardization (ISO), Н. варто вважати уміння керувати процесами в нанометр. масштабі в одному, двох чи трьох вимірах за умови, що введення в дію такого розмір. ефекту чи явища призводить до можливості нових практ. застосувань, а також використання властивостей об'єктів та матеріалів у нанометр. масштабі. Вони відрізняються як від ознак вільних атомів або молекул, так від об'єм. властивостей речовини, що складається з цих атомів або молекул, для створення досконаліших матеріалів, приладів, систем, що реалізують ці властивості.

Історія власне Н. нараховує понад 30 р., починаючи від 1986, коли після виходу в світ відомої книги амер. вченого Е. Дрекслера – «Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology» («Машини творення: Ера нанотехнологій, що гряде») термін «нанотехнологія» набув широкого вжитку. Вважають, що геніал. наук. пророцтвом появи ниніш. Н. стали тепер уже знамениті слова видат. амер. фізика-теоретика, лауреата Нобелів. премії Р. Фейнмана, виголошені ним у грудні 1959 на щоріч. засіданні Амер. фіз. товариства у доповіді-лекції («There is plenty of room at the bottom: an invitation to enter a new field of physics» / «Внизу багато місця: Запрошення увійти в нову область фізики»), в якій він уперше передбачив можливість використання атомів як звичай. буд. матеріалу, зазначивши, що жоден фіз. чи хім. закон не перешкоджає нам змінювати взаємне розташування атомів і що в майбутньому можна буде маніпулювати окремими атомами, як предметами. Це перегукується з розумінням Н. дир. Інституту нанотехнологій США Ч. Міркіним, який вважає, що «нанотехнології перебудують усі матеріали заново. Всі матеріали, отримані за допомогою молекулярного виробництва, будуть новими, оскільки до цього часу в людства не було можливості розробляти й виготовляти наноструктури. Нині ми використовуємо в промисловості тільки те, що нам дає природа. З дерева ми робимо дошки, з провідного матеріалу – дроти. Нанотехнологічний підхід полягає в тому, що ми

будемо переробляти практично будь-які природні ресурси у так звані “будівельні блоки”, які становитимуть основу майбутньої технології». На практиці Н. як одна з провід. галузей сучас. науки й виробництва сформувалися в остан. чв. 20 ст. з появою сучас. зонд. мікроскопів – сканувал. тунельного та атом. силового – і відтоді стрімко розвиваються. Сканувал. зонд. мікроскопи використовують для вивчення поверхні матеріалів на атом. рівні. Їхній осн. робочий елемент – загострена голка-зонд, що відстежує й записує найдрібніші зміни властивостей поверхні об’єкта, яку досліджують, що дозволяє з високим розділенням отримати її тривимірне зображення, топографію. Першим прототипом сканувал. зонд. мікроскопа був сканувал. тунел. мікроскоп, створ. 1981 співроб. компанії IBM нім. (Г. Біннінг) та швейцар. (Г. Рорер) фізиками (Нобелівська премія, 1986). Цей винахід значно розширив поле для Н., надавши можливість не лише візуалізувати окремі атоми, а й маніпулювати ними, переміщувати в потріб. напрямках на необхідні відстані, що на практиці вперше було підтверджено 1989, коли з використанням 35 атомів інерт. газу ксенону, точно розміщених на поверхні кристала нікелю, була записана назва фірми IBM. Атомно-силовий мікроскоп, винайдений через 5 р., доповнив можливості сканувал. зонд. мікроскопа досліджувати рельєф поверхні з розділ. здатністю аж до атом. рівня на непровідні об’єкти.

