

Нанопристрої та основні методи їх
створення. Нанотрубки- основний
елемент наноелектроніки.
Плазмони. ЕПР. ЯМР

Лекція 4 В. М. Огенко ІЗНХ НАНУ

5 mm 30 травня 2023 ППА

Основні проблеми при створенні нанопристроїв

- Як створити контакти в нанометровому діапазоні розмірів, коли треба з'єднати в інтегральній схемі більше млн. транзисторів, розміщених на площі в декілька квадратних сантиметрів?
- Для створення виробництва потрібні надзвичайно великі кошти — в об'ємі триліонів долларів.

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ОРГАНІЧНИХ МОЛЕКУЛ В НАНОЕЛЕКТРОНІЦІ

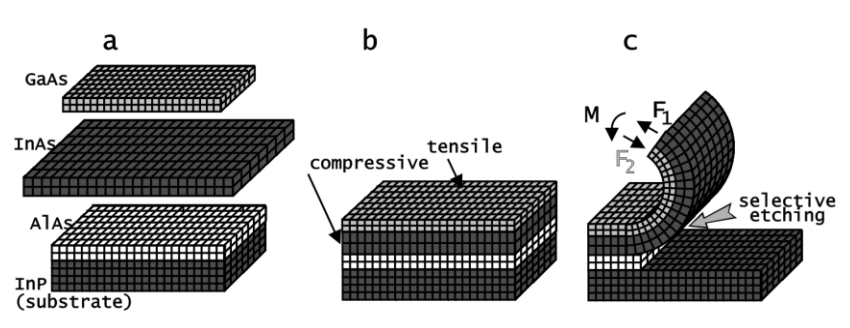
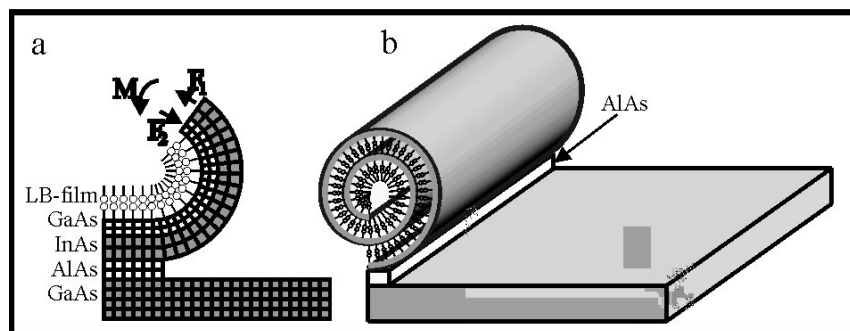
- Вважається, що молекули порядку 10 ангстрем являються найбільш придатні для створення з'єднань та сшивок. Органічна хімія досягає точності при сшиванні в 1 ангстрем, тому хімія повинна сказати як зробити, щоб одні малі атоми чи молекули локалізувались точно біля іншої малої молекули.
- Мінімальна одиниця електронного пристрою повинна переключатись між двома різними станами, бути адресно визначеною і мати мінімально можливий розмір.
- Найкраще використовувати молекули- вони мають добре визначені заряд, спін, різні типи станів- електронні, коливальні, вібраційні, конформаційні, та інші.
- Молекули повинні бути здатними програмуватись - пристрої мають бути здатними змінювати свою форму роботи .
- Зрозуміло, що це буде значно дешевше виробництво, ніж виробництво напівпровідникової техніки .

Синтез наноструктур та технологічні маніпуляції з ними(по матеріалам JEEE – NANO 2003)

- «Створення згорнутих поверхнь , нанотрубок з бажаними геометричними розмірами та заданим складом хімічних компонентів представляє сьогодні найбільший інтерес.
- Трубки привертають увагу своєю міцністю, еластичністю, унікальними властивостями електронів, що проявляються в згорнутих поверхнях.
- Наявні всі підстави прогнозувати , что нанотрубки, як і нанодроти або квантові крапки, стануть основними об'єктами майбутніх базових нанотехнологій в наноелектроніці, нанооптиці, сенсорних системах та ін.»

Новий метод виготовлення наноструктур

V.Ya. Prinz, Росія, [1, стр. 199 -204]

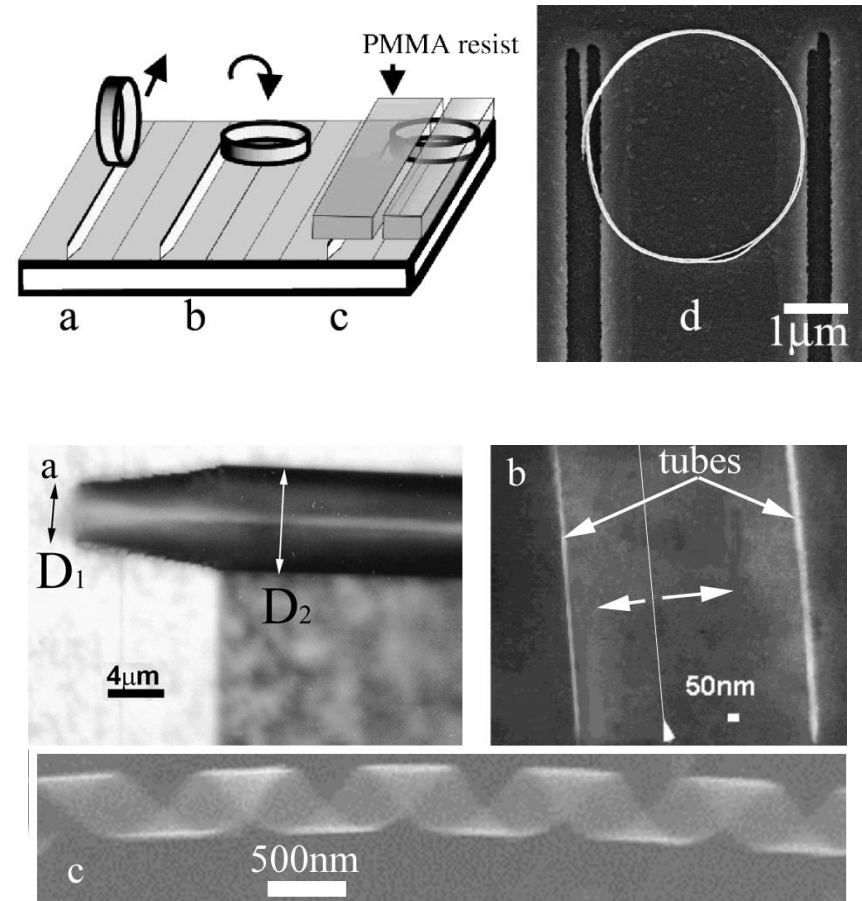


- метод, по своїй доступності для багатьох лабораторій, може стати одним із найбільш дешевих і керованих способів отримання нанотрубок з широким діапазоном нових функціональних властивостей (типу квантових точок, квантових ям всередині трубок), які неможливо отримати іншими методами.

Технологія виготовлення нанотрубок різної товщини, різнорідних кілець будь-яких розмірів із напівпровідників, металів, діелектриків та гібридних гетероструктур.

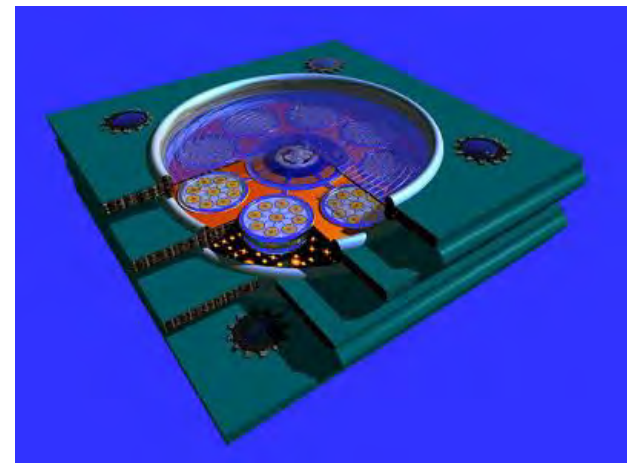
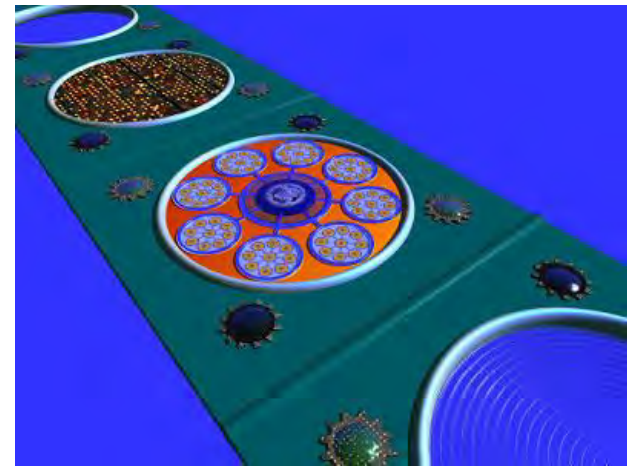
V. Ya. Prinz,

- Перед згорненням на зовнішній поверхні плівки можливо нанести плінки Ленгмюра-Блоджет, що дасть можливість регулювати товщину (послідовно нанесеними один на одний моношарами) параметри трубок, товщину стінок або інші складні функціональні наноархітектури всередині її.



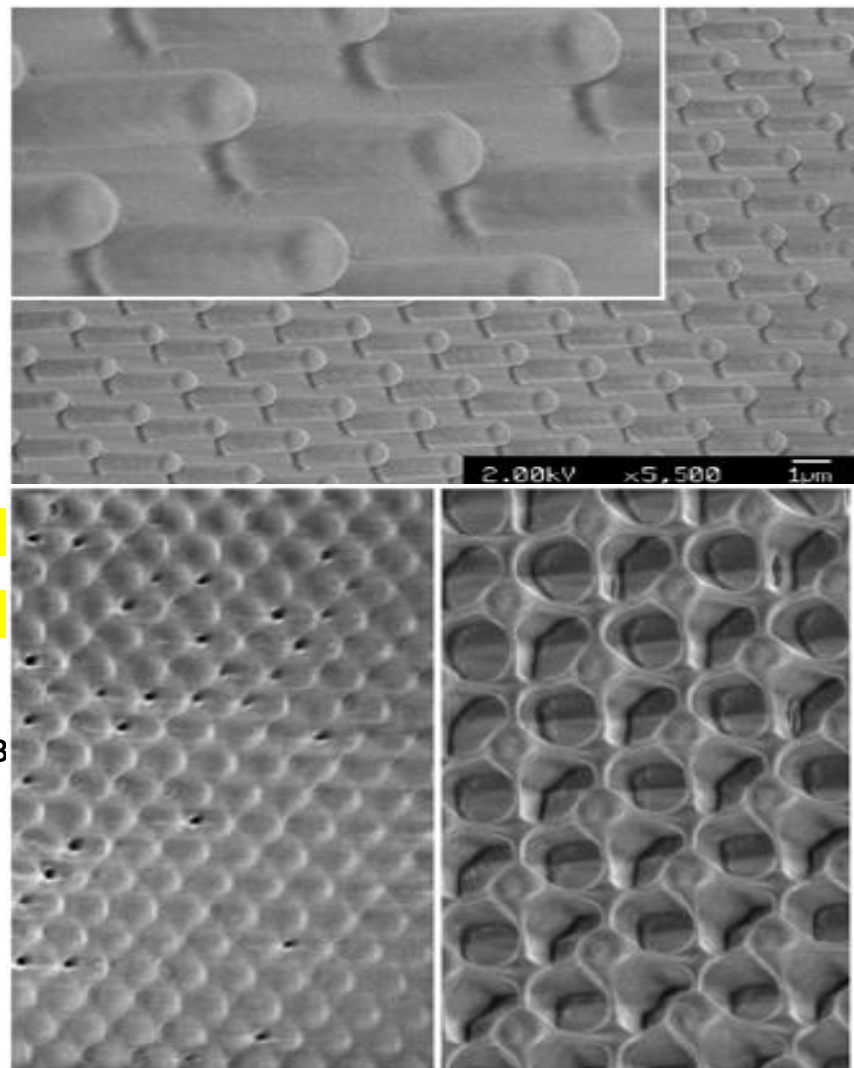
Наноструктурне орігамі- новий метод виробництва **Stanley M. Jurga**, та ін., США [1, стор. 220-223],

- По аналогії з японським оригами складання з паперу, представлено новий метод виробництва (3-Д) наноструктур згинанням і накладанням в заданому положенні одна над одною 2-Д наноструктурних мембран з врахуванням їх 3-Д необхідної конфігурації та електричної, оптичної і др. комутацій всіх функціональних елементів.
- Використовують наявні інструменти і процеси , розроблені в мікро и наноелектроніці.
- Мембрана із Si_3N_4 , або кремнію.
- розроблено способи і улаштування для складання з високою точністю 2-Д наноструктур в 3-Д за долі секунди
- Перевагами є можливість їх 3-Д з'єднання, хороше розсіяння тепла, низка вартість, високий вихід і відтворюваність.



