

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**НАНОРОЗМІРНІ ГРАНУЛЬОВАНІ СИСТЕМИ ЯК ЕЛЕМЕНТИ
МІКРОЕЛЕКТРОНІКИ І СЕНСОРИКИ**

Студент групи ЕП-61

А.Ю. Калініченко

Науковий керівник

асистент

А.О. Степаненко

Завідувач кафедри ЕЗПФ

д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю. Проценко

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягає в огляді сучасних нанорозмірних гранульованих систем як елементів мікроелектроніки і сенсоріки.

Під час виконання роботи використовували аналіз сучасних літературних джерел та інтернет ресурсів, присвячених новим методам та технологіям конструювання елементів електроніки та сенсоріки на основі нанорозмірних гранульованих систем.

У результаті проведеного літературного аналізу визначено методи одержання нанорозмірних гранульованих систем та їх основні властивості. Ця інформація наводиться в першому розділі. Другий розділ присвячений огляду елементів електроніки: резисторів, перемикачів, транзисторів, а в третьому розглянуто характеристики та будову сенсорів на основі нанорозмірних гранульованих систем.

Робота викладена на 39 сторінках, зокрема, містить 26 рисунків і список використаних джерел із 57 найменувань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СЕНСОРИ, ГРАНУЛЬОВАНІ СИСТЕМИ, НАНОРОЗМІРНІ, ПЛІВКИ, НАНОЧАСТИНКИ, ДАТЧИКИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. НАНОРОЗМІРНІ ГРАНУЛЬОВАНІ СИСТЕМИ: ТЕХНОЛОГІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ	5
РОЗДІЛ 2. НАНОРОЗМІРНІ ГРАНУЛЬОВАНІ СИСТЕМИ ЯК ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОНІКИ	12
2.1. Фотоелектричний перетворювач.....	12
2.2. Резистори та перемикачі провідності.....	14
2.3. Катоди.....	18
2.4. Використання тунельного ефекту.....	21
РОЗДІЛ 3. СЕНСОРИ НА ОСНОВІ НАНОРОЗМІРНИХ ГРАНУЛЬОВАНИХ СИСТЕМ	24
ВИСНОВКИ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

ВСТУП

Гранульовані системи, володіють особливими властивостями які викликані специфічними явищами, які властиві нанорозмірним частинкам, що утворюють ці системи, і ефектами групування при їх взаємодії одна з одною. Гранулярні системи можна виділити за розмірністю. Тривимірні системи складаються з ізолюючих матриць, що містять критичну кількість дрібних металевих частинок. Двомірні системи - це ансамблі дрібних металевих частинок на ізоляційних підкладках (металеві островні або кластерні плівки) і, нарешті, одновимірні ланцюги. В даний час широкий інтерес представляють фізичні ефекти в перспективних матеріалах і нанорозмірних структурах для створення компонентів електронної техніки. Такими структурами, в першу чергу, є двовимірні структури у вигляді шарів наноскопічних розмірів, одновимірні – квантові нитки або дроти, і нульмірні - квантові точки. В якості сучасних нанокомпонентів електроніки можуть використовуватися різні за своїми фізичними і хімічними властивостями структури і наноматеріали. Це, як правило, різні за складом речовини, що мають різні хімічні зв'язки і будову кристалічної ґратки, а також некристалічні з'єднання і біологічні об'єкти - нуклеїнові кислоти, протеїни, віруси, клітини. Для створення електронних компонентів сучасні наноструктури використовують різне поєднання матеріалів, що буде представлено далі у роботі.

Наносенсори, так само як і звичайні сенсори, в залежності від їх робочого режиму поділяють на різні категорії: оптичні, хімічні, електрохімічні сенсори, мас-чутливі, біосенсори та інші. Однак, на відміну від звичайних сенсорів, наносенсори мають підвищену чутливість, високу швидкість реакції, малі розміри і дешеві у виробництві. Однак, існують фізичні фактори масштабних обмежень для наноструктур з різними механізмами модуляції характеристик.

Метою роботи є огляд сучасних елементів електроніки і сенсоріки на основі нанорозмірних гранульованих систем.

РОЗДІЛ 1. НАНОРОЗМІРНІ ГРАНУЛЬОВАНІ СИСТЕМИ: ТЕХНОЛОГІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ

Фізика нанорозмірних структур найактуальніша і найбільш динамічно розвиваючись область сучасної фізики твердого тіла. Інтерес до цієї області пов'язаний як з принципово новими фундаментальними науковими проблемами і фізичними явищами, так і з перспективами створення на основі вже відкритих явищ абсолютно нових квантових пристроїв і систем з великими функціональними можливостями для електроніки нового покоління. Елементна база, заснована на використанні різноманітних низькорозмірних структур, є найбільш перспективною для електронної техніки нових поколінь. Однак при переході до систем нанометрового масштабу починає чітко проявлятися квантовомеханічна природа квазічастинок в твердому тілі. В результаті виникає принципово нова ситуація, коли квантові ефекти (розмірне квантування, конфайнмент, тунелювання, інтерференція електронних станів та ін.) будуть грати ключову роль в фізичних процесах в таких об'єктах і в функціонуванні приладів на їх основі. Досягнення в розробці і виготовленні наноструктур різного призначення найбільшою мірою визначаються рівнем розвитку технологій, які дозволяють з атомною точністю отримувати наноструктури необхідної конфігурації і розмірності, а також методів комплексної діагностики властивостей наноструктур, включаючи контроль в процесі виготовлення і управління на його основі технологічними процесами. Використовуючи новітні методи інженерії можна конструювати різноманітні квантоворозмірні структури із потрібними властивостями.

Квантовими ямами називають системи, в яких певна напівпровідникова гетероструктура затиснута між двома напівпровідниками, внаслідок чого відбувається розмірне квантування електронних рівнів. В квантових ямах відбуваються явища розмірного квантування електронного спектра, ефект Холла, висока рухливість електронів. Щоб отримувати такі системи, найбільш використовують молекулярно-пучкову епітаксію та металоорганічну газову

епітаксію. Поміщаючи тонкий шар напівпровідника з вузькою забороненою зоною між двома шарами матеріалу з більш широкою забороненою зоною отримують квантові ями. Внаслідок чого електрон виявляється замкненим в одному напрямку, що і призводить до квантування енергії поперечного руху. Електронний газ в квантовій ямі стає двовимірним через те, що в двох інших напрямках рух електронів буде вільним.

Квантові дроти це системи, в яких рух носіїв заряду квантований у двох напрямках. Фізичними явищами що виникають у таких системах є квантування провідності та сильно корельований електронний транспорт. Провідність квантового дроту при збільшенні його довжини змінюється не монотонно, а коливається, досягаючи максимумів для дроту, що складається з парного числа атомів, оскільки в такому випадку більше число допустимих електронних станів.

Квантові точки – це нано об'єкти, в яких рух носіїв заряду квантований у всіх трьох напрямках і мають дискретний енергетичний спектр. Одноелектронні і однофотонні явища є основними фізичними явищами у таких системах. У цій системі квантова точка обмежена в трьох напрямках із повністю дискретним енергетичним спектром. Через це їх ще називають штучними атомами. Розміри таких об'єктів складають декілька нанометрів. Квантова точка може містити один або кілька вільних електронів. З одним електроном – це атом водню, з двома - атом гелію і так далі. Квантові точки можна створювати з травленням і простим нанесенням рисунка на поверхню НП, також, можна використовувати природну властивість матеріалу утворювати маленькі острівці в процесі росту, що можуть мимовільно утворитися на поверхні зростаючого кристалічного шару.

Структурам з тунельно-прозорими бар'єрами що складаються із систем квантових ям і суперґраток належать такі фізичні явища: формування мінізонного спектра, в суперґратках це періодичні системи, що містять багато квантових ям, які розділені тунельно-прозорими бар'єрами; нелінійні електричні та оптичні явища, резонансне тунелювання.

Фотонними кристалами є системи із зонним спектром для фотонів, основними фізичними явищами яких є відсутність пропускання світла, тобто повне відображення в певному діапазоні частот та резонансні фотонні стани.

Розвиток методів напилення надтонких плівок і нанолітографії призвів в останнє десятиліття до активного вивчення магнітних наноструктур. Основною ідеєю є створення нових магнітних наноматеріалів для надщільного запису і зберігання інформації. Передбачається, що кожна частка несе один біт інформації. Багатошарові структури з надтонких феромагнітних і діамагнітних шарів є новим типом доменної структури феромагнетика, в якому роль доменів грають феромагнітні плівки, а доменними стінками є плівки діамагнетика. Подальший розвиток в області малих розмірів призвів до відкриття нового явища - тунелювання магнітного моменту в надмалих феромагнітних частинках.