Нанотехнології 2D структур. Н. – це наступний, логіч. крок розвитку електроніки та ін. наукоєм. галузей. Н., що широко використовують для потреб електроніки, це, насамперед, технології формування 2D структур – квантово-розмір. шарів та їх композицій. Знаковими представниками цих технологій є молекулярно-промен. епітаксія (МПЕ) та газофазна епітаксія з металоорган. сполук і гідридів (МОС гідридна епітаксія). МПЕ є одним із різновидів газофаз. епітаксії, придатним для нарощування тонких шарів будь-яких матеріалів – напівпровідників, металів чи діелектриків. Матеріал для росту епітаксій. шару в методі МПЕ доставляють на поверхню підкладки за рахунок молекуляр. або атомар. пучків хім. елементів, які створюють терміч. способом за допомогою ефузій. комірок Кнудсена. Ріст кристаліч. шару при МПЕ відбувається на чистій поверхні за повністю контрольов. умов надвисокого вакууму. Принципи МПЕ формувалися поступово. 1964 за допомогою молекуляр. пучків були отримані досконалі плівки сірчаного свинцю PbS на монокристаліч. підкладці кам’яної солі NaCl. Через 4 р. з молекуляр. пучків в умовах високого вакууму були вирощені епітаксійні плівки GaAs на монокристаліч. підкладках арсеніду галію. Розвиток МПЕ в її ниніш. розумінні розпочався в 1970-і рр. зі створенням і пром. виробництвом відповід. вакуум. устаткування. Найважливішими відмінностями МПЕ від ін. методик нарощування тонких шарів у вакуумі, що існували до неї, є незрівнянно вищий рівень контролю потоків речовини, що подаються на підкладку, і високий рівень контролю умов конденсації та властивостей нарощуваних тонких плівок безпосередньо в процесі епітаксії. Як технол. метод вирощування тонких епітаксій. шарів різних матеріалів МПЕ характеризують незначні (порядку 1 мкм/год.) швидкості росту плівок; відносно низькі температури росту плівки; можливість різко переривати й поновлювати ріст плівки за

рахунок використання мех. заслінок побл. джерел потоків усіх компонентів; можливість керувати концентрацією домішок за допомогою введення в зруч. спосіб додатк. джерел, що створюють необхідні молекулярні пучки; можливість аналізу хім. складу плівки безпосередньо під час росту. Перераховані позитивні риси методу МПЕ дають змогу створювати за його допомогою придатні для приклад. застосувань епітаксійні структури на основі елементар. напівпровідників, їх хім. сполук і твердих розчинів та дозволяють вирішувати такі найважливіші задачі, як отримання монокристаліч. шарів високої чистоти – за рахунок росту в надвисокому вакуумі та високої чистоти вихід. потоків речовини; вирощування надтонких структур із різкими змінами складу на границях – за рахунок відносно невисоких т-р росту, що перешкоджають взаєм. дифузії; отримання гладких бездефект. поверхонь для гетероепітаксії – за рахунок механізму росту сходинками, що унеможлиблює утворення зародків; отримання надтонких шарів із контрольов. товщиною – за рахунок точності керування потоками і відносно малих швидкостей росту; створення структур зі склад. профілями складу і (або) легування; створення структур із заданими внутр. напругами розтягу чи стиску, що можуть знімати виродження енергет. спектра в потріб. точках зони Бріллюена, локально модифікуючи зонну структуру, тобто вирішувати задачі т. зв. зонної інженерії. Визначал. ознакою МОС гідрид. епітаксії як одного з різновидів газофаз. епітаксії є використання в технол. процесі вирощування тонких шарів як джерел елементів росту металоорган. сполук та гідридів. Гідриди – це сполуки різних елементів із воднем, а термін «металоорганіка» об'єднує широкий клас речовин, що містять зв'язки метал-карбон (т. зв. металоорган. сполуки) або зв'язки метал-карбон-кисень (т. зв. алкоксиди). Для транспортування цих реагентів у зону росту плівки використовується газ-носій, який повинен бути чистим і не вступати в реакцію з підкладкою та плівкою, що росте. Нині в ролі такого носія в установках МОС гідрид. епітаксії використовують переважно водень як найчистіший із газів, які дає змогу отримувати сучасна пром-сть. Метод МОС гідрид. епітаксії бере свій початок від 1968, коли вперше було показано, що, розкладаючи газову суміш триметилгалію $Ga(CH_3)_3$ і гідриду миш'яку AsH_3 в атмосфері водню H_2 за температури 600–700 °C, можна вирощувати тонкі епітаксійні плівки GaAs у відкритому реакторі проточ. типу. Фіз. принцип МОС гідрид. епітаксії полягає в наступному. За допомогою водню, який продувається через реактор для росту тонких епітаксій. шарів, де розміщені підкладки, до останніх подають чітко визначені кількості (потоки) металоорган. і гідрид. сполук необхід. елементів. Підкладка нагрівається до температури, за якої металоорганіка та гідриди діляться на складові, тобто відбувається піроліз. У зоні піролізу виокремлюються необхідні для росту епітаксій. шару елементи, що, взаємодіючи з підкладкою та між собою, спричиняють ріст плівки на поверхні підкладки. Металоорган. сполуки, які становлять інтерес для вирощування напівпровідник. структур, за кімнат. температури здебільшого є рідинами, хоча деякі з них знаходяться у твердому стані. Ці речовини мають переважно високі тиски парів і легко можуть бути доставлені в зону реакції пропусканням газу-носія через рідину або над поверхнею твердого тіла, що