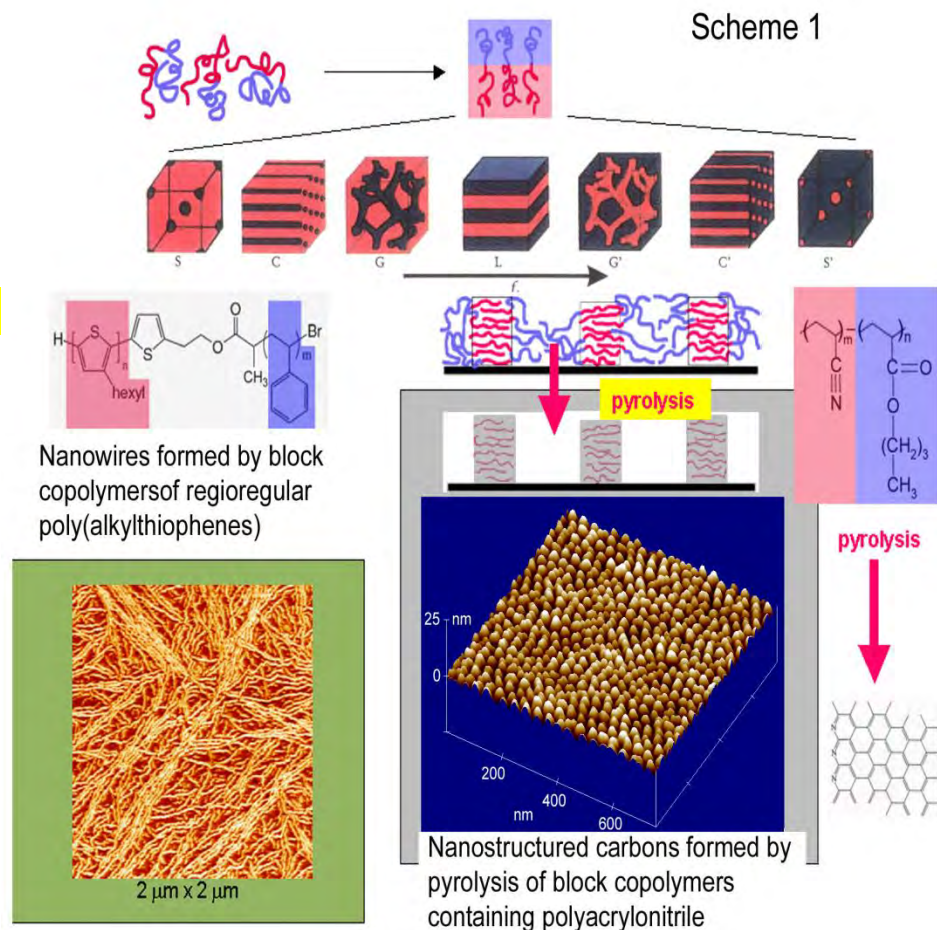
Створення 2Д-3Д структур з використанням двухфотонної полімеризації, (*Xuan-Ming Duan i in.*) 2, стр 498-501..

- Для двухфотонної полімеризації використовували 780-nm, 80-фсек, 82 МГц Ті: сапфіровий лазер без фото-масок і фотополімер- уретановий акрилат з бензоїл фотоініціатором.
- Промінь лазера було розщеплено на 4 пучка, інтерференційна картина від яких, сфокусована на зразку, давала прутко-подібне розподілення максимумів першого порядку інтенсивності світла. Після завершення експонування незаполімеризована смола вимивалась етиловим спиртом і одержували бездоганну 2-Д полімерну фотонну ґратку, котру неможливо отримати іншими традиційними технологіями, типу хімічного травлення , м'якої фотолітографії та інше.
- Виявлені процеси самоорганізації полімерів в процесі розчинення, в результаті чого формувалась також 3-Д наносітка, яка складалася з 2-Д множини стрижнів і нановолокон.



Синтез наноструктурних sp^2 вуглецевих матеріалів методом самоскладання в блок-сополімерів і пиролізу. Т. Kowalewski, США [2, стр. 543-545]

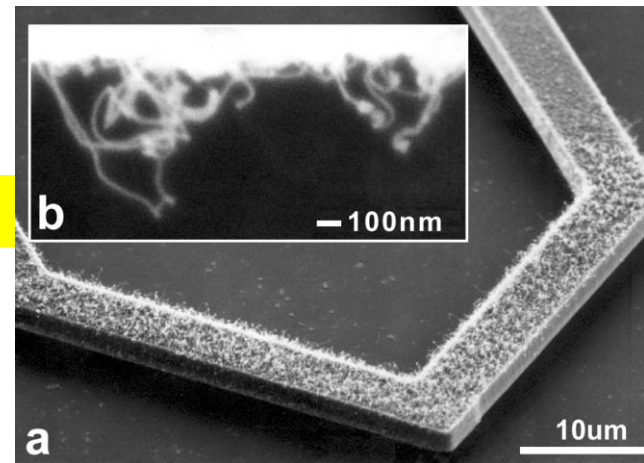
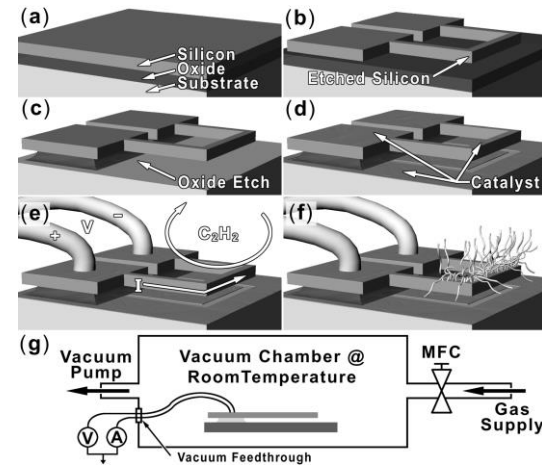
- Самозбирання в блок-сополімерах відбувається із-за їх незмішуваності. Полімери звичайно незмішуються на молекулярному рівні із-за ентропійних причин. Коли два різних сегмента певного полімера ковалентно з'єднані разом, фазове розділення обмежено в нанодіапазоні від ~ 5 до ~ 100 nm. Відомо, що для подвійних полімерних систем спостерігається три типи морфології: сфери, циліндри і ламелі, а для трехкомпонентних сополімерів визначено більше 20 різних морфологій, в залежності від об'ємної долі блоків, їх звязаності, параметрів взаємодії між сегментами і умов обробки.
- Використовували блок-сополімера полі (3-гексилтіофен) з полістиролом, що містив 20-30 % поліалкілтіофена для отримання нанопроволок діаметром 30-40 nm



Технологія локального синтезу вуглецевих нанотрубок

Dane Christensen, и др., США [2, стр.581-584]

- Локалізований, селективний і масштабовуваний процес сумісний з мікроелектронікою
- « на чіпі». Усуває необхідність постсинтетичного складання наноструктур для створення інтегральних улаштувань.
- Розміри синтезованих нанотрубок були 5-50 nm в діаметрі і до 7 μm в довжину. Швидкість росту була до 0.25 μm за хвилину

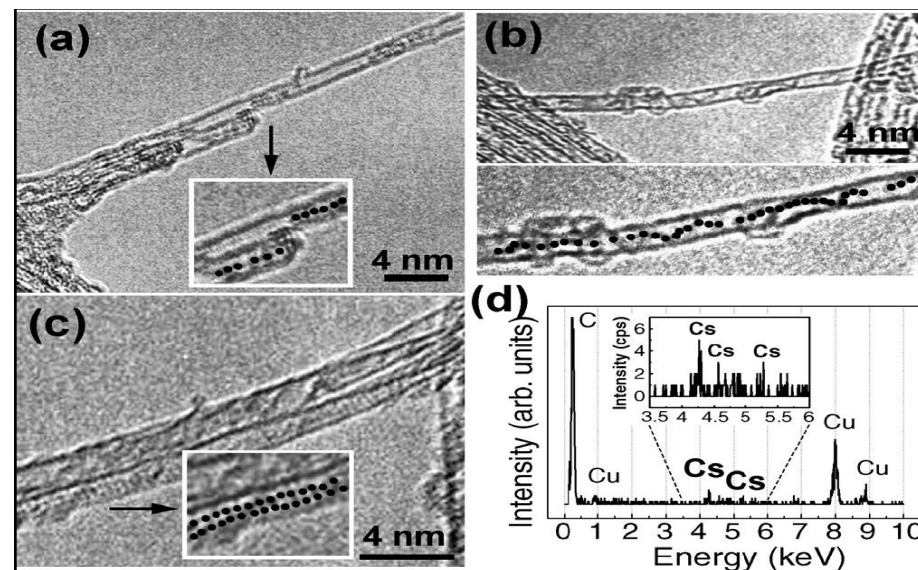
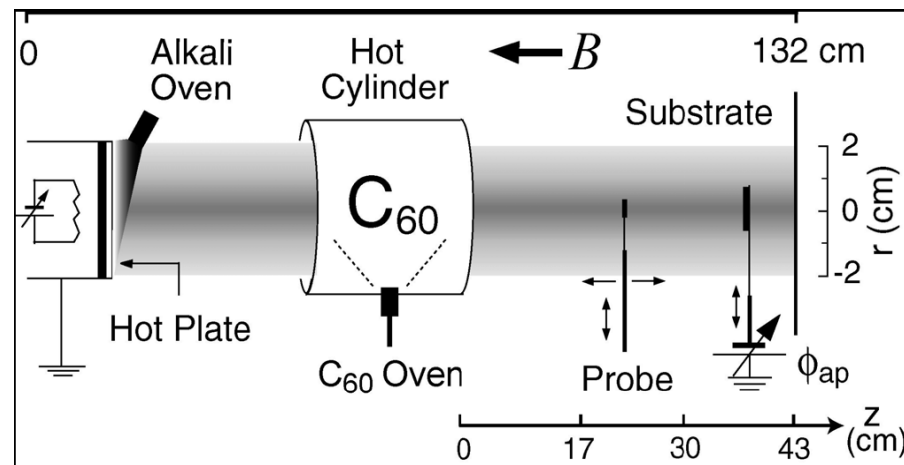


Продовження слайд 10

- Мікронагрівники для процесу синтезу виготовлені із кремнієвих мікроструктур (товщина провідного містка від 2 мкм до 40 мкм). Електро і теплоізолятором слугував шар двооксиду кремнія.
- Тонкий металевий шар каталізатора напилявся на цей чіп, товщиною, приблизно, 5 nm із чистого никелю, чистого заліза, або Ni Fe (80 % - 20 % по масі). Мікроструктури розміщали в вакуумну камеру при кімнатній температурі.
- Органічна фаза пару ацетилену (C_2H_2), вводилась при тиску 245 мтор і мікроструктура була нагріта шляхом пропускання електричного струму через резистивні кремнієві містки, щоб ініціювати процес синтезу нанотрубок.

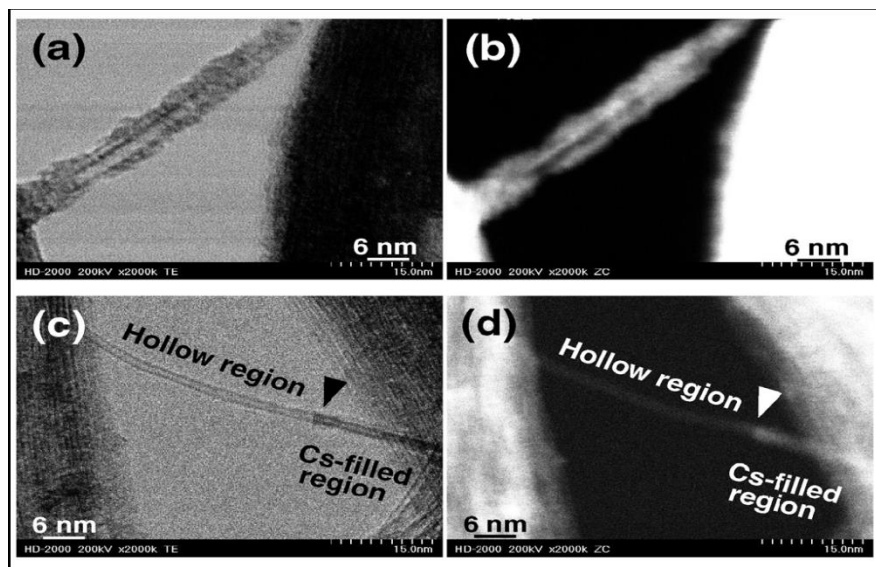
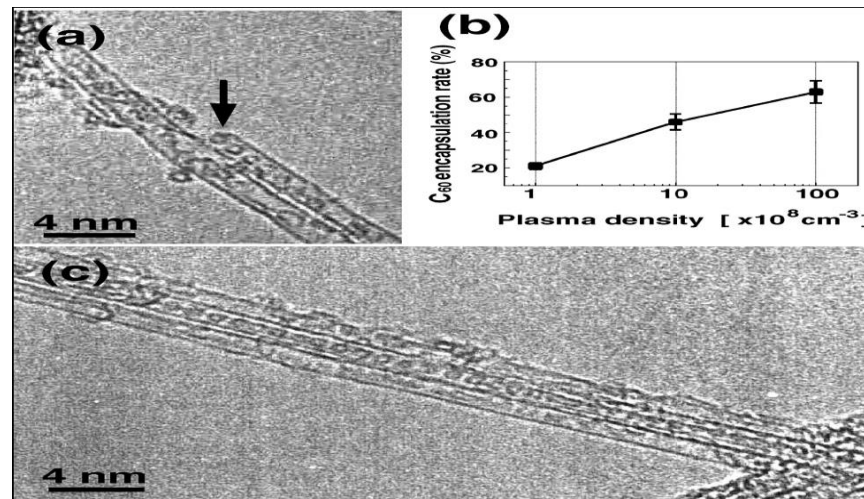
R. Hatakeyama и др. , Япония [2, стр. 623-626]

- Розробили новий метод інкапсулювання чужорідних елементів в одностінні вуглецеві нанотрубки, використовуючи опромінення їх іонами лужно-фуллеренової плазми при певній напрузі зміщення на підкладинці.
- При -100 В з використанням ПЕТМ ВЗ чітко видно лінійну і спіральну конфігурацію інтеркальованих в трубку окремих атомів Cs.