У випадку двовимірних багатошарових структур з плівок нанометрової товщини розглядаються комбінації матеріалів, які забезпечують найбільш сильне відображення електромагнітних хвиль. Структури представляють собою штучні одномірні кристали з плівок нанометрової товщини, з можливістю їх використання для управління випромінюванням в залежності від матеріалів шарів (діелектрик, напівпровідник, метал, надпровідник).

З точки зору матеріалів для нанотехнологій і молекулярної електроніки умовно можна виділити три основні класи: полімери, молекулярні ансамблі і поодинокі молекули: що називаються також як "розумні" або "функціональні" молекули. Полімери - вивчаються найбільш давно і найбільш інтенсивно. Діелектричні, оптичні і люмінесцентні властивості різних полі і олігомерів вже широко використовують в техніці та електроніці. До молекулярних ансамблів нанометрових розмірів відносяться агрегати на основі порфіринів (в тому числі хлорофілу) і інших амфифільних молекул, одержувані з розчинів. Чутливість та дуже гарна вибірковість цих систем до зовнішніх чинників дозволяє використовувати їх в різних сенсорах. Досліджуються нанорозмірні

молекулярні стрижні і дроти, в тому числі в якості інтерфейсу між неорганічними матеріалами (електродами).

Важливу групу складають також моношари які самозбираються (self-assembled monolayers, SAM's) на основі органічних молекул або ланцюжків різної будови. Третій клас - одномолекулярні пристрої (прилади). Якщо взяти якусь молекулу, яка представляє собою добре організовану квантову систему, і зробити до неї електроди то отримаємо, наприклад, діод. Конструюються молекулярні наномашини і наномотори (ротори), динамічні молекулярні перемикачі, транспортувальники енергії, пристрої розпізнавання, зберігання інформації. Головні переваги органіки це дешевизна і доступність. Але синтез нових сполук робить їх чи не дорожче високочистих неорганічних речовин.

Не менш важливими параметрами вважаються особливості пакування. Це кластерний характер покриттів, відстані між наночастинками, температура обробки, кількість моношарів та ін. Отримання наноструктур може відбуватися різними методами, але у даному випадку, розглянемо формування покриттів із наночастинок на поверхні SiO_2/Si підкладок методом спінової коатингу [1]. Підготовка здійснювалася шляхом капання розчинів НЧ на підкладки, що обертались із різними швидкостями. Дослідивши характер розподілу наночастинок на підкладках, можна сказати що утворюються різноманітні наноструктури, починаючи від нанокластерів і закінчуючи суцільними мережами із наночастинок (рис.1.1). В кінцевому результаті кластери представляють собою одношарові структури наночастинок із ланцюжками і мережами (рис. 1.2). Пакування наночастинок у цих структурах має сферичний вигляд, це свідчить про високу енергію зв'язку між окремими наночастинками при високих швидкостях їх обертання. Збільшуючи швидкість обертання, отримуємо дефрагментацію наноструктур із переходом до кластерів. При малих концентраціях розмір кластерів майже не змінюється, але спостерігається збільшення відстані між ними. Щодо провідної матриці, то вона наноситься методом термічного випаровування. При малих концентраціях кількість наночастинок у кластері складає приблизно 10-15 шт.

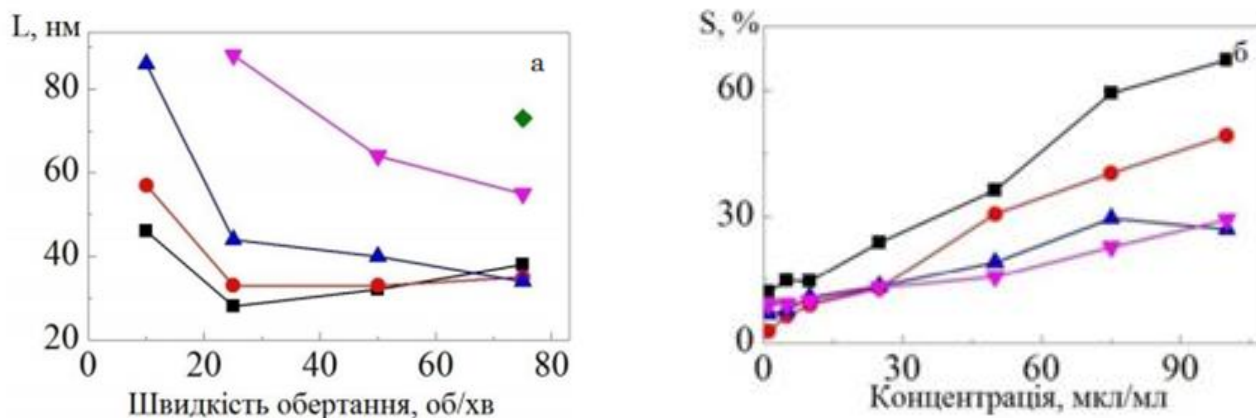


Рисунок 1.1 – Графіки залежності розмірів кластерів НЧ від швидкості обертання підкладки при концентраціях розчинів НЧ, мкл/мл: 1 (■), 5 (●), 10 (▲), 25 (▼) 50 мкл/мл (◆) (а) та ступеня покриття поверхні підкладки наночастинками від концентрації розчинів НЧ для швидкостей обертання 10 (■), 25 (●), 50 (▲) та 75 об./хв. (▼) (б) [1]

Використовуючи метод спін-коатингу, можна побачити як впливає розмір наночастинок на їх магніторезистивні та електрофізичні властивості у матриці Ag, де процеси дифузії між наночастинками та провідною матрицею мають мінімальний вплив.

На рис. 1.3 можна побачити, що впорядковані масиви наночастинок зберігають своє упорядкування.

Схематичне зображення процесу формування функціональних покриттів наведено на рис. 1.4. Як можна побачити, першим етапом йде формування рівномірного покриття поверхні магнітними НЧ, другим етапом є відпалювання до високих температур вже сформованого покриття із наночастинками, де самі частинки починають збільшуватися разом із магнітним моментом. Далі, на цей масив наночастинок наноситься провідна матриця, і на останньому етапі утворюються функціональні покриття в процесі самозбірки. Цей етап дозволяє підвищити ефективність елементів.

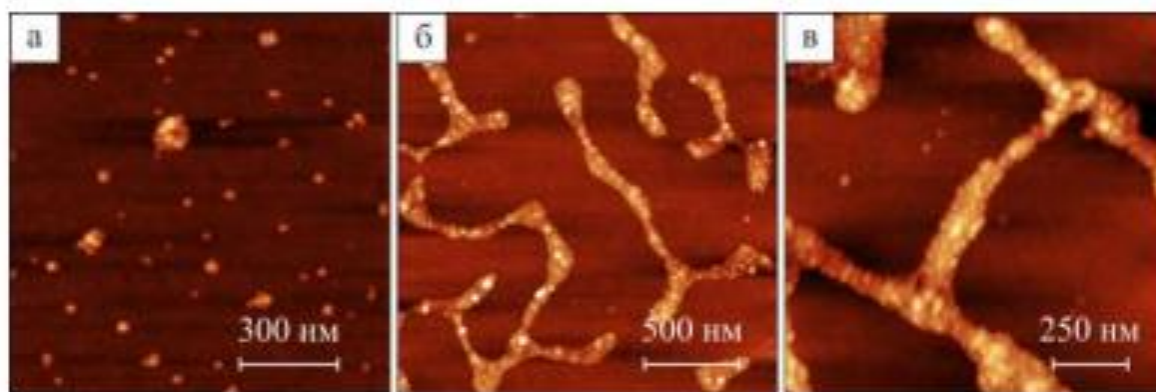


Рисунок 1.2 – Зображення типових наноструктур із НЧ, сформованих методом спін-коатингу на поверхні підкладок Si/SiO₂ (500 нм): окремі 2D кластери (а), ланцюжки (б) та мережі (в) [1]