відіграють роль джерела металоорганіки. Гідриди, які використовують для росту напівпровідник. структур, за кімнат. температури є газами, їх застосовують переважно як невеликі добавки до H_2 . Нанотехнології 1D і 0D структур. Поєднуючи можливості МПЕ і МОС гідрид. епітаксії нарощувати квантово-розмірні епітаксійні шари з різним ступенем узгодження шару та підкладки за параметром кристаліч. ґратки, формують наноструктури наступ. низькорозмір. генерацій – 1D структури (квант. нитки) і 0D структури (квант. точки). Якщо узгодження параметрів добре, спочатку на підкладку нарощують досконалий квантово-розмір. епітаксій. шар, а потім розділяють його на квант. нитки або точки, застосовуючи нанолітографію. Найчастіше використовують EUV-літографію (Extreme Ultra Violet lithography) – літографію в спектрі жорсткого ультрафіолету, що забезпечує роздільну здатність краще 70 нм, сканувал. електронну та лазерну інтерференц. літографію. Інтерференцією 2-х лазер. променів отримують одновимірно упорядк. масиви паралел. квант. ниток, суперпозицією 3-х або 4-х лазер. променів – упорядк. ансамблі квант. точок із трикут. і квадрат. симетрією відповідно. Для того, щоб знизити концентрацію дефектів під час виготовлення масивів квант. ниток і точок, використовують ефекти самоорганізації. У випадку квант. ниток самоорганізацію реалізують, використовуючи як підкладку пластину з віцинальною (слабо нахиленою до однієї з осн. кристалогр. площин) поверхнею. При нанесенні на віцинальну поверхню невеликої кількості матеріалу, що добре узгоджується з підкладкою за параметром кристаліч. ґратки, він, відповідно до принципу мінімуму поверхн. енергії системи, формує на підкладці не плоский епітаксій. шар, що повторює поверхню підкладки, а хвилясту, профільов. періодичну структуру, «підніжжя» уступів якої в подальшому використовують для нарощування масиву квант. ниток. Для реалізації формування масивів квант. точок із використанням ефекту самоорганізації, навпаки, як поверхню підкладки використовують одну з осн. кристалогр. площин, але за поганої збіжності параметрів ґратки підкладки й матеріалу, що осаджується. Тоді гетероепітаксій. ріст на підкладці реалізується відповідно до режиму Странського–Крастанова та завершується, при правил. дотриманні режимів осадження, формуванням досконалого масиву наноструктур типу квант. точок.

Зондові нанотехнології. Новіт. напрям технології формування квант. точок, що нині розвивається, – це т. зв. зонд. Н., формування нанометр. об'єктів за допомогою зонда сканувал. тунел. мікроскопа чи кантилевера атомно-силового мікроскопа. Зонд. Н. можна означити як певну послідовність способів та прийомів позиціонування, формування й модифікації елементів нанометр. розмірів, зокрема окремих атомів та молекул, на поверхні підкладок із допомогою зонда-наконечника, при цьому маючи можливість одночасної їх візуалізації й контролю. Є всі підстави вважати, що в майбутньому зонд. технології використовуватимуть для збирання унікал. наноелектрон. схем чи створення терабіт. пристроїв пам'яті.