Нові можливості в створенні функціональних матеріалів для нанотехнологій

- Фулерен C_{60} сублімувався з порожнистої печі при $400^{\circ}C$ і в контакт з плазмою лужних металів, приєднував електрон, із-за великої спорідненості до електрону (2.65 еВ). В результаті, лужно-фулеренова плазма складалася із ($Li^{+} - C_{60}^{-}$, $Na^{+} - C_{60}^{-}$, $K^{+} - C_{60}^{-}$, $Cs^{+} - C_{60}^{-}$), при накладанні позитивної напруги до підкладинки (5-20 В) спостерігаються всередині нанотрубок самозібрані молекули фулеренів



Fumihito Arai, и др. Япония [2, стр. 811-814]

- Навели новий спосіб - індуковане електронним променем із еміттерів на основі вуглецевих нанотрубок, осаження двох видів органометалевих складів як прекурсорів, включаючи гексакарбоніл вольфрама
- $(W(CO)_6)$ і диметил-золото $((CH_3)_2(C_5H_7O_2)Au)$ для отримання провідних наноструктур на підкладинці, нанолитографії або нанопайці.

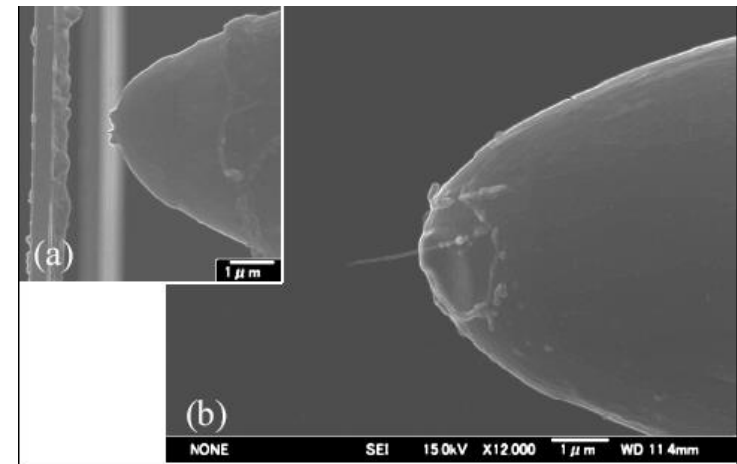


Table 4 Compositions in deposits from $W(CO)_6$

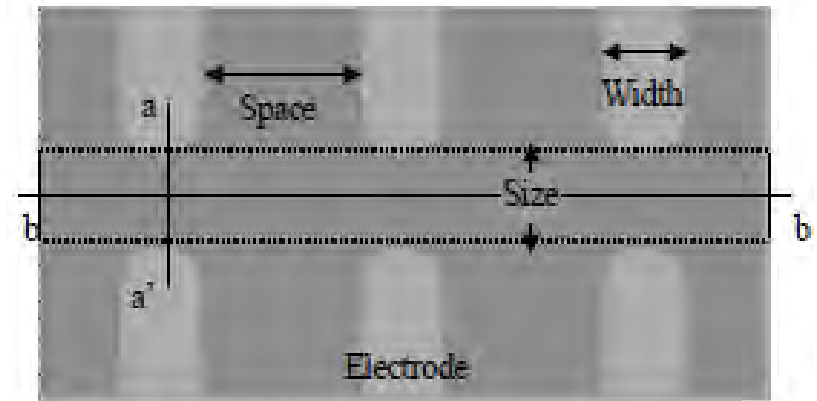
Compositions	keV	Mass%	Error%	Atomic quantity%
W	1.774	80.67	1.47	24.97
C	0.277	12.82	0.52	60.74
O	0.525	3.80	1.12	13.51
Au	2.121	2.72	2.65	0.78

Основна ідея - підвищити розрізнення осадів

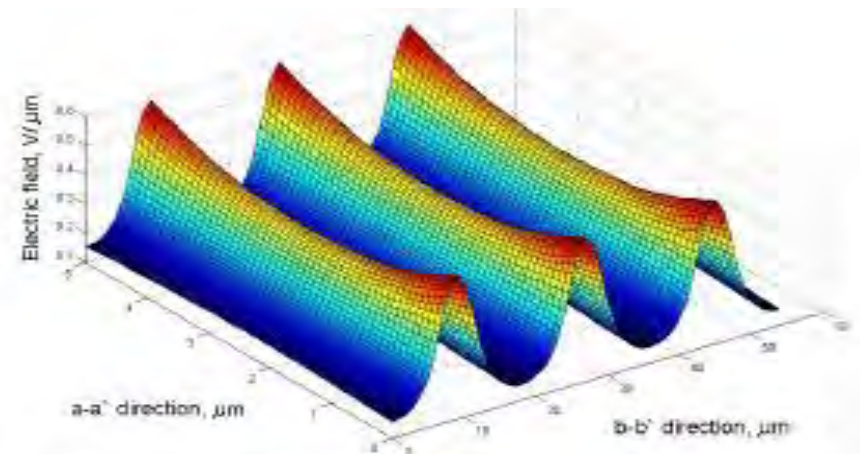
- За рахунок використання нанотрубок - емітерів з гранично малими геометричними розмірами стає можливим досягти максимального розрізнення продуктів осаду.
- Вуглецеву трубку прикріплювали до вершини кантилевера силового мікроскоп і використовували як катод, а підложка служила анодом. Ефективність осадження з використанням вуглецевих трубок виявилась (по вольфраму) в 1,5 раза вищою порівняно з штатним засобом) досягнуто осадження до 80 % вольфраму від його кількості в суміші).
- Вуглецеві нанотрубки як джерела польової емісії добре відомі . Вони можуть працювати при низьких напругах зміщення в плоских панелях дисплів, мікрохвильових генераторів, рентгенівських джерелах, газорозрядних трубках та ін.

Можливості масового виробництва приладів, основаних на вуглецевих нанотрубках. представлено *Jaehyun Chung, и др., США [1, стр. 331-334].*

- Наведено метод керованого збирання з використанням складного електричного поля із змінного поля в комбінації з постійним електричним полем. Взаємодія електричних полів з нанотрубками дозволили здійснити складний технологічний процес - орієнтування і установа в заданому положенні (позиціювання) окремої багатостінної вуглецевої нанотрубки.



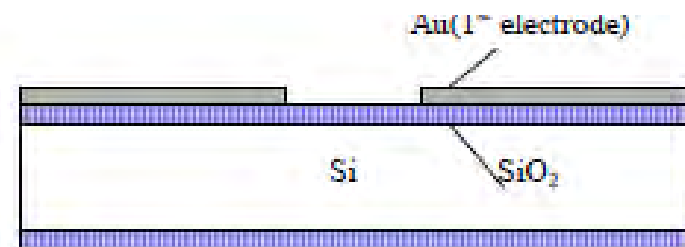
(a) Three pairs of electrodes



(b) Simulation results of an array

Figure 1. Electric field distribution in an array

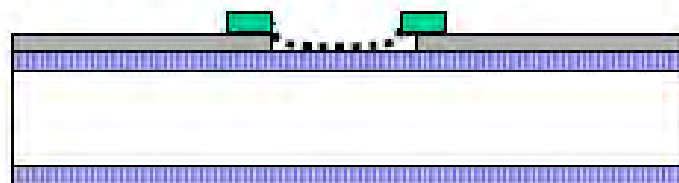
Технологічна схема



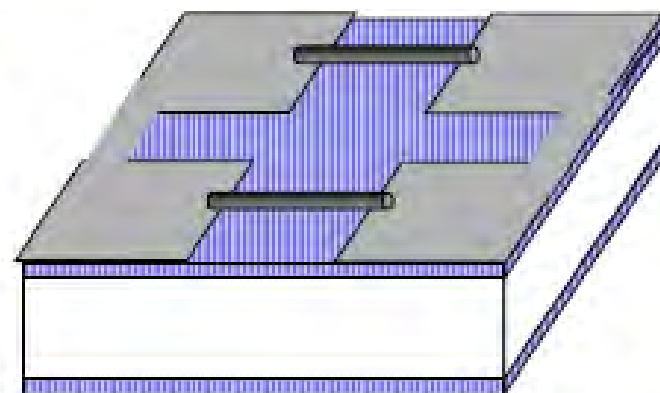
(a) Oxidation, patterning and Au deposition(500Å)



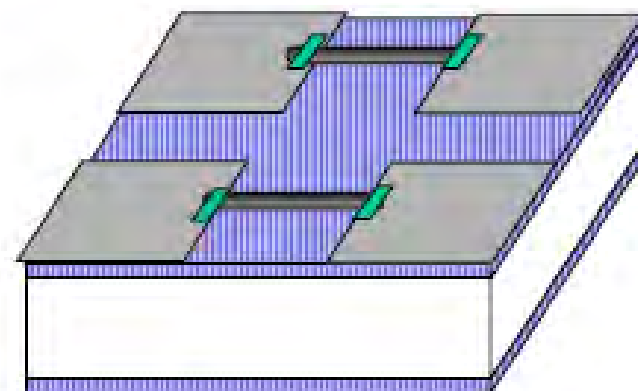
(b) CNT deposition (CEGA)



(c) Patterning, Ti+Au (2nd electrodes) deposition and electrode separation



(b') CNT deposition



(c') Electrode separation

Figure 3. CNT array fabrication

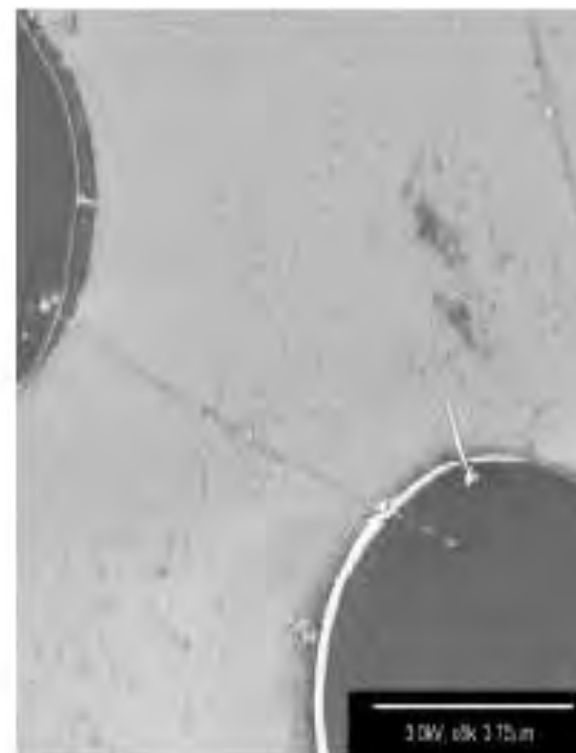
Деякі приклади позиціювання трубок



(a)



(b)



(c)

Figure 4. Deposition cases (a) multiple depositions $E_{dc}/E_{ac}=0.399$ (b) failure of CNT crossing $E_{dc}/E_{ac}=0.322$.
(c) successful deposition case at $E_{dc}/E_{ac}=0.348$.

Shengdong Li и др. США [1, стр. 256-258

одностінні горизонтально орієнтовані вуглецеві нанотрубки

- Для розвитку гігагерцового діапазону електроніки в якості електричного нанорезонатору автори методом СВД синтезували надзвичайно довгі трубки і У-з'єднання, які дуже важливі для розвитку наноелектроніки. Катализатор складався з 1.25 ммоль Fe_2O_3 / 0.7 ммоль MoO_3 /2.0 грамма наночастинок оксида алюмінія С (Дегусса) і води. Две капли этой суспензии добавлялись в фоторезист . Далі-традиційно.

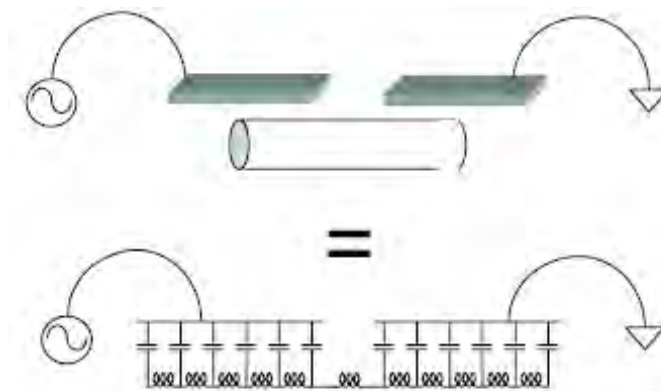


Fig. 1. Predicted effective circuit model for capacitively contacted nanotube.



Fig. 2. SEM image of a single walled carbon nanotube. Length is 60 μm.

Деякі приклади вуглецевих структур

- Після нагріву зразка в кварcovій трубi до 900 С в систему вводили потiк метан – водородної сумiшi на протязом 12 хвилин. Процес вели в атмосферi аргону. На наночастинках каталiзатора спостерiгався рiст нанотрубок в областi, де каталiзатор був однородним. На цих каталiзаторах був також рiст Y-об'єднаних нанотрубок.

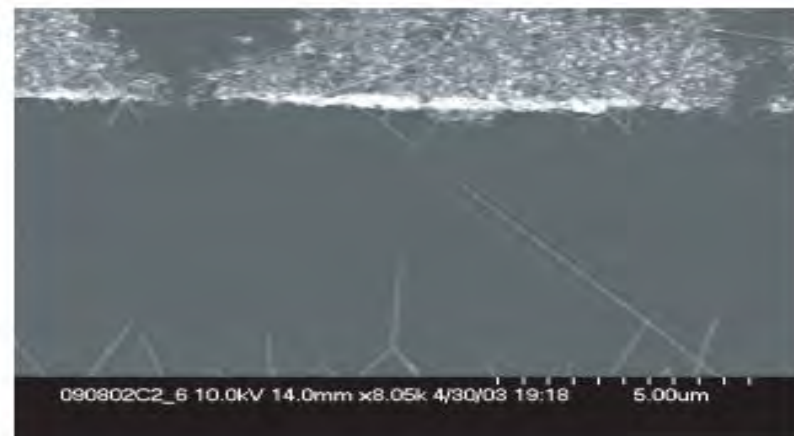


Fig. 3. SEM images of Y-junction.