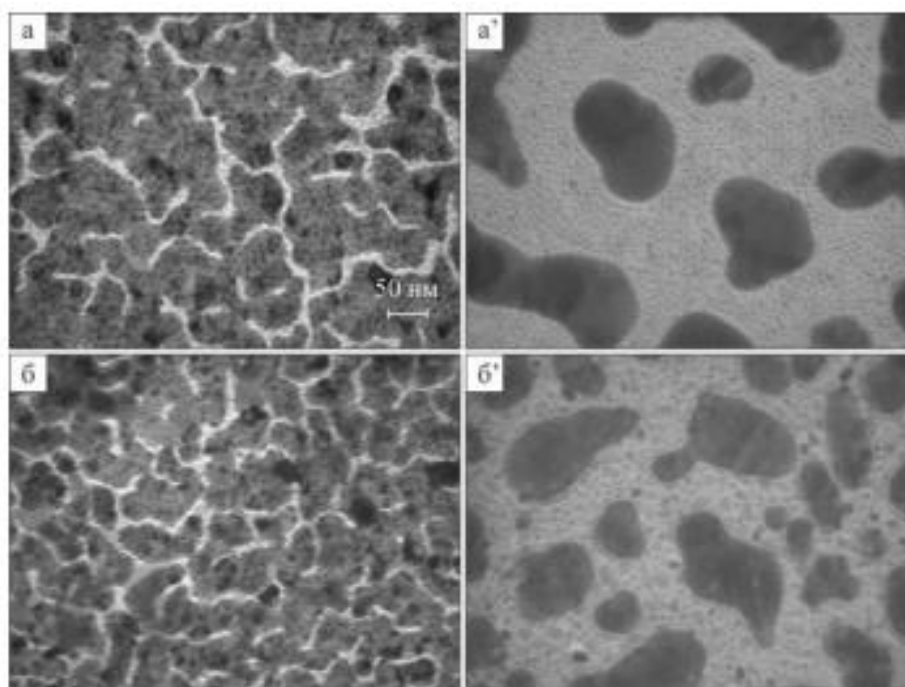


Рисунок 1.3 – Мікрознімки сформованої на впорядкованому невідпаленому (а, а') та відпаленому при 1100 К (б, б') масиві НЧ NiFe₂O₄ провідної матриці Ag товщиною 10 нм до (а, б) та після термообробки при 600 К (а', б') [1]

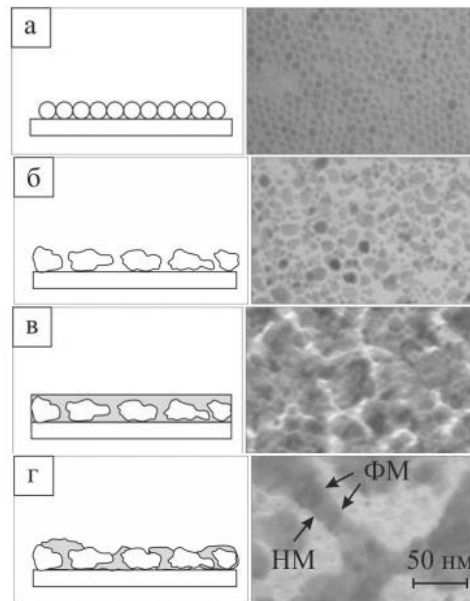


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення процесу формування мережевої структури після відпалу провідної матриці при 600 К; масив ВМНЧ (а); відпал ВМНЧ при 1100 К (б); нанесення провідної немагнітної матриці (в); відпал сформованої структури при 600 К (г) [1]

В результаті, відбувається формування масивів спінів вентиляльних переходів, це дозволяє декілька разів покращити магніторезистивні властивості порівняно із структурами без відпалювання провідної матриці. Цей метод дозволяє отримувати функціональні металеві наномережі, які в свою чергу можуть утворювати багатошарові спін-вентильні нанодропи, що знаходяться в межах підкладки. Але основним недоліком цієї системи є складність утворення таких мереж, із використанням звичайного відпалювання.

РОЗДІЛ 2. НАНОРОЗМІРНІ ГРАНУЛЬОВАНІ СИСТЕМИ ЯК ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОНІКИ

2.1. Фотоелектричний перетворювач

Використовуючи методи осадження наночастинок зверху на прилад, можна домогтися підвищення ККД приладу та через легкість цієї процедури цей спосіб набув широкої популярності [2]. Принцип підвищення ККД полягає у тому, що світло розсіюється та захоплюється НП тонкою плівкою та завдяки багатократному розсіюванню під великим кутом спричиняє збільшення довжини оптичного шляху всередині елемента (рис.2.1) [2].

Для того, щоб сформувати сонячний елемент, використовують різні типи структур, які являють собою моно або гетеро структури. Слід зазначити, що осадження можна проводити як на аморфний, кристалічний або монокристалічний кремній, так і на скло. На рис. 2.2 зображена гетероструктура що використовувалась для осадження на неї НЧ золота/aSi:H (n-типу)/c-Si (p-типу) [3, 4]. Так як товщина емітерного шару сонячних елементів є важливим параметром, що характеризує сонячні елементи, то його товщина повинна бути в межах від 5 до 25 нм [4]. У даному випадку використовувались НЧ золота із діаметром 10 – 50 нм [3] та 20 – 30 нм [4].

Саму процедуру осадження наночастинок проводять шляхом розпилення мішені золота плазмою Ar при температурі 60 - 600°C. З рис. 2.3 можна побачити, що найкращий коефіцієнт підсилення відповідає НЧ діаметром 20 нм.

Для того щоб отримувати частинки потрібного розміру, потрібно контролювати температуру розпилення. Якщо ми хочемо отримати частинки в межах 20-30 нм, то температура процесу повинна складати близько 200° С, також, щоб збільшити точність, можна регулювати час розпилення частинок.

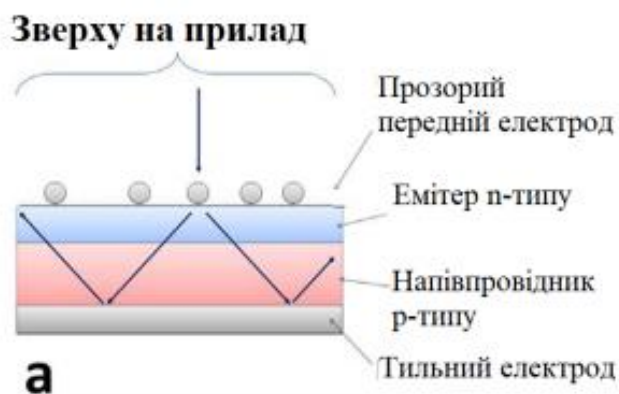


Рисунок 2.1 – Плазмонна конфігурація захоплення світла для тонкоплівкових сонячних елементів з наночастинками зверху на приладі [2]

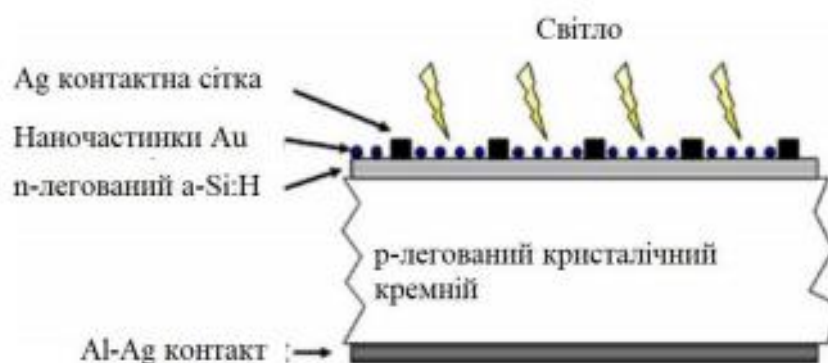


Рисунок 2.2 – Гетероструктура з осадженими наночастинками золота [3,4]

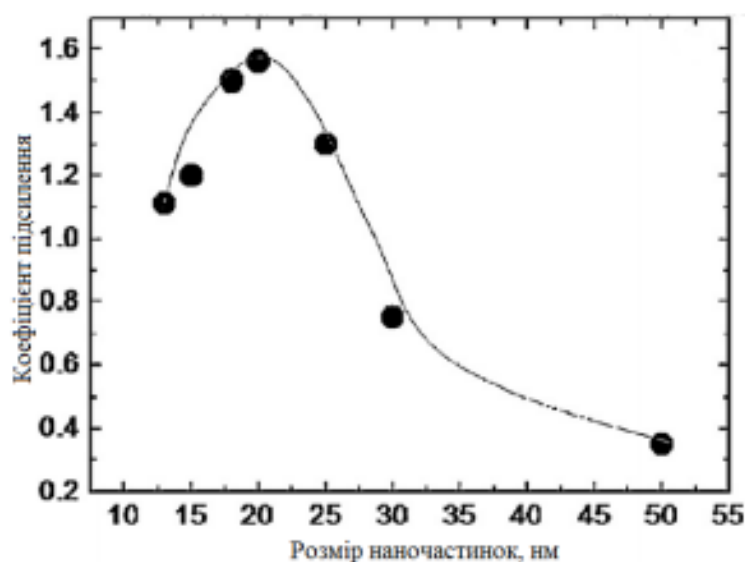


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнту підсилення від розміру наночастинок [3]

Отримане підсилення можна пояснити тим, що сильна концентрація локального поля поблизу НЧ, збільшує поглинання в оточуючому НП матеріалі, адже ефекти розсіювання слабо впливають на НЧ такого розміру[3]. Якщо ж порівнювати фотоелектричні характеристики зразка із НЧ золота та без них, то в обох випадках було отримано підсилення струму короткого замикання на 20%, зростання максимальної потужності на 25%, та філ-фактору на 3% [3, 4].