Нанотехнології нанорозмірних алотропних модифікацій карбону. Ін. важливий напрям Н. – технології створення нанорозмір. алотроп. модифікацій карбону: фулеренів, карбонових нанотрубок і графену. Фулеренами називають карбон. багатоатомні молекули із заг. формулою C_n (n – парне число), в яких атоми карбону розміщуються на поверхні випуклого замкненого каркас. багатогранника сферич. або сфероїдал. типу. Вони володіють різною стабільністю, а отже, і різними перспективами практ. використання. Найбільш стабільним є фулерен C_{60} , що має форму зрізаного ікосаедра – фігури, обмеженої 20-ма шестикутниками та 12-ма п'ятикутниками. Кожен із шестикутників C_{60} межує із 3-ма п'ятикутниками і 3-ма шестикутниками. П'ятикутники безпосередньо між собою не контактують, кожен із них межує лише із шестикутниками. На поверхні сфери у вершинах зрізаного ікосаедра атоми молекули C_{60} займають абсолютно еквівалентні позиції, мають по 3 найближчих сусіди, утворюють із ними два одинарні C–C та один подвійний C=C зв'язки. У п'ятикутниках хім. зв'язки між атомами карбону одинарні, у шестикутниках – почергово одинарні та подвійні. Радіус молекули C_{60} згідно з даними рентгеноструктур. аналізу становить 0,357 нм. Для одержання фулеренів у кількостях, достатніх для вивчення їхніх властивостей та практ. застосування, вирішують чотириєдину задачу забезпечення: умов створення і конденсації пари карбону, за яких у продуктах конденсації утворювалися б каркасні структури багатоатом. карбон. молекул; ефектив. взаємодії між карбон. молекулами для збагачення продуктів конденсації пари карбону стабіль. фулеренами, насамперед фулереном C_{60} ; ефектив. екстракції фулеренів із продуктів конденсації карбон. пари; сепарування екстрагов. фулеренів C_n на фракції з різними значеннями масового числа n . Замкнені карбон. каркасні наноструктури отримують випаровуванням графіту, синтезом у полум'ї електр. дуги, спалюванням вуглеводнів. Для збагачення продуктів синтезу найбільш стабільним фулереном C_{60} використовують їх розчинення в неполяр. розчинниках при високих (900 K) т-рах. Найефективніші методики екстракції та сепарування фулеренів базуються на використанні ароматич. розчинників і сорбентів. Сепарація фулеренів за їх масовими числами ґрунтується на принципах рідин. хроматографії. Карбонові нанотрубки – квазіодновимірні багатоатомні одно- або багаточарові карбон. циліндричні молекули з відкритими чи закритими кінцями, діаметр яких коливається в межах від частки до декількох нанометрів, а довжина є значно більшою за діаметр і може коливатися від десятків-сотень нанометрів до десятків мікрометрів. Зовн. діаметр багаточар. нанотрубок – у межах 2,5–100 нм, одношарових – 0,6–2,4 нм, хоча діаметр найтоншої трубки, що асоціюється з найменшим із можливих фулеренів C_{20} , дорівнює прибіл. 0,4 нм. Нанотрубки можна розглядати як гранич. випадок молекул фулеренів, довжина поздовж. осі яких значно переважає їхній діаметр. Карбон. нанотрубки утворюються при високих т-рах у результаті специф. хім. перетворень широкого спектра матеріалів, що містять карбон. Типовими й найбільш поширеними методами вирощування карбон. нанотрубок є розпорошення графіту в полум'ї електр. дуги; розпорошення графіту під впливом лазер. випромінювання; каталітич. розклад вуглеводнів. Ефектив. шляхом подальшого розвитку