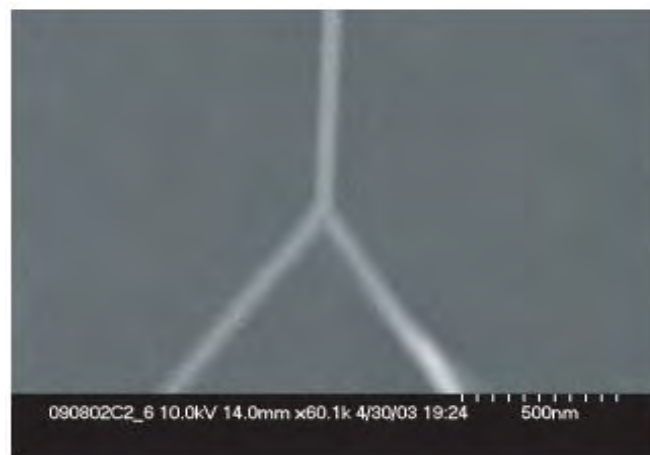


Fig. 4. High resolution SEM image of Y-junction.

Алмазні плівки із наночастинок 6-25 нм (Joel De Jesus и др. , США [2, стр. 480-483])

- В вакуумную камеру, которая откачивалась до 10^{-6} торр перед подачей газов. Смесь
- 2 % CH_4 и 500 промилей H_2S , разбавленного в H_2 непрерывно поступала в зону реакции при постоянном давлении 20 торр. Подложки были независимо нагреты до 900 °C. Ренийевая нить накаливания, температура которой поддерживалась около 2500 °C для активации газовой фазы, располагалась на 8 мм выше подложки. Две параллельные молибденовые пластинки, размерами 4.5 см x 5 см x 1 мм, были размещены перпендикулярно к пластине подложки так, чтобы приложенное к ним поле было параллельно плоскости осаждения пленки. За два часа пленки вырастали от 0.8 до 1.0 мм в толщине.

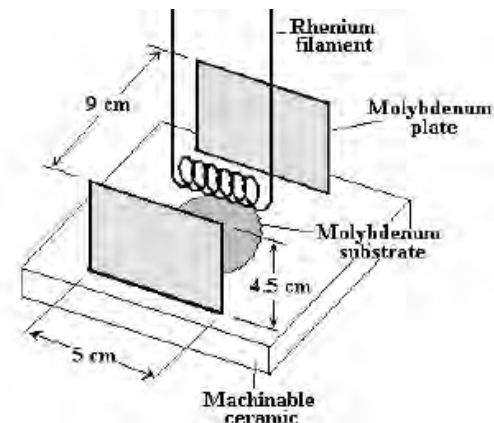


Figure 1. Parallel Bias HFCVD set-up

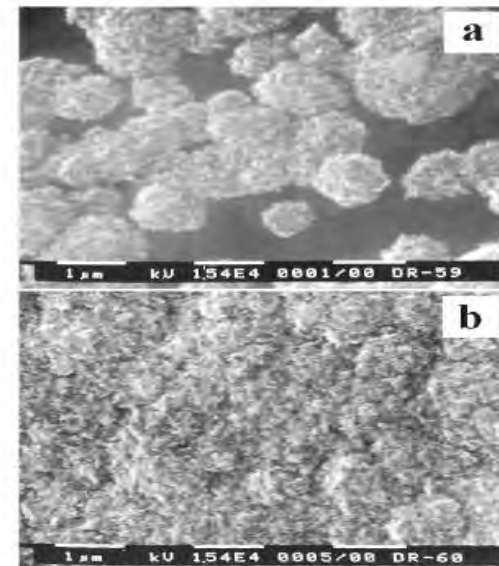


Figure 2. SEM images of n-D films grown (a) without and (b) with a parallel bias of 800 V.

Виготовлення 2Д и 3Д структур з використанням оптичного пінцету і хімічної зборки (Kenneth Castelino и др. США [1, стр. 56-59])

- оптичний пінцет використовується як універсальний інструмент для безконтактних маніпуляцій з частинками мікрометричного розміру, а спрямовані хімічні зв'язки між частинками забезпечують виготовлення 2-D і 3-D мікро/наноструктур

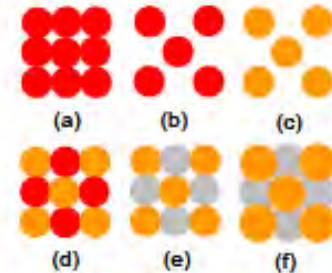


Figure 1. (a) An array of optical traps, (b) pattern for type I particle, (c) type I particles trapped, (d) pattern for type II particle, (e) type II particles trapped, (f) particles linked to form a microstructure.

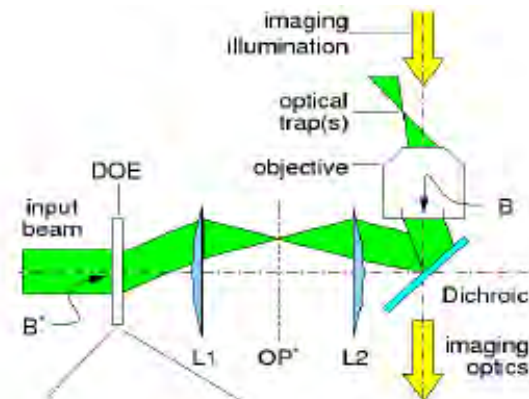


Figure 2. Holographic optical tweezer system [10]

Різні прийоми зшивки структур

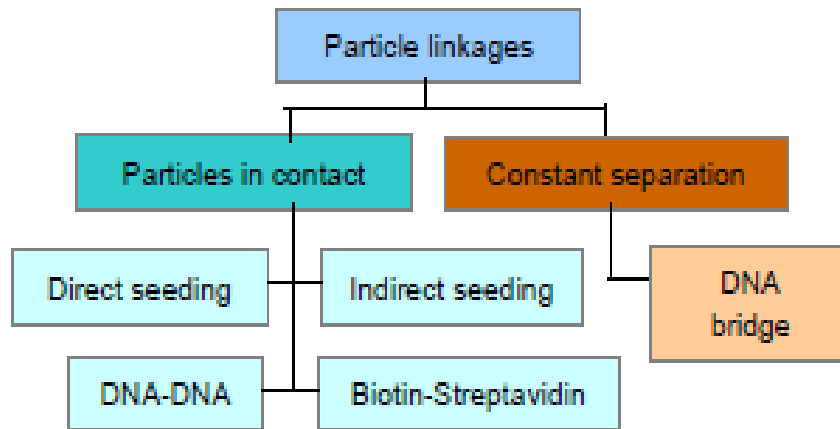
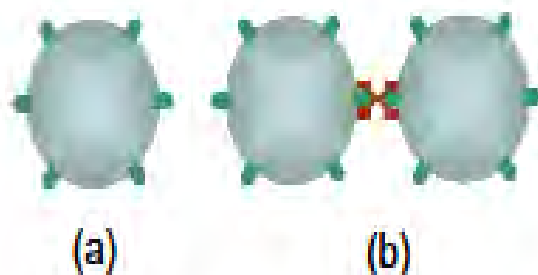
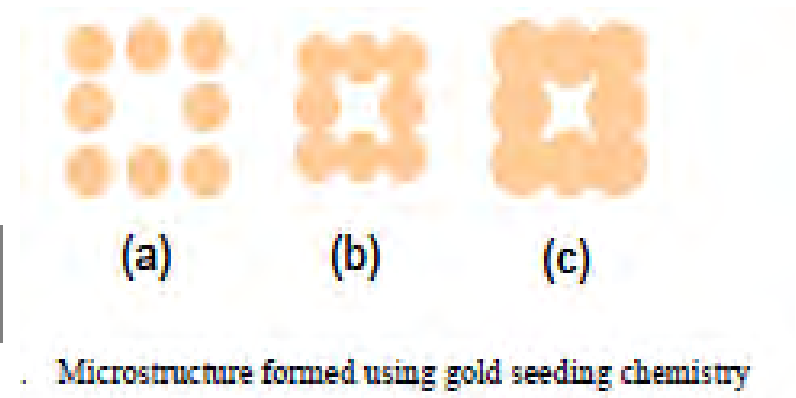
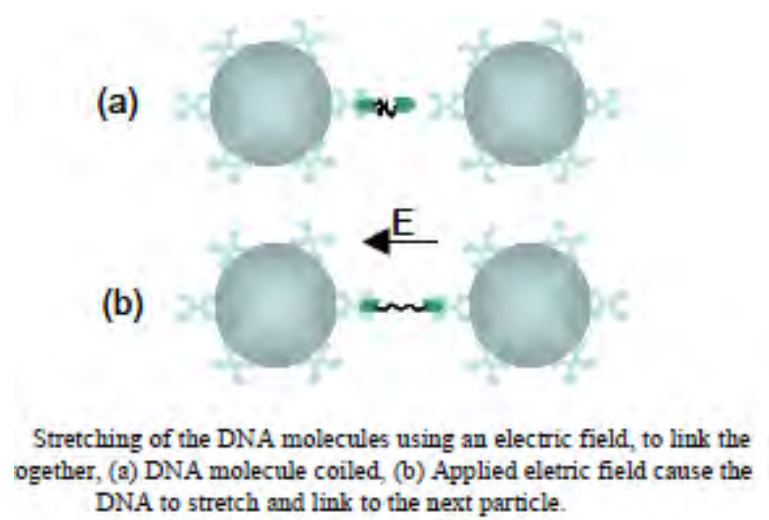


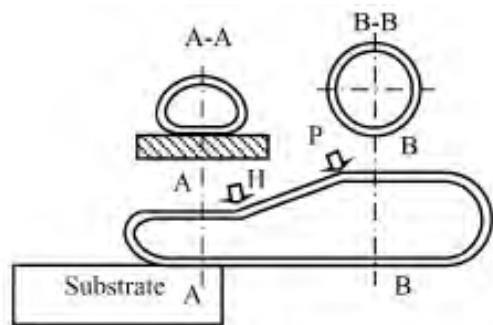
Figure 3. Different linkage chemistries



i. Microstructure formed using biotin-streptavidin linkage. (a) A biotin coated polystyrene particle, (b) streptavidin linkage formed between particles.



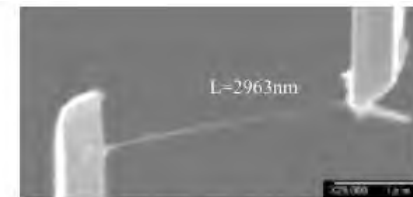
Lixin Dong и др. , Япония [1, стр.144-147] Нові методи контролю довжини нанотрубок з використанням нанороботизованих маніпуляторів



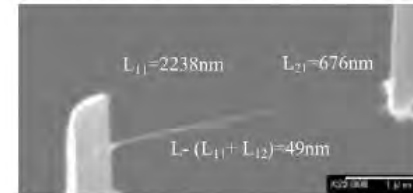
(a) Stressing a CNT by van der Waals Clamping Force



(b) After Destructive Pulling



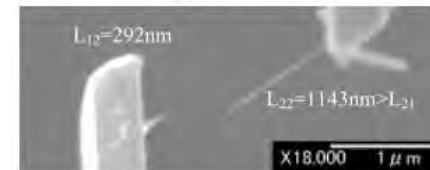
(a) Characterize a CNT with 2 Mobile AFM Probes



(b) Electric Breaking down of a CNT



(a) Alignment of the Tubes



(b) Left Tube (Anode) Shortened

Figure 5. Shortening Nanotubes by Large Field Emission Current

Amrinder S. Nain and Metin Sitti , США [1, стр.60- 63]

- Пропонується використовувати атомно-силовий мікроскоп для 3-D виробництва нановолокон за рахунок контрольованого витягування рідкого або термореактивного полімеру нанозондом з точним контролем його 3-D траєкторії, відповідно до побудованої форми, температури охолодження або вулканізації в реальному часі.
- Цей новий метод вимагає розробки і застосування нових типів полімерів і дуже гострих полімерних зондів для силових мікроскопів.
-

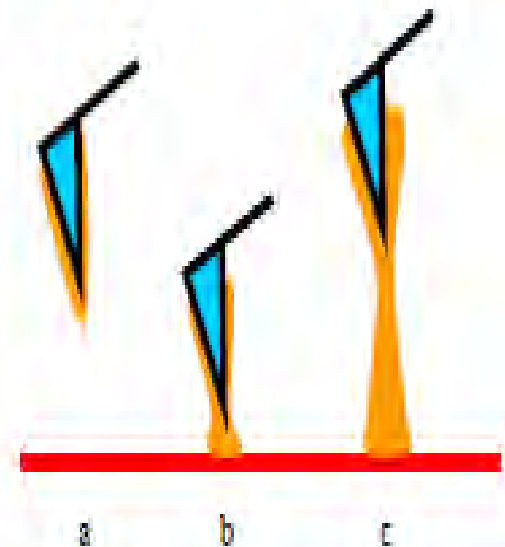


Figure 1. (a) AFM with polymer, (b) AFM+polymer making contact with heated substrate, (c) AFM retracted, forming a nano-fiber and curing of polymer starts

S. A. Harfenist идр. [2, стр.557-560]

- Атомно-силовий мікроскоп використовувався в якості маніпулятора для виготовлення автономних і підвісних тривимірних полімерних структур, струмопровідних композитів, локальних оптичних волокон і т. д.