2.2. Резистори та перимакачі провідності

Плівки з металевих частинок зі статистично однорідною структурою, як правило, характеризуються ізотропним розподілом розмірів частинок і міжчастковими відстанями, а також рівномірним симетричним розподілом потенціалу. Тобто такі плівки, де розміри частинок знаходяться у межах 3–20 нм, в яких залежність розміру робочої функції є монотонною та найбільш вираженою.

Плівки з металевих частинок можуть бути підготовлені таким чином, що розміри частинок будуть лежати у зазначеному діапазоні і монотонно змінюватися вздовж заданого напрямку, тоді розподіл потенціалу буде асиметричним у цьому напрямку навіть тоді, коли не протікає струм. Такий асиметричний розподіл потенціалу утворює локальні електричні поля, які додаються до поля, викликаного прикладеною напругою. Це або збільшить, або зменшить отриману локальну напруженість поля, залежно від його полярності. Як наслідок, отриманий струм сильно залежатиме від значення та розподілу локальних електричних полів по каналу струму. Ці поля різні для різної полярності прикладеної напруги. Таким чином, плівка виступає як діод, типовий приклад показаний на рис. 2.4 [5,6].

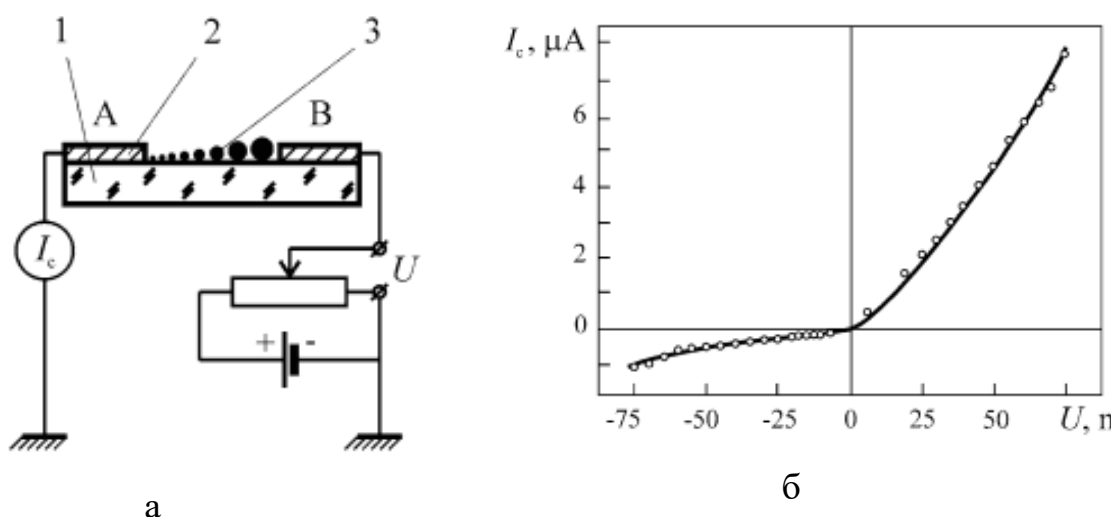


Рисунок 2.4 - Схематичне креслення експериментальної установки: 1 - підкладка ізолятора, 2 - металеві об'ємні контакти, 3 - металеві плівки з анізотропним розподілом розміру частинок (а); ВАХ плівки Au на скляній підкладці з монотонним різним розміром наночастинок (від 3 до 20 нм) по поточному шляху (б) [5,6]

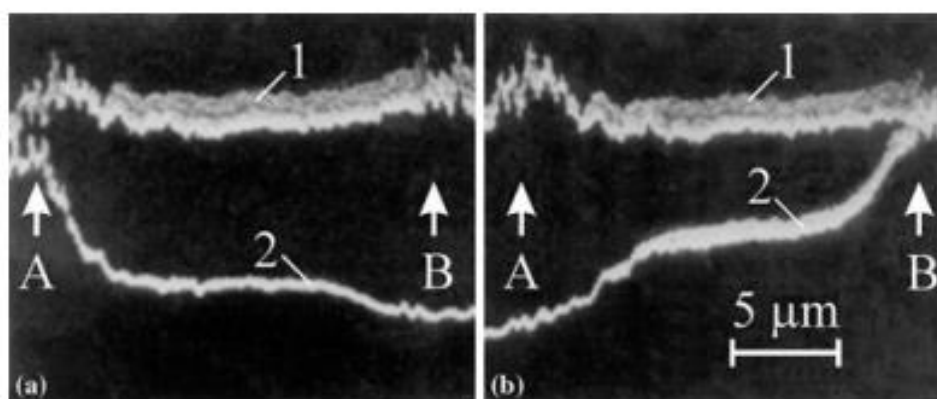


Рисунок 2.5 - Розподіл потенціалів у плівці частинок Au асиметричної неоднорідної структури на скляній підкладці, що контактує електродами А і В. Крива 1 відповідає вимірюванню без прикладання напруги до плівки, тобто при $U = 0$ В. Для кривої 2, напруга $U = -3$ В прикладена до електродів В (а) та А (б) [6]

Різниця струму провідності, що проходить через плівку в протилежних напрямках, спостерігається, коли прикладене значення напруги порівнянне з потенційною глибиною рельєфу (рис.2.5). Було використано кілька методів приготування металевої плівки з градієнтом розміру частинок, таких як утворення пів-тіньової області під межею тіньової маски або осадження і подальший відпал плівки. Плівка з частинок Au в якій струми, що проходять через неї в протилежних напрямках, істотно відрізняються, виготовляється досить легко.

Теоретичний опис цього ефекту [7] не передбачає жодних принципових обмежень щодо співвідношення між струмами протилежної полярності. Цей випрямний вузол (діод) не містить напівпровідникових матеріалів і дуже стійкий до радіаційного ураження.

Перемикачі провідності. Характеристика струму-напруги виявляє область керованого напругою негативного опору в системі, що складається з плівки металевих частинок і полярного адсорбату [8,9,10]. Така система може служити електричним перемикачем. Наприклад, при використанні ланцюга частинок Au (структура такої плівки Au частинок схожа на структуру каналу струму), покритого органічною плівкою C_3H_5 ($C_{18}H_{35}O_2$)₃ (стеарин), можна отримати співвідношення електропровідності плівки у стані високої та низької стійкості близько 10³ [11]. Напруга перемикання лежить у межах 4–6 В (рис.2.6).

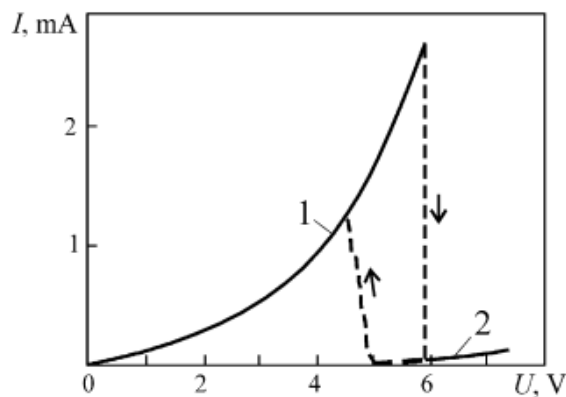


Рисунок 2.6 - ВАХ ланцюгової структури частинок Au з адсорбатом C_3H_5 ($C_{18}H_{35}O_2$)₃: крива 1 - стан низького опору, крива 2 - високий опір [12]

Час переходу від стану низького до високого опору становить менше 1 мс, але час зворотного переходу становить близько 1 с [12]. Тест на довговічність показав, що такі перемикачі витримують до 105 комутацій, не змінюючи своїх характеристик. Наявність органічних молекул у поточному каналі, що складається з металевих наночастинок, збільшує його провідність у високих електричних полях [12].

Польова пам'ять. Після перемикання зразка зі стану низького до високого опору він може тривалий час підтримувати цей стан у діапазоні напруги від 0 до 2 В [8]. Щоб повернути його до стану низького опору, досить підняти прикладену напругу вище 2 В на 0,1 В (рис.2.7).