технології отримання карбон. нанотрубок із заданими характеристиками є застосування каталізаторів. Найбільші сподівання щодо технології створення карбон. нанотрубок, яка в майбутньому могла б мати навіть пром. перспективи, пов'язують із технологією реакцій термохім. розкладу карбоновміс. сполук, що протікають на поверхні метал. каталізаторів, нанесених на підкладку – піролітич. розкладу вуглеводнів у присутності каталізатора. Вона дозволяє безпосередньо синтезувати ізольовані й відносно чисті одностінні карбон. нанотрубки. Для отримання нанотрубок необхідно також вирішувати задачі їх відділення від наночастинок метал. каталізаторів та окислів; відділення нанотрубок однієї від іншої, а також від ін. карбон. компонентів продуктів синтезу; розділення нанотрубок за розмірами. Графен – це кристалічна одношарова 2D карбон. структура, атоми якої формують плоску гексагонал. ґратку, притаманну моноатом. шару графіту. Можливості синтезу й існування 2D структур ускладнюються фундам. обмеженнями, які накладають теплові флуктуації, що зростають із підвищенням температури. Щоб оминати цю проблему, 2D структури синтезують при високих т-рах, як складові частини 3D структур, із подальшим їх виділенням із цих структур при низькій т-рі. Флуктуації, що мали б сильно зростати за високих т-р, гасяться в процесі такого синтезу завдяки взаємодії із 3D матрицею. Виділення ж 2D кристалів відбувається при низьких т-рах, за яких флуктуації суттєво приглушені. Найпростіша реалізація методу високотемператур. синтезу масив. кристалів і низькотемператур. виокремлення з них 2D шарів у застосуванні до графену полягає у використанні графіт. стержнів і розшаруванні їх на індивід. площини моноатом. товщини. На цьому базується принцип широкоживаної техніки формування шарів графену, яку зазвичай називають технікою мікромех. сколювання, або скотч-методом. Ін. спосіб розшарування графіту на окремі графен. шари базується на використанні поверхн.-актив. орган. рідин, оброблення графіту якими призводить до проникнення атомів чи молекул різної природи в проміжки між його шарами. Відстань між шарами збільшується, сили зв'язку між ними слабнуть, у результаті чого розшарування графіту шляхом мех. впливу полегшується. Графен може бути синтезований також методом хім. осадження пари на придатну підкладку, яка, крім основи для осадження, відігравала б роль каталізатора. Таким каталізатором може бути, напр., нікель, мідь чи ін. метали. Цим методом можна синтезувати зразки моношарів графену попереч. розмірів порядку 1 см, що в десятки й сотні разів більше, ніж розміри аналог. зразків, отримуваних ін. методами. Як й інші поверхн. структури карбону – фулерени й нанотрубки, графен може бути отриманий за допомогою дугового розряду між графіт. стержнями в атмосфері інерт. газу, а також шляхом терміч. розкладу карбіду кремнію, в результаті якого графен. плівка епітаксійно наростає на поверхні кристала SiC. Нанотехнології у виготовленні транзисторів. Відповідні технології розвиваються, насамперед, у напрямі мініатюризації транзисторів для задоволення потреб обчислювальної техніки. Нині транзистори виготовляють за технологією 90 нм. Уже заплановано й реалізують мініатюризацію електрон. компонентів до 60, 45 і 30 нм. Сучасні межі мініатюризації – функціонал. одноелектронні транзистори.

Одноелектрон. транзистор працює на основі явища кулонів. блокади. Переміщення електронів у такому транзисторі відбувається шляхом тунелювання. Час тунелювання електрона малий, відповідно швидкодія одноелектрон. транзистора дуже висока, за оцінками – сотні терагерц. Робота, необхідна для переміщення одного електрона, також мала, а отже, малим є й енергоспоживання одноелектрон. пристроїв – за оцінками $3 \cdot 10^{-8}$ Вт. Одноелектрон. транзистор може знаходитися у двох станах – або в стані кулонів. блокади, або в провід. стані. Це дозволяє розробляти на його основі пристрої, що можуть служити комірками комп'ютер. пам'яті. Вже створ. одноелектронні транзистори на основі графену. Ідея базується на тому, що графен. наноструктури є стабільними до дійсно нанометр. розмірів, аж до окремо взятого гексагонал. кільця. Ще одна перевага графену для формування електр. схем на одноелектрон. транзисторах полягає в тому, що всі важливі їх складові, зокрема квант. точки, провідні канали, квант. бар'єри й міжелементні з'єднання, можуть виготовляти, використовуючи лише графен. шар. Структуру формують за допомогою електрон. літографії та сухого травлення з графен. шару, нанесеного розщепленням графіту на плівку діоксиду кремнію SiO_2 , що покриває тонку пластинку Si. Спільн. зусиллями дослідників Німеччини, Японії та США з використанням високостабільного сканувал. тунел. мікроскопа створ. молекуляр. транзистор, сформований на підкладці InAs молекулою фталоціаніну, оточеною 12-ма атомами індію, які служать затвором транзистора, що може керувати переміщенням електронів по одному. Принцип формування молекуляр. транзисторів – знизу вгору, збіркою одиноч. атомів. Це забезпечує високу точність процесу, що зробить такі транзистори дуже надійними, незважаючи на їх маленькі розміри.

Медичні нанотехнології. Цей новий міждисциплінар. напрям перебуває нині на стадії становлення, а його методи активно створюють і апробують. Незважаючи на те, що значна їх кількість поки що існує тільки у вигляді проєктів, більшість експертів вважають, що саме цей напрям стане основним у 21 ст. Один із лідерів світ. медицини – Америк. нац. інститут здоров'я – зарахував наномедицину до п'ятірки найбільш пріоритет. галузей розвитку медицини майбутнього. Осн. завданнями наномедицини визначено раннє виявлення та усунення ракових клітин; усунення або заміна зіпсов. компонентів клітини за допомогою наномасштаб. пристроїв; створення засобів для адрес. доставки актив. фармакол. інгредієнтів. Чимало відомих аналітиків у галузі Н., оцінюючи розвиток та просування цих технологій на ринку, вважає, що поряд з обчислюв. технікою їх використання буде найбільш затребуваним саме в таких сферах людської діяльності, як фармакологія і медицина.