У роботі використовувався поліметилметакрилат, розчинений в хлорбензолі. Зонд мікроскопа вставлявся в крапельку полімерного розчину, нанесену на кремнієву або скляну підкладку. Як тільки хлорбензол випаровувався, поліметилметакрилат підвищував свою в'язкість і коли наконечник витягувався з полімеру, волокно кріпилося до його верхньої частини.

Тепер волокно можна витягнути на довжину мікроскопа розгортки, переміщаючи підкладку. Автори мали можливість витягувати волокно на довжину до 1 см. Діаметр волокна визначався швидкістю витягування.

Для створення струмопровідної композиції колоїдну фарбу срібла диспергували в розчині поліметилметакрилату в пропорції 1:1.

Daniel J. Arbuckle и Aristides A.G. Requicha, США [1, стр. 72-74]

- продемонстровано можливість запису креслень або схем на поверхні за допомогою багатьох голок у скануючому зондовому мікроскопі, завдяки чому продуктивність літографії зростає пропорційно кількості використовуваних голок.
- В даний час напівпровідниковими технологічними методами освоєно виробництво сотень і тисяч голок, а в майбутньому їх може виявитися до мільйона, що дозволить організувати «перо» - нанолітографію для масових процесів нановиробництва.
-

надійний метод виготовлення дуже тонких скануючих голок і мікропіпеток представлений в роботі китайських вчених з Гонконгу

King W. C. Lai и др. [1, стр. 152-155].

- Застосовується метод хімічного травлення тонкого кварцового волокна діаметром 125 мкм або капіляра з внутрішнім діаметром 2 мкм і зовнішнім діаметром 126 мкм з використанням фториду водню і органічного розчинника (р-ксилолу).
- Використовуючи цю нову технологію, з відповідним вибором органічного розчинника та правильним травленням, можна швидко та відносно легко отримати нанометричні вершинні зонди в лабораторії.

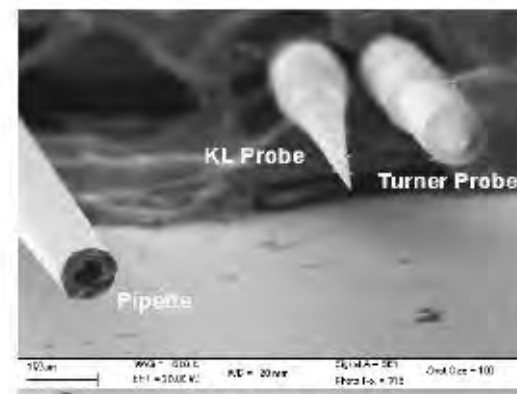
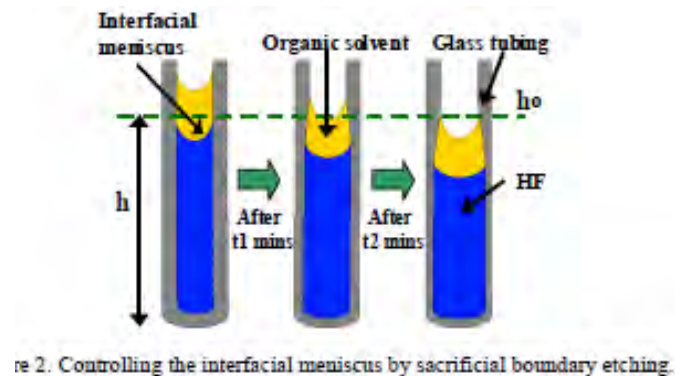


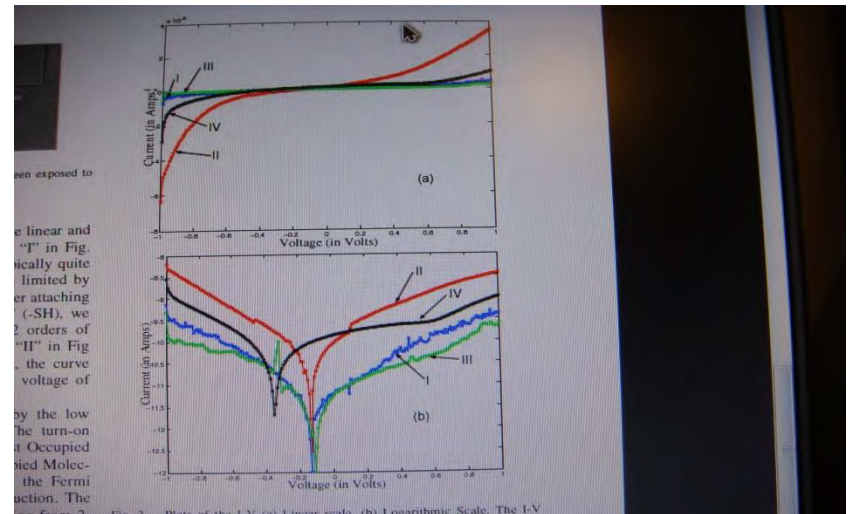
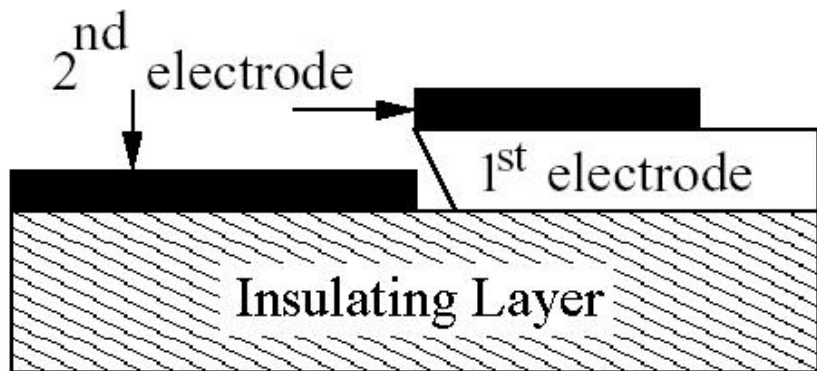
Figure 4. SEM picture of a KL Probe, a Turner Probe, and a conventional pipette. The scale bar is 100 μm.

Masahiro Nakajima, и др. , Япония [1, стр. 156-159]

- Для управління нанорозмірними об'єктами, схожими на вуглецеві трубки, була створена нанороботизована маніпуляційна система (нанолабораторія), яка має нанорозмірну роздільну здатність положення об'єкта, відносно велику робочу площу і в цілому 16 ступенів свободи в чотирьох незалежних маніпуляторах для складних дій всередині польово-емісійного скануючого електронного мікроскопа. Це відкриває нову область досліджень і проектування нанопристроїв в 3-D просторі.

У даній роботі вперше вдалося провести вимірювання на одному і тому ж зразку модуля пружності вуглецевої нанотрубки при поздовжньому вигині контилівером (E_b) силового мікроскопа і з електромеханічним резонансом (E_e).

Електронна провідність ДНК, приєднаної до золотих електродів



- ДНК синтезовані з кінцевими тіолними S-H групами, що забезпечує сильний зв'язок з золотими електродами

Вуглецеві нанотрубки- основа майбутньої наноелектроніки.

- Тенденція мініатюризації електроніки з відкриттям нових наноструктурованих матеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки і напівпровідникові нанодроти, впроваджує все більш тонкі, складні нанотехнології.
- Вуглецеві трубки, зокрема, одностінні, володіють унікальними електричними (балістичний перенос на невеликі відстані; струм в трубах малого діаметра досягає насичення на рівні 25 мА), механічними (модуль Юнга більше, ніж у алмазу) тепловими властивостями (теплопровідність в 5 разів більше, ніж у міді), що визначає їх відмінні перспективи використання в наноелектроніці майбутнього.

-

S. J. Wind и др. , США [1, с.236-239] досліджували прогрес у підвищенні продуктивності польових транзисторів на основі вуглецевих нанотрубок

- Висока продуктивність була отримана в пристроях, де використовувався затвор, розташований поверх нанотрубки. Діелектрик затвора товщиною 15 нм SiO_2 осідав шляхом хімічного осадження пари. Електрод затвора товщиною 50 нм Ti , нанесений електронно-променевою літографією.
- У цьому польовому транзисторі співвідношення включення/виключення I становило 10^6 , порогова напруга $\sim 0,5$ В, а хороші вихідні характеристики і функціонування транзистора вже були забезпечені на рівні 1 В.

Досягнуті параметри польових транзисторів з вуглецевими нанотрубками можна порівняти або перевершити кращі аналогічні пристрої на основі кремнію, що послужило підставою для припущення авторів про їх придатність для використання в наноелектроніці майбутнього.

- **L. Marty и др., Франція[1, 240-243] для польових транзисторів.**
- **розроблено оригінальний самоорганізований процес вирощування** одностінних вуглецевих трубок, заснований на хімічному осадженні парів за допомогою гарячої нитки розжарювання. Дане розташування надтонкої плівки СО каталізатора у верхній частині електродів дозволило локалізувати ріст нанотрубок і закрити провідником два покритих електрода за рахунок підвищеної при осадженні нанотрубки. Процес проводився в кварцовій печі і починався з відпалу субстрату в атмосфері водню. **В якості вуглецевої сировини використовувалася високорозбавлена газова суміш метану 5-20% у водні.**
- Субстрат нагрівався до 800 С, нитка розжарювання досягала 2000-
- 2100 , 3 . **Показано, що в цих умовах спостерігається зростання одностінних нанотрубок високої чистоти із середнім діаметром 1,2 нм – 1,5 нм.**
- Їх щільність і діаметр можуть змінюватися в залежності від технологічних параметрів і товщини шару Со. Висока температура нитки розжарювання забезпечує **наявність атомарного водню, який, як вважають, відіграє важливу роль у чистоті нанотрубок.**
-

Toshishige Yamada, США [1, стр. 244-247]

- Запропоновано модель для пояснення нижчого бар'єру Шотткі для отворів у повітрі, ніж для вакууму в металевому електроді/напівпровідниковому переході вуглецевих нанотрубок.
- Автор розглядає з'єднання Шотткі як сендвіч-структуру, що складається з об'ємного електрода з золота, скупчень золота на поверхні електрода, заряджених молекул кисню і поверхні вуглецевої нанотрубки (перехідна область між електродом і нанотрубною), де потенціал може бути значно знижений. Окислення повинно збільшити це падіння потенціалу, що призведе до відповідного зниження бар'єру Шотткі.
- Складається враження, що цей механізм домінує в р- і n-вуглецевих нанотрубках, так як розглянута модель дозволяє послідовно пояснити і узгодити наявні експериментальні результати.
-

Quoc Ngo, та ін., США [1, 252-255]

- Були вивчені різні механізми транспорту електронів в традиційних металевих і металевих / вуглецевих нанотрубкових системах, які дають збільшення контактної опору, і ці різні поведінки були пояснені поверхневими явищами на межі розділу фаз.
- З аналізу автори прийшли до висновку, що тунелювання є єдиним механізмом, за допомогою якого електрони можуть перетинати бар'єр метал/вуглецева нанотрубка.
-

J. Naruyama, и др. Япония [2, стр. 627- 630 }

- повідомляється про спостереження надструмів через багатостінні вуглецеві нанотрубки в режимі дифузійного перенесення носіїв, що має слабку локалізацію в ніобієвій ($T_c = 8,1-9$ K) / дифузній багатостінній нанотрубці ($T_c = 0,6$ K) / алюмінієвій ($T_c = 1,2$ K) контактній системі. Автори визначили близькість (за температурами переходу) - індуковану надпровідність і надструми при $T = 0,6$ K.
- Цікаво, що критичне магнітне поле (N_s) для цієї системи виявилось в 35 разів більше, ніж для Nb електродів. Причина такого високого H_c не ясна. Автори вважають, що через сильну спінову когерентність і перешкоди для спінових сингулярностей лише зі слабкою взаємодією електронів, багатостінні нанотрубки повинні бути молекулярно придатними для надпровідності, квантових обчислень тощо.
-

Slava V. Rotkin , США [стр. 631-634]

- представив теорію нового оптоелектронного перемикача на основі вуглецевої нанотрубки, в якій локальний затвор може бути реалізований на молекулярному рівні, шляхом приєднання молекули до поверхні вуглецевої нанотрубки.
- Комутаційний органічний молекулярний комплекс складається з двох частин: приєднаної (закріпленої до бічної стінки нанотрубки) і дипольної зарядженої частини. Швидкий наномеханічний рух зарядженої частини молекули, яке викликане поглинанням фотона з подальшою ізомеризацією, виробляє електростатичну модуляцію потенціалу на поверхні трубки довжиною в кілька нанометрів, тобто в результаті резонансного впливу світла досягається локальне електростатичне управління пропусканням струму нанотрубки.
- Вважається, що заряд комутуючої молекули або отриманий диполь створює електростатичний бар'єр для руху носіїв заряду нанотрубки, що викличе їх розсіювання і зниження провідності.

•

John F. Davis и др. [т.2, стр. 635-638]

- У роботі повідомляється про розробку компактного високоякісного механічного резонатора (фільтра високих частот) на основі масиву вертикальних вуглецевих нанотрубок, вбудованих у високочастотний хвилевід. Трубки синтезували матричним методом в анодованих алюмінієвих плівках шляхом піролізу ацетилену при 700 градусах за Цельсієм.
- Електричний контакт між безліччю трубок забезпечував молібденовий електрод. Отримані дані дозволяють пов'язати передачу радіочастотного сигналу через цей фільтр з механічним резонансом в вуглецевих провідних нанотрубках, тобто масив трубок відображає всі падаючі частоти, крім резонансної механічної частоти нанотрубок.
- Прикладаючи напругу зміщення до трубок (змінюючи кількість накопиченого заряду в кожній нанотрубці, і тим самим змінюючи силу електростатичної взаємодії між ними в масиві нанотрубок), можна плавно регулювати механічну резонансну частоту.