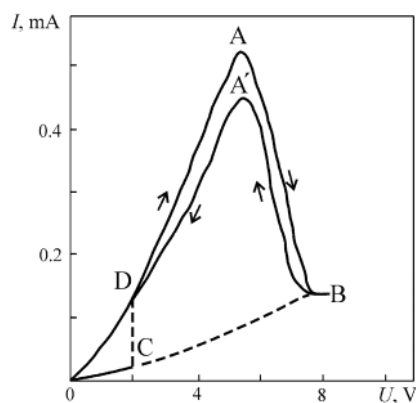


Рисунок 2.7 - ВАХ для плівки Au-частинок з полярним адсорбатом: крива ODAB - стан низького опору, крива OCB високого опору, крива OC - область пам'яті. Стан В переходить у стан D при повільному зниженні напруги. Стан В переходить у стан С при зменшенні напруги зі швидкістю більше 1 В/с [8]

У цьому випадку електричне поле є досить сильним, щоб повернути молекули полярних адсорбатів у початковий стан завдяки електроміграції. Різниця в тривалості переходів від стану низького опору до стану високого опору і назад обумовлена різницею між механізмами цих переходів. Ці зразки також мають температурну пам'ять [13]. Це означає, що при низькій температурі ($T \ll 100$ К) зразок може бути переведений у стан високого опору лише один раз незалежно від прикладеної напруги, і він залишається в такому стані, поки температура підкладки не підвищиться на 10–20 К.

2.3. Катоди

Здатність плівок на основі металевих частинок випромінювати гарячі (нерівноважні) електрони як сила яка подається в них, пропускаючи струм, дозволяє виготовляти холодні катоди на основі цих плівок. Ці катоди цікаві тим, що поєднують в собі переваги як вакуумної мікроелектроніки (теплова та радіаційна стійкість), так і напівпровідникової мікроелектроніки (можливість мініатюризації). Катоди плівок частинок Au, активованих шарами BaO, були детально досліджені у цій роботі [14]. Площа катода зазвичай дорівнювала сотням квадратних мікрон. За допомогою фотолітографії можна виготовити матрицю великої площі, що містить ці мікрокатоди з різною щільністю їх розташування. Було виготовлено невелику кількість таких матриць, як плоскі цифрові індикаторні панелі [15]. Щільність струму від одного мікрокатода становила кілька А/см², тоді як значення струму випромінювання було рівне 5–50 μ А, що становить 1–10% струму провідності.

Електронна емісія із компаунду на травлений пористий оксид алюмінію. Структура випромінювальної системи та пов'язані з цим експериментальні установки показані на рис. 2.8 а.

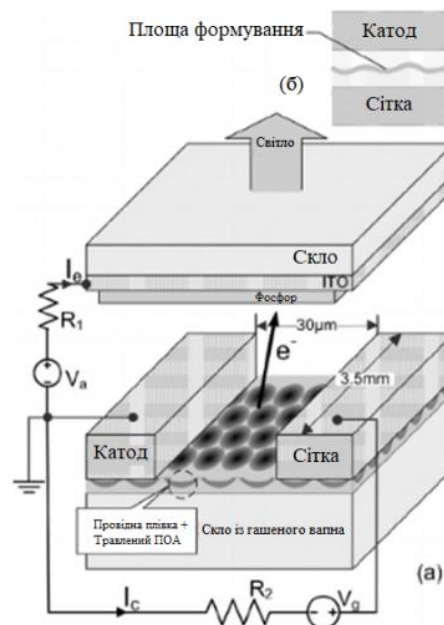


Рисунок 2.8 - Схема структури випромінювачів та експериментальної установки (а); області формування (б) [16]

Випромінювач має планарну структуру, а провідникова плівка розташована між двома 30 мікрометровими катодом та сітчастим електродом [16]. Оскільки острівки в провідниковій плівці не можуть бути повністю ізольованими, між ними існують провідні шляхи. Процес формування відбувається у вузькій зоні, як приблизно показано сірою лінією на рис. 2.8 б, коли напруга сітки ($V_g < 100$ В) подається для забезпечення великого струму який протікає через плівку, завдяки якому деякі з провідних шляхів відгорають. Після цього електричне поле, розташоване між ізольованими острівцями, які паралельні поверхні в цій зоні ($> 10^6$ В/см), викликає тунельний ефект і польову емісію, і електрони передаються на тонку плівкову поверхню. У той час як основна частина перенесених електронів утворює струм провідності I_c , незначна частина цих електронів виходить з поверхні під дією анодної напруги (V_a) і відповідає струму випромінювання (I_e). В експерименті I_c та I_e вимірювали при кімнатній температурі у вакуумній камері з базовим тиском приблизно 10^{-4} Па.

Скляна пластинка з прозорим електродом оксиду олова та фосфору одночасно використовувалася як анод для збору електронів, та дисплея екрану для дотримання рівномірності випромінювання електронів. Відстань між анодом та поверхнею випромінювання становила ~ 2 мм, а V_a підтримували в межах 3 кВ.

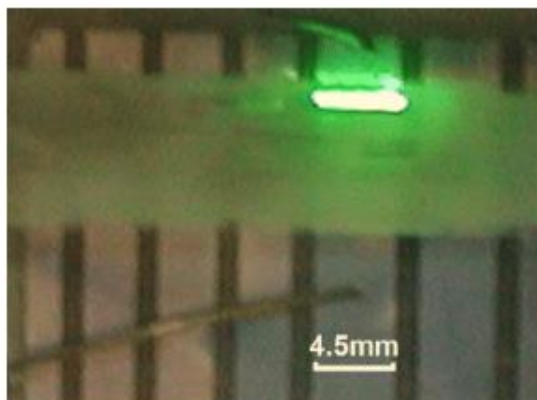


Рисунок 2.9 - Рівномірне випромінювання світла, що відображається на екрані по ширині сітки (тут 4,5 мм), являє собою рівномірне випромінювання електронів [16]

На рис. 2.9 випромінювання світла від екрану дисплея рівномірне по ширині сітки, що представляє собою рівномірну емісію електронів.

Час життя цих катодів становить понад 5000 робочих годин у безперервному режимі [17]. Час реакції катодів становив 10^{-7} с. Їх характеристики погіршуються, якщо вакуум стає меншим за 10^{-5} Па. Чутливість катодів до залишкових газів робить їх корисними у якості вакуумних датчиків. Також, було виготовлено 10-дюймовий дисплей з плоскою панеллю, на основі ультратонких плівкових частинок та цих катодів [18]. Найкраща ефективність I_e / I_c 20% була отримана для катодів на основі плівок Мо частинок [19].

Катоди для запису та візуалізації ІЧ-лазерного випромінювання. Гранулярні системи, такі як Au або графітові дисперсні плівки на підкладках Si та матриці Si/Ba, підготовлені спеціальним методом (нанесені атоми Ba дифундують у пори субмікронного розміру, раніше зроблені на поверхні пластини Si), показали, що випромінюють електрони під збудженням імпульсним ІЧ-лазерним випромінюванням ($\lambda = 10,6$ мкм) [20,21]. Вони можуть бути використані як фотокатоди для більш широкого діапазону ІЧ, ніж звичайні фотокатоди (підкладка Si прозора в ІЧ-смузі). Роздільна здатність цих катодів визначається часом релаксації електронної підсистеми в металевих частинках і, відповідно може становити 10-12 с [22].