Н. застосовують у найрізноманітніших сферах виробництва, в деяких найбільш сучас. наукоєм. галузях (комп'ютерна техніка, матеріалознавство, біомедицина) використання Н. дозволяє вже в найближчому майбутньому сподіватися на результати, що повністю виправдають використані затрати й прикладені зусилля. Напр., дуже реальним виглядає створення надпотуж. комп'ютерів, нових лікув. препаратів для боротьби з найбільш

небезпеч. хворобами, зокрема засобів їх адрес. доставки до вражених органів, високоефектив. перетворювачів соняч. енергії, надлегких і міцних матеріалів для авіації тощо.

Рекомендована література

1. A. Y. Cho, J. R. Arthur. Molecular beam epitaxy // Progress in Solid State Chemistry. 1975. Vol. 10, Issue 3;
2. Molecular beam epitaxy and Heterostructures. Dordrecht; Boston; Lancaster, 1985;
3. S. Iijima. Helical microtubules of graphitic carbon // Nature. 1991. Vol. 354;
4. T. W. Ebbesen, P. M. Ajayan, H. Hiura, K. Tanigaki. Purification of nanotubes // Там само. 1994. Vol. 367;
5. Леденцов Н. Н., Устинов В. М., Шукин В. А., Копьев П. С., Алферов Ж. И., Бимберг Д. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры // ФТП. 1998. Т. 32;
6. Смолли Р. Е. Нобелевская лекция: Открывая фуллерены / Пер. с англ. // УФН. 1998. Т. 168;
7. Керл Р. Ф. Нобелевская лекция: Истоки открытия фуллеренов: эксперимент и гипотеза / Пер. с англ. // Там само;
8. Крото Г. Нобелевская лекция: Симметрия, космос, звезды и C₆₀ / Пер. с англ. // Там само;
9. E. E. B. Campbell, F. Rohmund. Fullerene reactions // Rep. Prog. Phys. 2000. Vol. 63;
10. P. Moriarty. Nanostructured Materials // Там само. 2001. Vol. 64;
11. Ch. P. Poole, Jr. and F. J. Owens. Introduction to nanotechnology. New York, 2003;
12. Шпак А. П., Куницький Ю. А., Коротченков О. О., Смик С. Ю. Квантові низькорозмірні системи. К., 2003;
13. J. Stangl, V. Holy, G. Bauer. Structural properties of self-organized semiconductor nanostructures // Rev. Mod. Phys. 2004. Vol. 76;
14. M. Burghard, K. Balasubramanian. Chemically Functionalized Carbon Nanotubes // Small. 2005. Vol. 1;
15. A. A. Tseng, A. Notargiacomo, T. P. Chen. Nanofabrication by scanning probe microscope lithography: A review // J. Vac. Sci. Technol. B. 2005. Vol. 23;
16. K. Jain Kewal. Nanotechnology in clinical laboratory diagnostics // Clinica Chimica Acta. 2005. Vol. 358;
17. Заячук Д. М. Низькорозмірні структури і надґратки. Л., 2006;
18. L. A. Ponomarenko et al. Chaotic Dirac Billiard in Graphene Quantum Dots // Science. 2008. Vol. 320;
19. Заячук Д. М. Нанотехнології і наноструктури: Навч. посіб. Л., 2009;
20. K. S. Novoselov. Nobel Lecture: Graphene: Materials in the Flatland // Rev. Modern Phys. 2011. Vol. 83;

21. A. K. Geim. Nobel Lecture: Random walk to graphene // Там само;
22. Чекман І. С., Ульберг З. Р., Маланчук В. О. та ін. Нанонаука, нанобіологія, нанофармація. К., 2012;
23. N. Mishra et al. Targeted Drug Delivery: A Review // Am. J. Pharm. Tech. Research. 2016. Vol. 6(1); Yu-Chen Wang et al. Synthetic Methodologies to Gold Nanoshells: An Overview // Molecules. 2018. Vol. 23.

Бібліографічний опис:

Нанотехнології / Д. М. Заячук // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2020. – Режим доступу:

<https://esu.com.ua/article-71296>

2001-2025 © Ця енциклопедична стаття захищена авторським правом згідно з чинним законодавством України ([докладніше](#)).