-

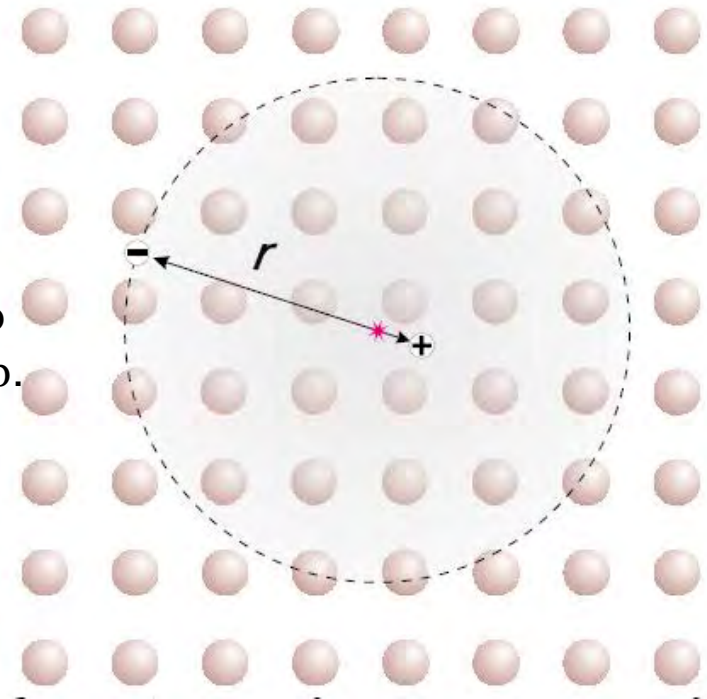
I. A . Levitsky и др., США [2, стр. 619-622]

- Вивчено чутливість одностінних вуглецевих нанотрубок при безперервному освітленні в ближньому (900-1800 нм) та далекому інфрачервоному (9-10 мкм) діапазонах. Вперше спостерігалася чітка кореляція між фотострумом, ІЧ-експозицією і прикладеним напругою зміщення. Зразки одностінних вуглецевих нанотрубок демонстрували поглинання в ближній інфрачервоній області, характерне для напівпровідникових нанотрубок з розподіленим діаметром 0,8-1,1 нм і смугою в 10 мкм в далекому інфрачервоному діапазоні, що пов'язано з поглинанням молекул води, що межують з нанотрубками або заповнюють їх внутрішній простір.
- Спостережуване явище може бути використано для розробки нового типу ІЧ-детекторів на основі унікальних фотофізичних властивостей вуглецевих нанотрубок: низького рівня шуму, викликаного зниженою електрон-фононою взаємодією в 1-D системі, можливості швидкого регулювання забороненої зони шляхом зміни діаметра нанотрубок і придушення темного струму польовим ефектом.
-
-



ЕКСИТОН – гідрогеноподібна квазічасточка, що складається з електрона та дірки, та не пов'язана з переносом заряду або маси в системі

- ✓ Поняття “екситон” введено Я.І. Френкелем в 1931р
- ✓ Виявлено в напівпровідниках Е.Ф. Гроссом в 1951р.



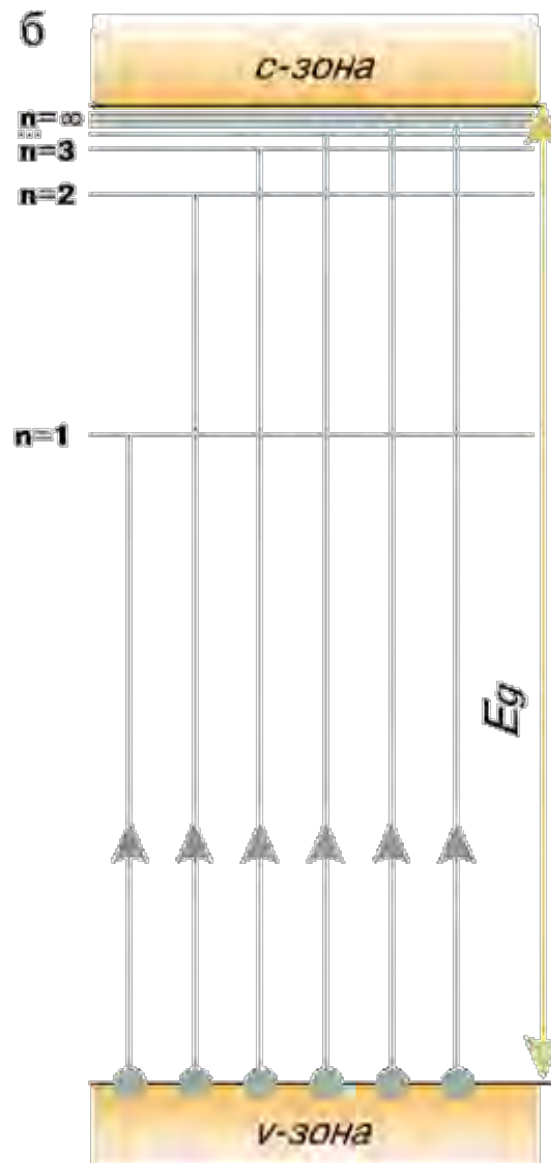
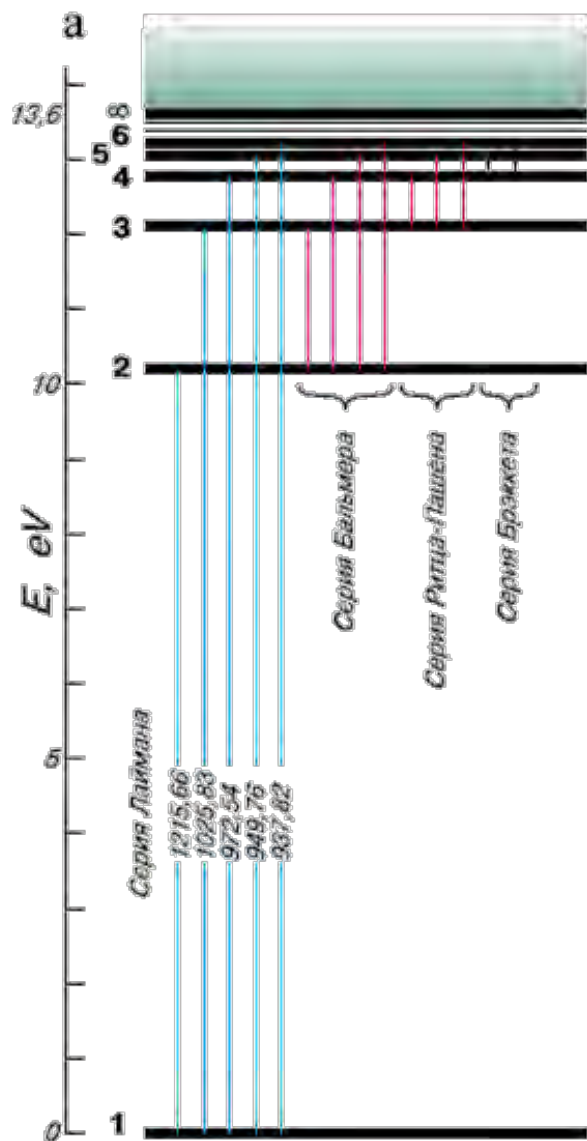
Екситон
Френкеля

- Екситони малого радіусу
- $R_{ex} < a_0$

Екситон
Ваньє-
Мотта

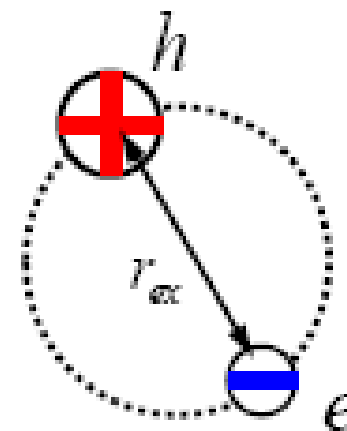
- Екситони великого радіусу
- $R_{ex} > a_0$

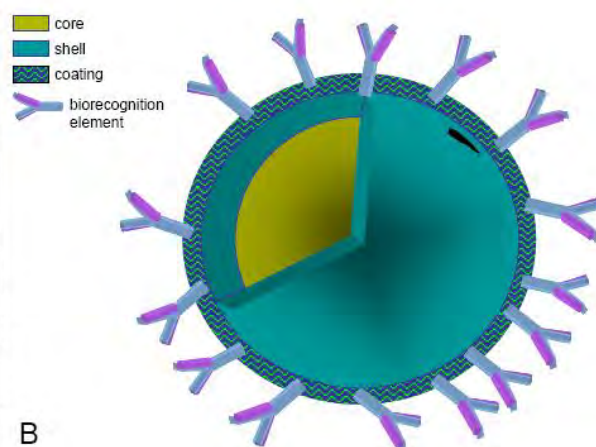
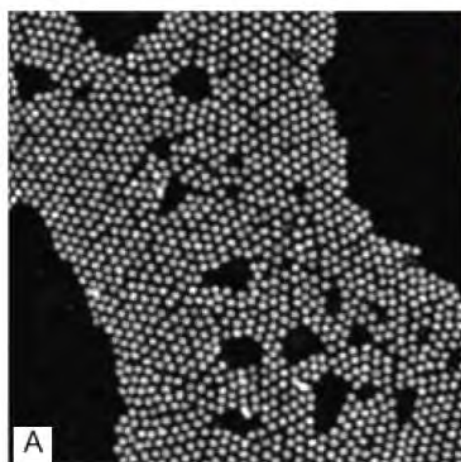
Виявлено для
напівпровідників!