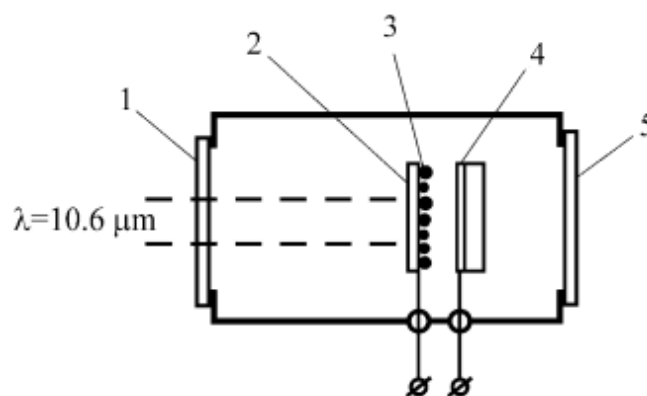


Рисунок 2.10 - Схематичний поперечний переріз пристрою для запису та візуалізації ІЧ-лазерного випромінювання: 1 - вікно Si, 2 - пластина Si, 3 - тонка плівка з частинок Au, нанесена на пластину Si, 4 – катодолюмінісцентний екран при високій позитивній напрузі, 5 - скляне вікно [22]

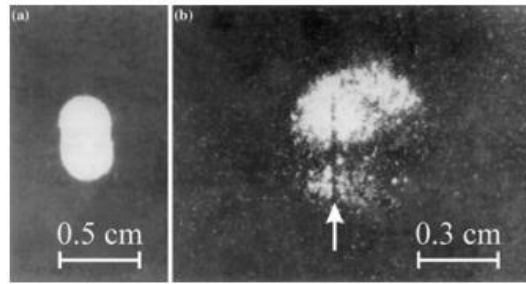


Рисунок 2.11 - Розподіл інтенсивності лазерного променя, що візуалізується за допомогою дисперсних вуглецевих (a) та Au (b) плівок. Темна вертикальна смуга, позначена стрілкою в (b), відповідає області катода, де немає частинок Au [21]

Експериментально було встановлено, що струм випромінювання від цих систем стабільний у межах діапазону щільності потужності лазера, зазначеного вище, і тимчасовий профіль імпульсів випромінювання відтворюється досить тісно, ніж лазерні імпульси. Просторовий розподіл потужності в лазерному перетині променя можна візуалізувати, використовуючи такі фотокатооди частинок у поєднанні з катодолюмінесцентним екраном (рис.2.10). Таким чином, металеві або графітові дисперсні плівки та матриці Si/Ba можуть служити катодами з високою просторовою та часовою роздільною здатністю.

2.4. Використання тунельного ефекту

Одноелектронний транзистор з унікальними характеристиками виконаний в структурі «кремній-на-ізоляторі» з тунельними переходами і вбудованими квантовими точками представлений в роботі [23]. Етапи виготовлення, параметри і характеристики транзистора представлені на рис. 2.12. Дана технологія дозволяє отримувати квантові точки з контрольованими параметрами. Область під затвором має профіль легування у вигляді зворотного гауссіана, що призводить до створення потенційного бар'єру. Ефективна робота транзистора пов'язана з необхідністю перевищення енергії кулонівської взаємодії над енергією термальних флуктуацій.

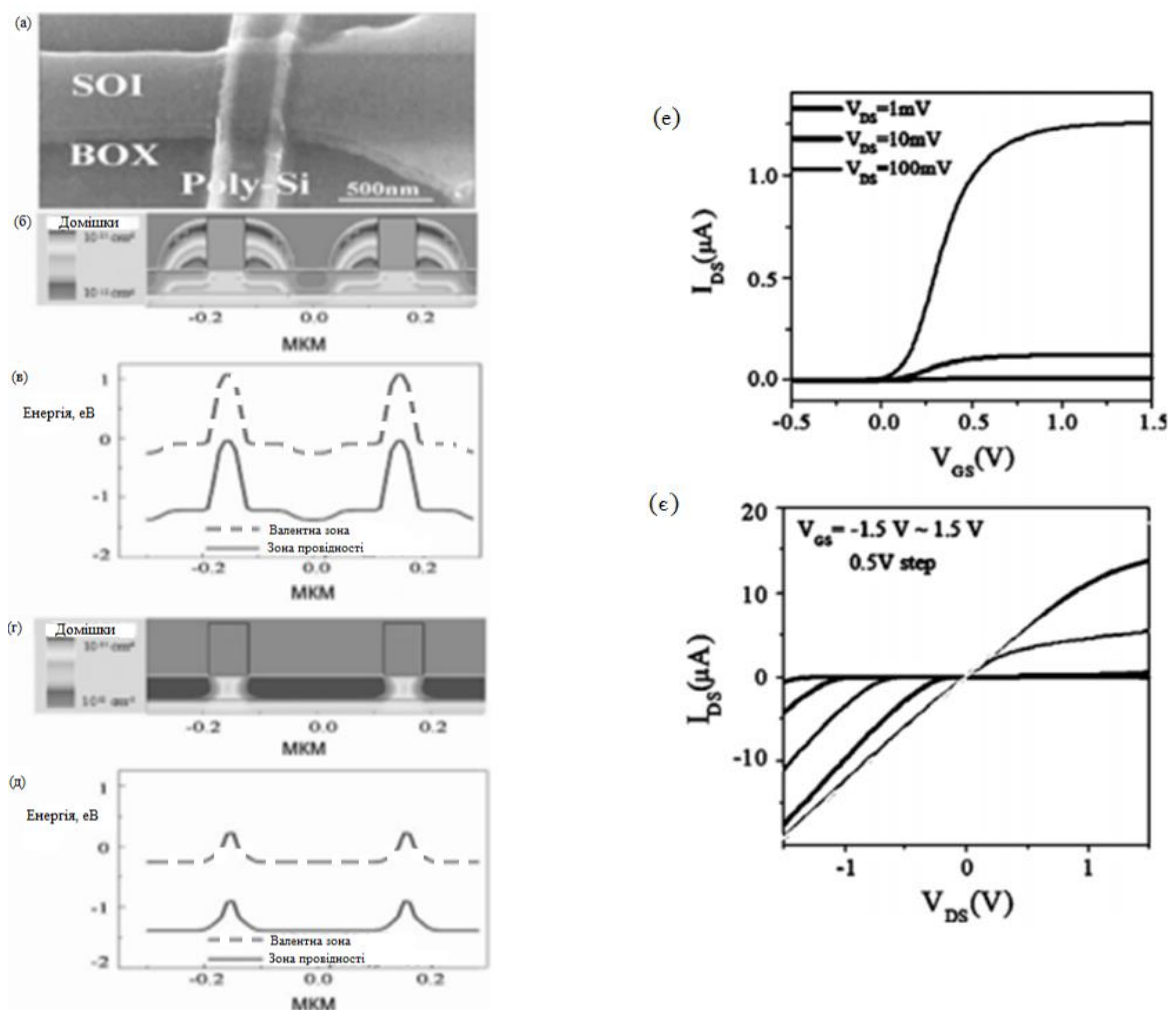


Рисунок 2.12 - Топологія одноелектронного транзистора, енергетичні діаграми (а-д); вольтамперні характеристики при $T = 300\text{ K}$ (е,ε) [23]

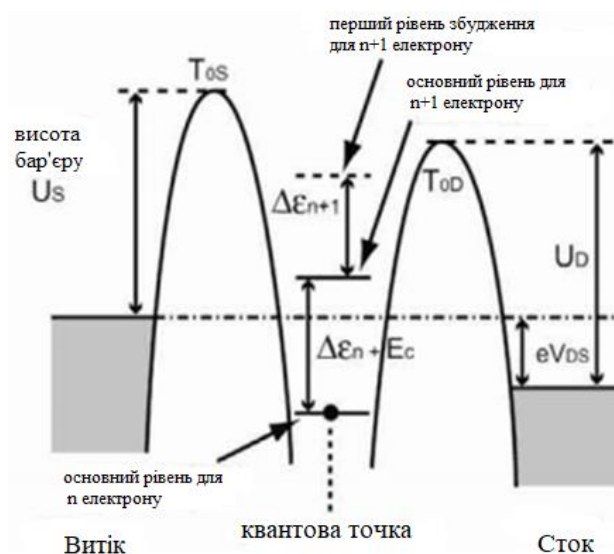


Рисунок 2.13 - Енергетична діаграма одноелектронного транзистора [24]

Якщо за рахунок теплового руху частинка придбала досить велику енергію, вона може прорвати кулонівську блокаду. Тому для кожного одноелектронного пристрою існує своя критична температура, вище якої вона перестав працювати. Ця температура обернено пропорційна площі переходу: чим менше його ємність, тим більше стрибок напруги і тим вище бар'єр кулонівської блокади. Унікальність даного транзистора полягає в отриманні вихідних характеристик при кімнатній температурі [24]. Модель транзистора при відомих параметрах квантової точки і тунельного переходу може використовуватися для розрахунку швидкодіючих ключів. Для створення швидкодіючої одноелектронної структури необхідно, щоб опір тунельного переходу був істотно вищим за квантовий опір.

РОЗДІЛ 3. СЕНСОРИ НА ОСНОВІ НАНОРОЗМІРНИХ ГРАНУЛЬОВАНИХ СИСТЕМ

У роботі [25] наводяться результати експериментальних досліджень контакту «органічна молекула - металева поверхня». Відбувається хімічний механізм взаємодії між молекулою і металевим електродом, пов'язаний зі зміною електронної щільності і появою молекулярного електростатичного потенціалу. Розглядається система з двох пов'язаних атомів вуглецю, з'єднаних з кільцями фенілу (рис.3.1). При взаємодії відбуваються зміни в геометрії молекули, що характерно для хімічно пов'язаних елементів, які можуть відбуватися на відстані близько 1 нм. З'являються квантовомеханічні кластери біля поверхні металевого електрода. При цьому хвильові функції атомів металу локалізуються, тобто взаємодія певного шару металу не змінює хвильових функцій сусідніх шарів металевого електрода. Модуляція провідності контакту «метал-молекула» відбувається при зміні електричного зміщення на металевій поверхні, що призводить до зміни довжини зв'язків і переносу електронів внаслідок тунелювання.

Механізм модуляції провідності внаслідок поверхневої поляризації вуглецевої нанотрубки, що представляє собою канал польового транзистора, реалізований в нанобіосенсорі (рис.3.2). При захопленні органічних молекул на поверхні нанотрубки відбувається збіднення (або збагачення) носіями каналу транзистора в залежності від типу провідності нанотрубки. Такі біосенсиори можуть використовуватися для дослідження протеїнів, ДНК, різного виду антитіл та інших біологічних об'єктів.

Внаслідок невеликих розмірів цих датчиків, можна створювати їх набори в невеликому обсязі. Наприклад, взяти один напівпровідниковий кристал і розмістити на його поверхні кілька чутливих елементів або сенсорів. Так можна отримувати плати з сенсорами та мікропроцесорами, які оброблюють отримані результати експерименту. Варто зазначити, що такі сенсори не обмежуються лише визначенням концентрації газів в суміші.

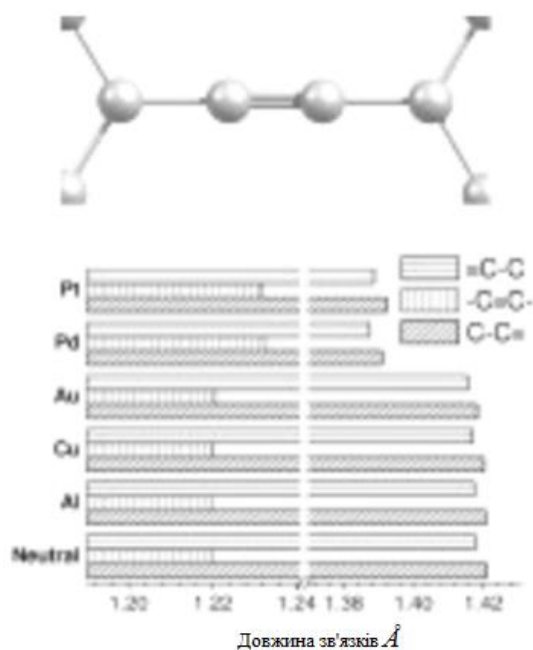


Рисунок 3.1 - Довжини зв'язків контакту метал-молекула для різних матеріалів [25]

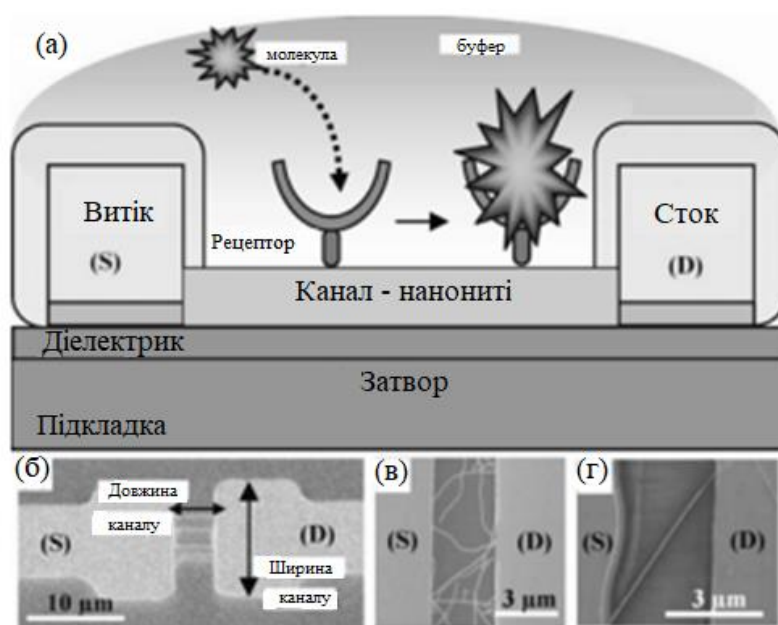


Рисунок 3.2 - Принцип роботи нанобіосенсора (а); топологія (б); технології реалізації каналу транзистора: на вуглецевій нанотрубці (в); на нанопровіднику з оксиду індію (г) [25]

У датчиків на основі хімічних реакцій присутні два перетворювача – хімічний та фізичний які знаходять у тісному зв'язку між собою. У хімічному – шар чутливого матеріалу, який формує сигнал на певний компонент та здатний визначати присутність компонента та зміну його складу. У фізичному (трансдюсер) – перетворює енергію, що виникає внаслідок реакції певного шару з компонентом в світловий або електричний сигнал. Далі, отриманий сигнал можна виміряти за допомогою спеціального електронного або світлочутливого пристрою.

Різні види трансдюсерів визначають за їх фізико-хімічними основами дії, що дозволяє розділити такі сенсори на основні категорії: гравіметричні, електрохімічні та оптичні. Серед наведених сенсорів найкращими є електрохімічні, через їх меншу залежність від ефектів навколишнього середовища, на відміну від оптичних, що здатні здійснювати перенесення перетвореної інформації в електричну форму. Розглянувши більш детально оптичні наносенсори слід виділити такі, що працюють на фізичному принципі поверхневого плазмового резонансу. Але недоліком трансдюсеру такого наносенсору є чутливість до різних параметрів середовища, що в деяких випадках може погано позначитись на вибірковості системи [26].

Якщо використовувати полімери, то можна отримувати різні електрохімічні властивості, наприклад, роботу з різними потенціалами. Завдяки цій властивості можна зменшити електрохімічні перешкоди від звичайних електроактивних сполук в крові, що можуть спричинити реакцію зі стандартними методами електрохімічного детектування [27]. Розглянемо роботу [28] де використовується польовий транзистор (RISFET) для визначення генерації глюконату, щоб кількісно оцінити концентрацію глюкози. Цей транзистор фокусує глюконат між чутливими електродами, де збільшення струму пропорційне кількості присутньої глюкози.

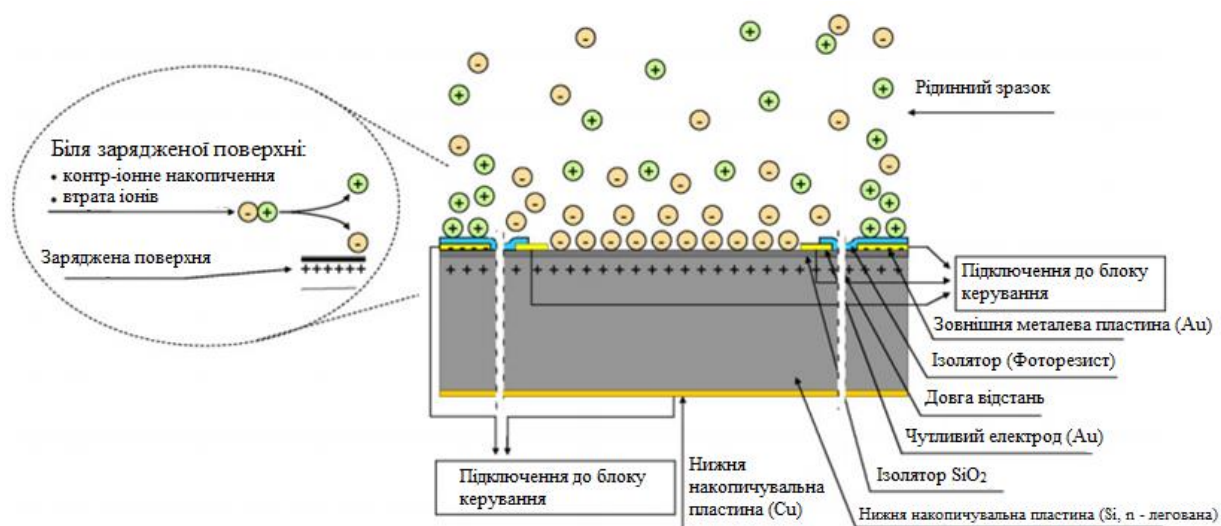


Рисунок 3.3 - Датчик RISFET. На поверхні мікросхеми між чутливими електродами відбувається накопичення проти-іонів і виснаження ко-іонів, призводячи до збільшення іонів, що викликає сигнальний струм [28]