Структура спектральних ліній:
А) Гідрогена
Б) Екситона

$$e^* = e / \sqrt{\kappa_0} .$$

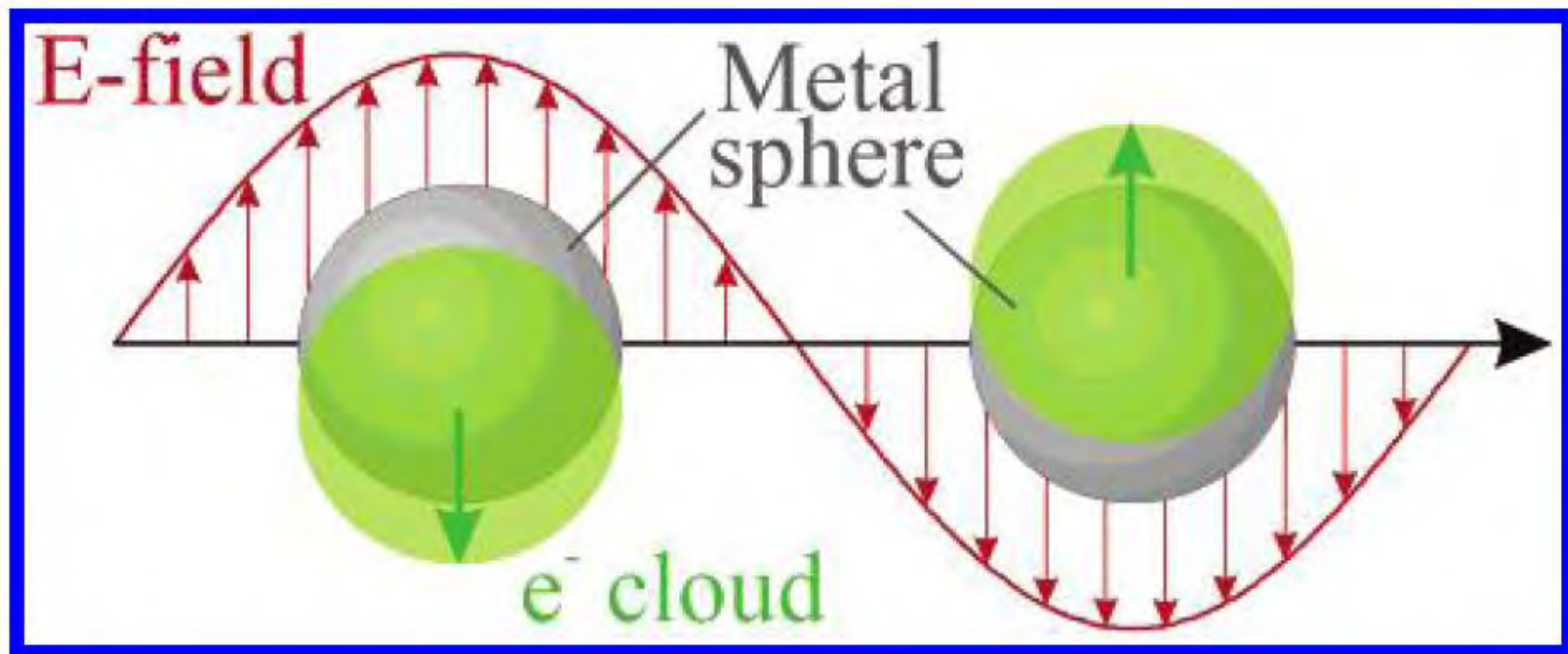


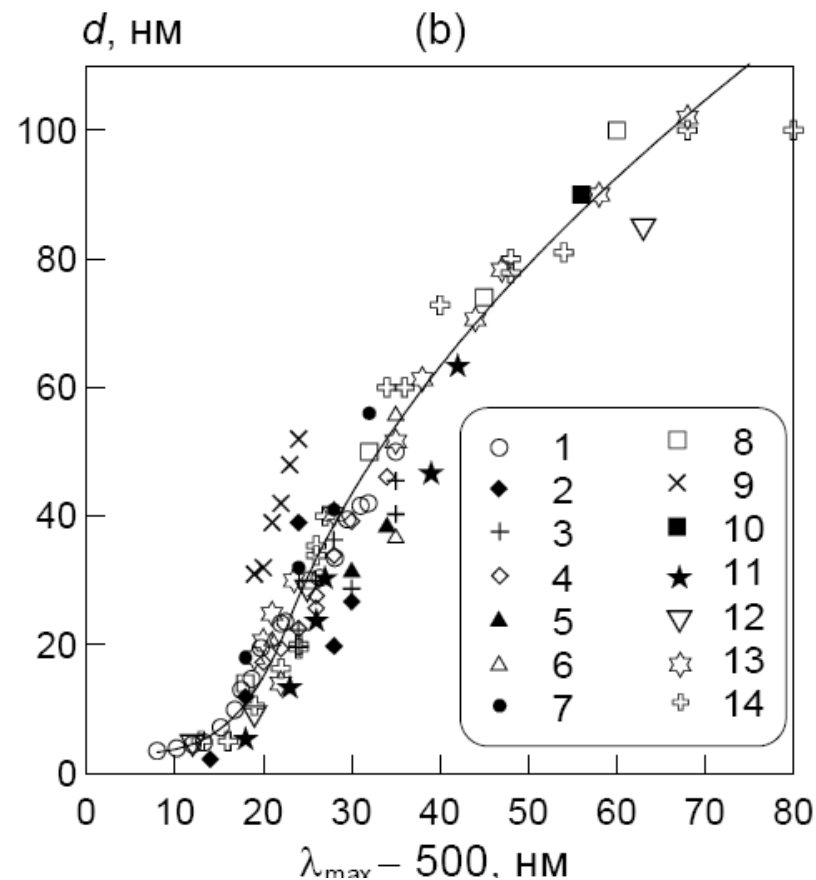
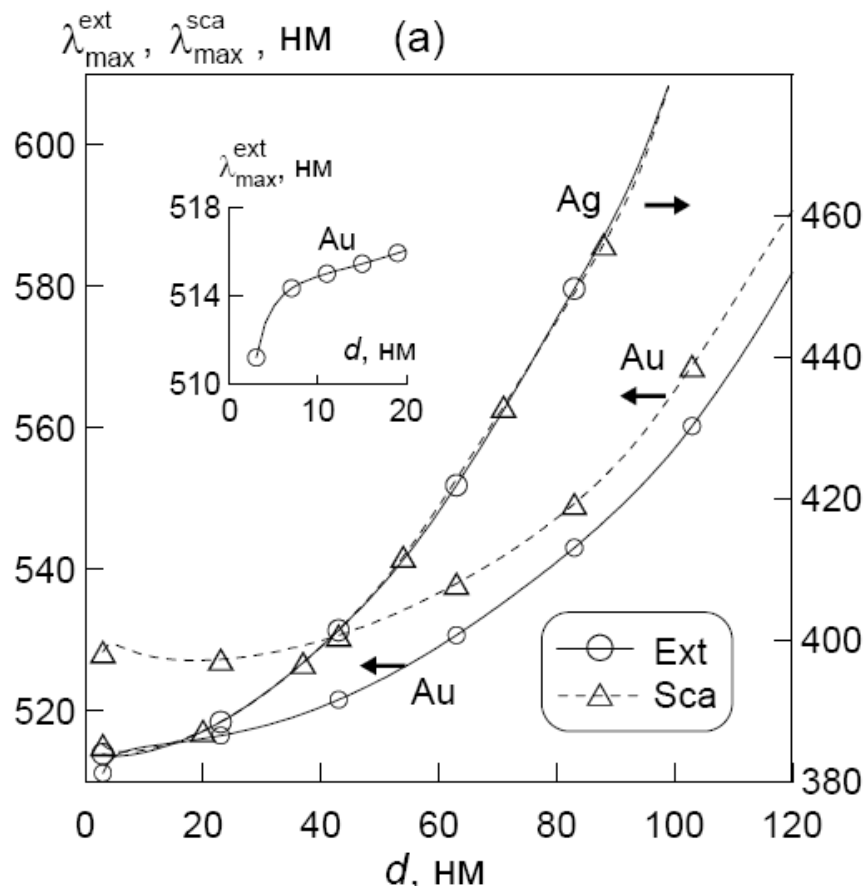


Розмірно-залежні:

- Смуги оптичного поглинання;
- Смуги люмінесценції;
- провідність.

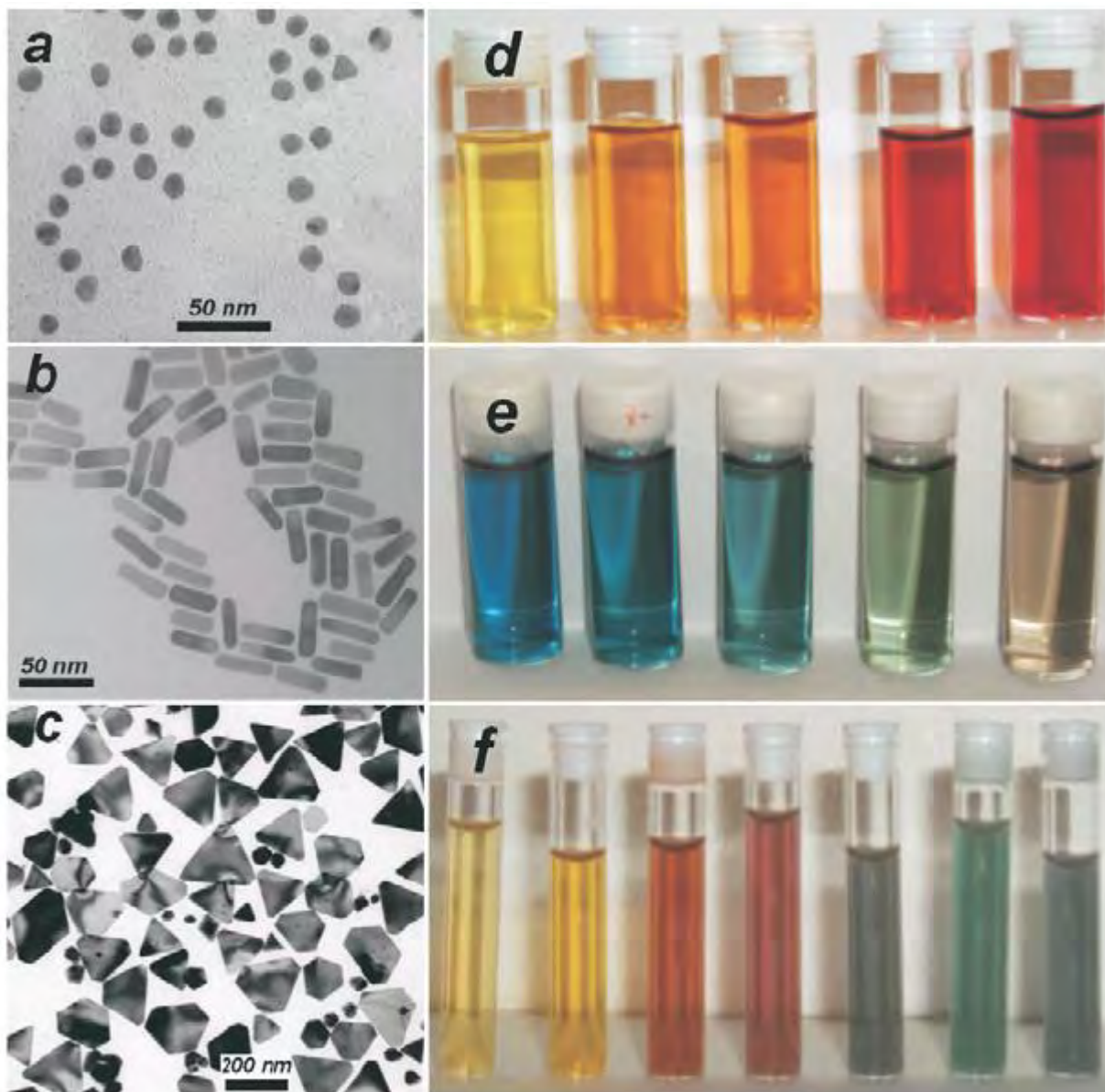
<i>Core Composition</i>	<i>Size Range (nm)</i>	<i>Emission Range, reference</i>
ZnSe	~4.3-6.0	UV, Visible (Size dependent), [7,8]
ZnSe:Mn	~2.7~6.3	UV, Visible (Size dependent), [9]
CdSe	~1.0 up to 25	Visible, [1,3,10-14]
CdS	~1.0-6.0	UV, Visible (Size dependent), [3,8,15]
CdTe	~2.0-8.0	Visible, [3,15]
InP	3.0-4.6	UV, Visible, Near IR (Size dependent)
	~2.6-4.6	[1,16]
InAs	2.8-6.0	IR, [1]
GaP	~2.0-3.0	UV, Visible (Size dependent), [16]
GaInP ₂	~2.5-6.5	UV, Visible (Size dependent), [16]
PbSe	3-8 (small), 8-12 (large)	Near/mid-IR (Size dependent), [17-19]
SnTe	4.5-15	Mid-IR, [20]

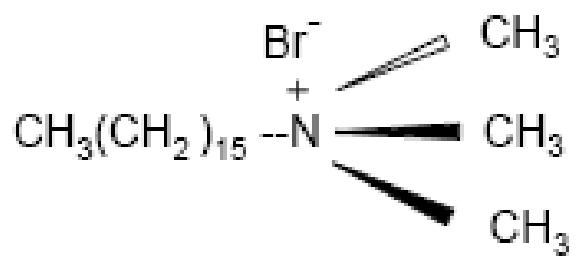
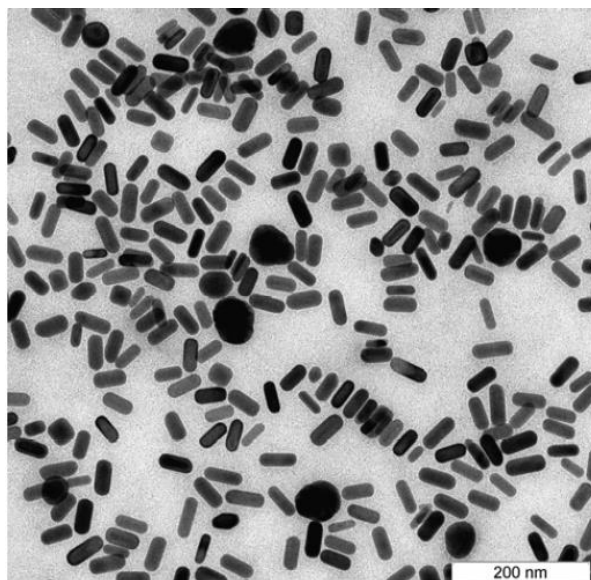




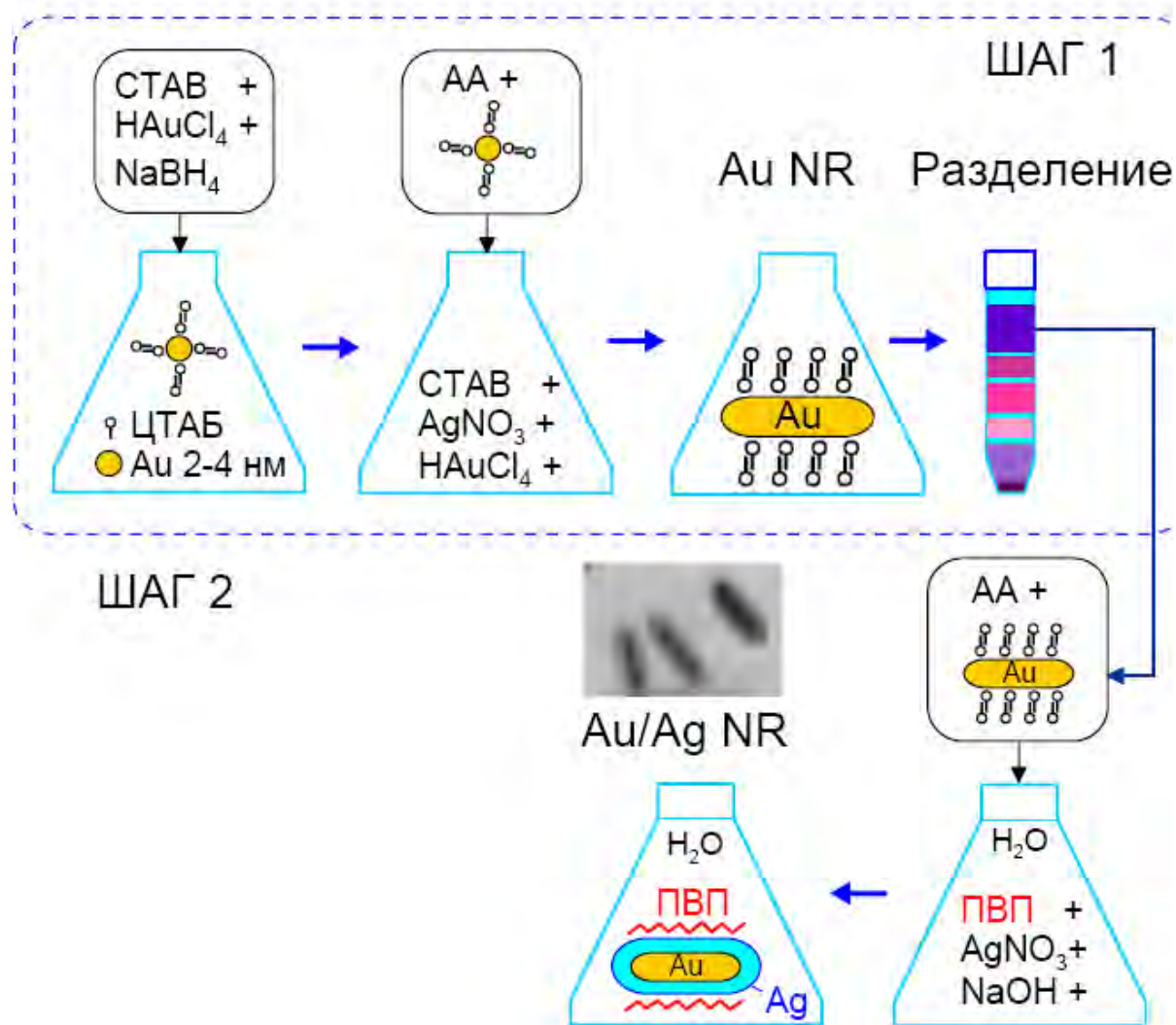
Залежність резонансних довжин хвиль екстинкції від розміру наночастинок золота

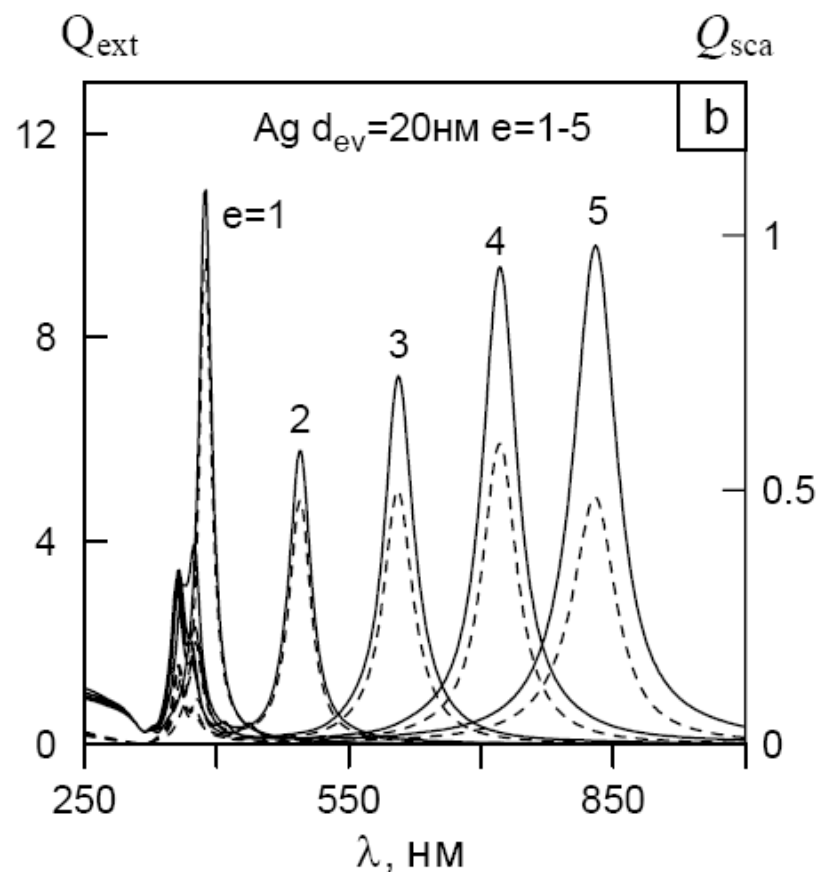
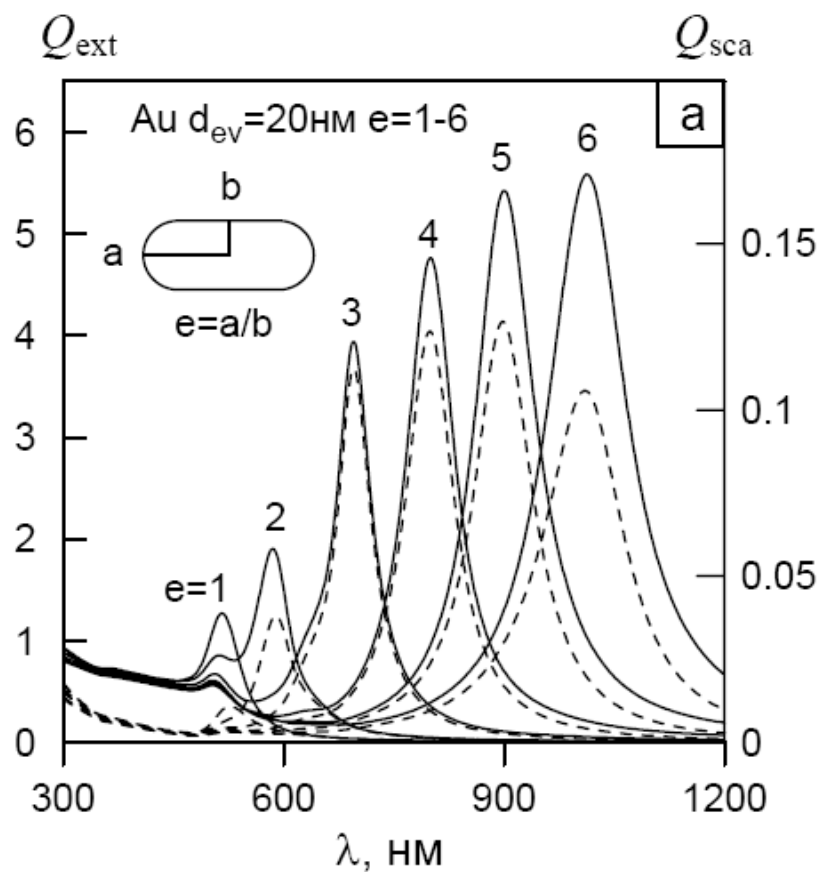
$$d = \begin{cases} 3 + 7.5 \times 10^{-5} X^4, & X \geq 23 \\ [\sqrt{X - 17} - 1] / 0.06, & X < 23 \end{cases}, \quad X = \lambda_{\max} - 500,$$





СТАБ





Залежність резонансних довжин хвиль екстинкції від розміру наночасточок
циліндричних золота та срібла

Core-Shell Nanomaterials for Microwave Absorption and Electromagnetic Interference Shielding: A Review

Yudhajit Bhattacharjee and Suryasarathi Bose*

ACS Appl. Nano Mater.2021, 4, 949–972

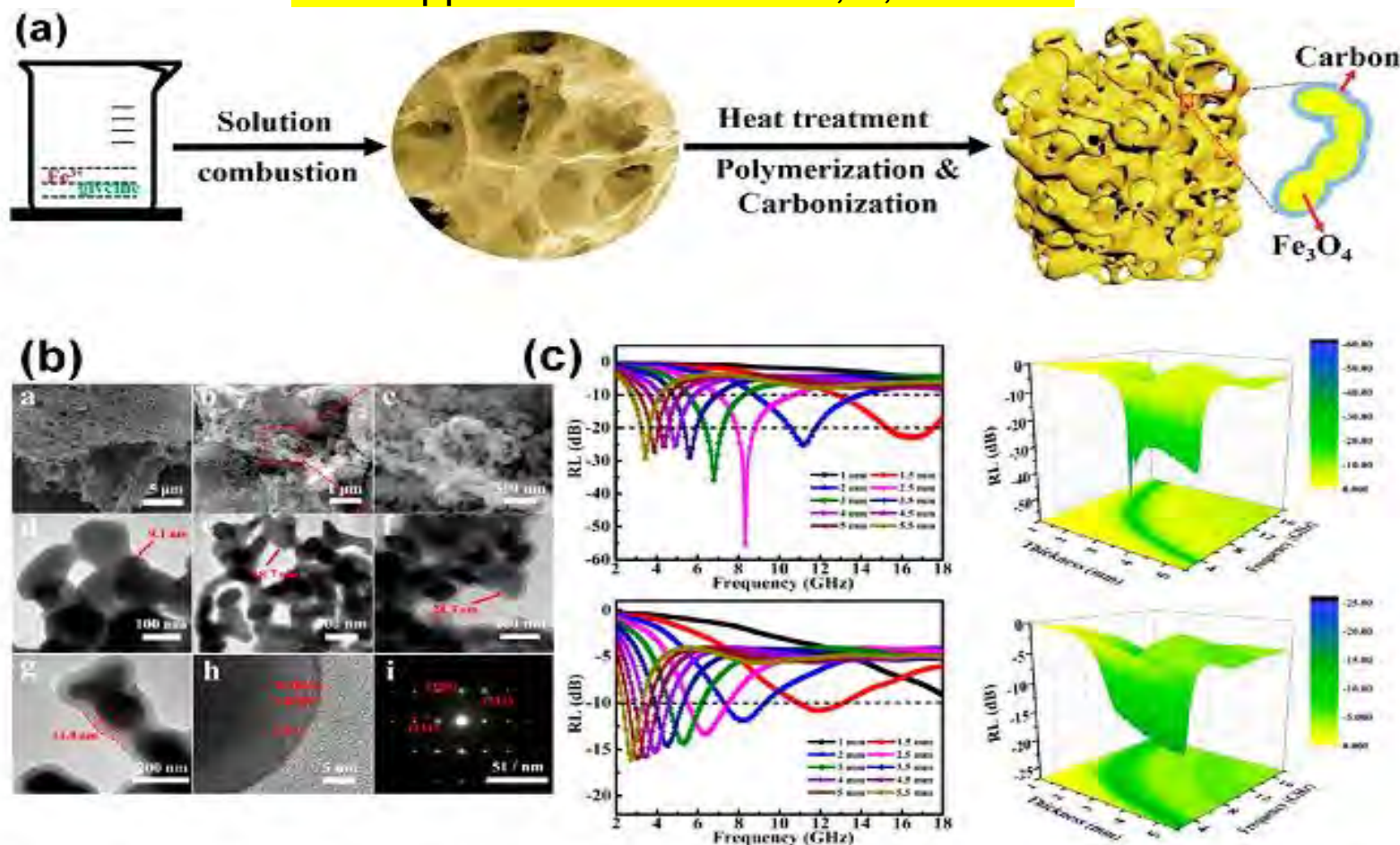


Figure S. (a) Schematic illustration of the synthesis scheme of $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$. (b) Electron micrograph of nanomaterials.¹⁰⁴ (c) Reflection loss profile of the composite. Reproduced with permission from ref 104. Copyright 2020 Elsevier.

Microfluidization of Graphite and Formulation of Graphene-Based Conductive Inks

Panagiotis G. Karagiannidis,[†] Stephen A. Hodge,[†] Lucia Lombardi,[†] Flavia Tomarchio,[†] Nicolas Decorde,[†]

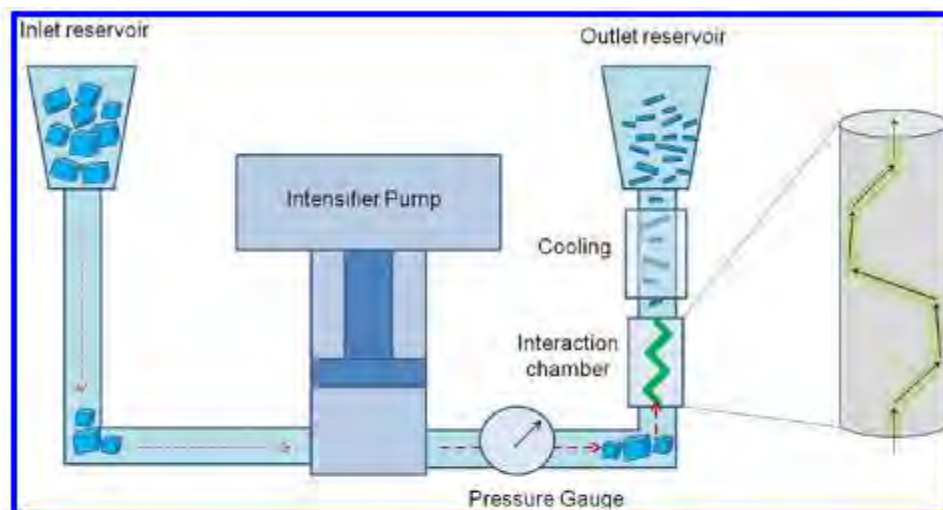


Figure 1. Schematic of the microfluidization process. Graphite flakes in SDC/water are added in the inlet reservoir. An intensifier pump applies high pressure (up to ~ 207 MPa) and forces the suspension to pass through the microchannel of the interaction chamber where intense $\dot{\gamma} \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ is generated. The processed material is cooled and collected from the outlet reservoir. The process can be repeated several times.

DOI: 10.1021/acs.nano.6b07735
ACS Nano 2017, 11, 2742–2755

1. Сейсян Р.П. Экситон в низкоразмерных гетероструктурах // Соросовский образовательный журнал – 2001 – т.7, №4 – с. 90-96.
2. Васильев Р.Б., Дишин Д.Н. // Квантовые точки: синтез, свойства, применение /М.: ФНМ – 2007 – 34с.
3. Валянский С.И.// Соросовский образовательный журнал /1999 - № 8 - С. 76–82.
4. Н.Г. Хлебцов, В.А. Богатырев // Оптические методы определения параметров наночастиц с плазмонным резонансом - <http://www.sgu.ru>
5. А.С. Сигова. Получение и исследования наноструктур: Лабораторный практикум по нанотехнологиям / М. - 2008 - 116 с

1. Для більшості наночасточок металів та напівпровідників ширина забороненої зони визначає появу розмірних ефектів у спектрах поглинання.
2. Для напівпровідників появу особливих смуг поглинання пов'язують з екситонним резонансом.
3. Для металічних наночасточок розмірних ефект проявляється за рахунок плазмонного резонансу.
4. І екситонний і плазмонний резонанс чутливі до розподілу за розміром, формою та особливостями будови поверхневого шару.