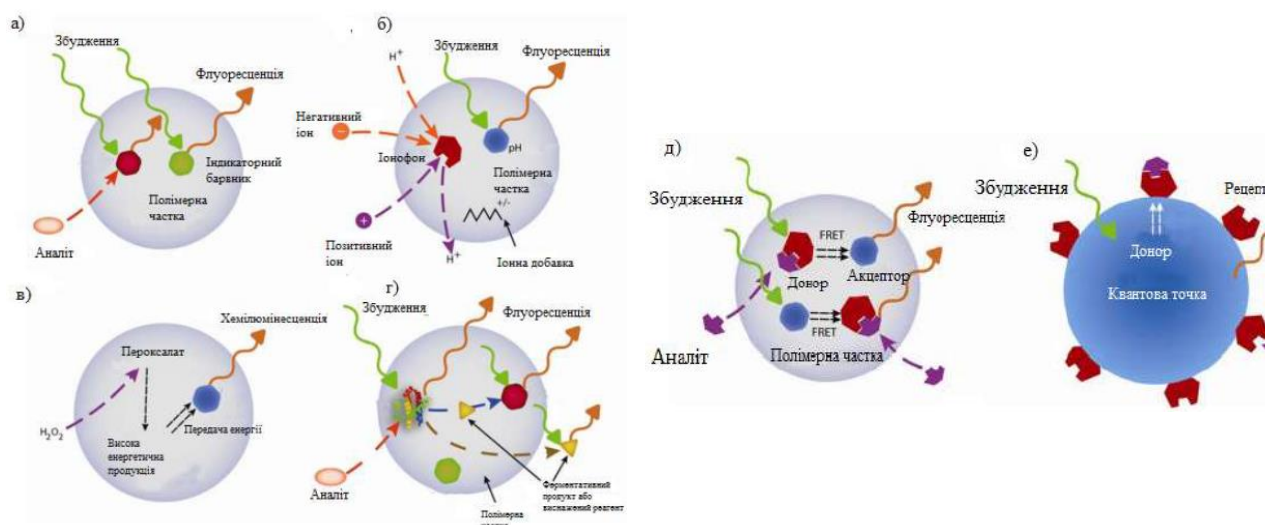


Рисунок 3.4 - Схематичні діаграми різних конструкцій люмінесцентних датчиків наночастинок. Датчик полімерної наночастинок з флуоресцентними індикаторними барвниками (а); іонна кореляція, датчик наночастинок (б); хромілюмінесцентний датчик наночастинок (в); полімерні наночастинок, датчик з інкапсульованим білком (г); датчик полімерної наночастинок на основі FRET резонансної передачі енергії флуоресценції (д); FRET (Fluorescence Resonance Energy Transfer - резонансна передача енергії флуоресценції) сенсор на основі квантової точки (е) [29]

Цей пристрій здатний вимірювати властивості наноматеріалів (наприклад, провідності), на які впливають заряди поблизу поверхні датчика або рН розчинника (рис.3.3).

Коли змінюється концентрація глюкози, заряд який знаходиться поряд з поверхнею або рН змінюється в результаті ферментативної реакції, або конкурентного зв'язування. Внаслідок цього датчик змінює вимірювані властивості. Завдяки цьому, ми можемо кількісно оцінити концентрацію глюкози, але варто враховувати що зміна рН у розчині може впливати на результат.

Розкладання глюкози, що каталізує GOx, знижує рН розчину виділяючи іони водню, і генерує негативні заряди шляхом утворення іона глюконату. На рис. 3.4, зображені наносенсори з використанням електрохімічної технології виявлення. Вони представляють собою значну частину досліджень з виявлення глюкози і домінують в області комерційно доступних датчиків. Також, такі датчики мають ряд переваг. Однією з них є здатність оптично опитувати датчики через шкіру, без імплантування електродної системи. Так зване «розумне татуювання» для пацієнта, оскільки датчики будуть імплантовані в шкіру пацієнта, подібно до звичайних татуювань [30]. Але такі наносенсори тимчасові і потребують заміни в масштабі часу від декількох тижнів до декількох місяців, щоб не допустити похибку і втрату сигналу через деградацію.

Графен-металеві композитні датчики з майже-нульовим температурним коефіцієнтом опору. У цій статті [31] описана конструкція п'єзорезистивних тонкоплівкових датчиків на основі одношарового графену, з металевими наноострівцями. Визначальною характеристикою цих композитних тонких плівок є те, що вони можуть бути спроектовані так, щоб вони демонстрували температурний коефіцієнт опору (ТКО), близький до нуля. Механічний датчик з цією властивістю стійкий до перепадів температур - таких що виникають в реальному світі, наприклад, в натільному датчику. Металеві наноострівці вирощують на графені шляхом термічного осадження металів

(золота або паладію) при низькій номінальній товщині. У металевих плівках спостерігається підвищення стійкості до температури (позитивний ТКО), тоді як графен виявляє зниження стійкості до температури (від'ємний ТКО). Змінюючи кількість осадження, морфологію наноострівців можна налаштувати так, що скасовується ТКО металу та графену. Кількісний аналіз зображень скануючого електронного мікроскопа виявляє важливість поверхневого покриття металу (на відміну від загальної маси осадженого металу). Стійкість датчика до перепадів температури, які можуть виникнути на відкритому повітрі, демонструється, піддаючи сенсор пульсу модельованому сонячному опроміненню.

Носимі та імплантаційні датчики можуть бути розроблені для виявлення ряду хімічних, біофізичних, електромагнітних та теплових подразників. Однак деякі типи датчиків реагують лише на один тип подразника. Наприклад, тензодатчики на основі металевих тонких плівок чутливі не тільки до механічної деформації, але і до температури. Небажана чутливість до температури може виникнути через, наприклад, теплове розширення підкладки або те, що електропровідність металу залежить від температури (тобто температурного коефіцієнта опору). Металеві наноострівці - це роз'єднані структури, що утворюються з низькою номінальною товщиною, коли метали осідають шляхом фізичного осадження пари (рис.3.5).

Наноострівці утворюються при термічному випаровуванні металів на графені, що підтримує мідь. Підкладку міді травлять за допомогою основного розчину персульфату амонію. Потім плівку можна перенести на потрібну підкладку та використовувати її для електричних вимірювань. Морфологія, тобто взаємозв'язок або часткове покриття поверхні, також впливає на чутливість до температури.

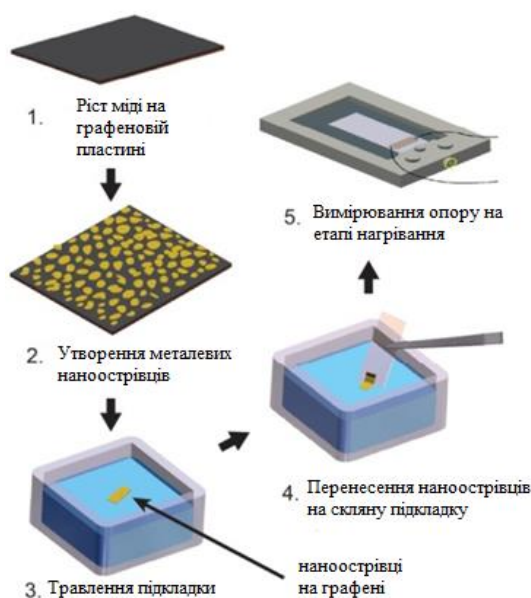


Рисунок 3.5 - Принципова схема процесу, що використовується для отримання та перенесення металевих nanoострівців на графен [31]

В цілому, ТКО можна контролювати як функцію номінальної товщини осадження. У випадках, коли необхідно усунути тепловий дрейф, підкладку з майже нульовим ТКО можна багаторазово виготовити, використовуючи або паладій, або золото, орієнтуючись на конкретну товщину. Крім того, ця процедура повинна бути простою для переробки під будь-який інший перехідний метал, який представляє інтерес для конкретного застосування пристрою.

Щоб імітувати правдоподібний сценарій у реальному світі, де відбулася різка подія нагріву, датчик (на зап'ясті) був розміщений над лампою сонячного імітатора, щоб імітувати пряме освітлення датчика сонцем. В результаті золоті nanoострівці з майже нульовим ТКО виявили мінімальний тепловий дрейф. З іншого боку, позитивний та негативний ТКО датчика зазнав значного дрейфу внаслідок нагрівання, викликаного прямим освітленням. При розміщенні на зап'ясті періодичне перенапруження, викликане скороченням променевої артерії, викликало періодичну зміну опору.

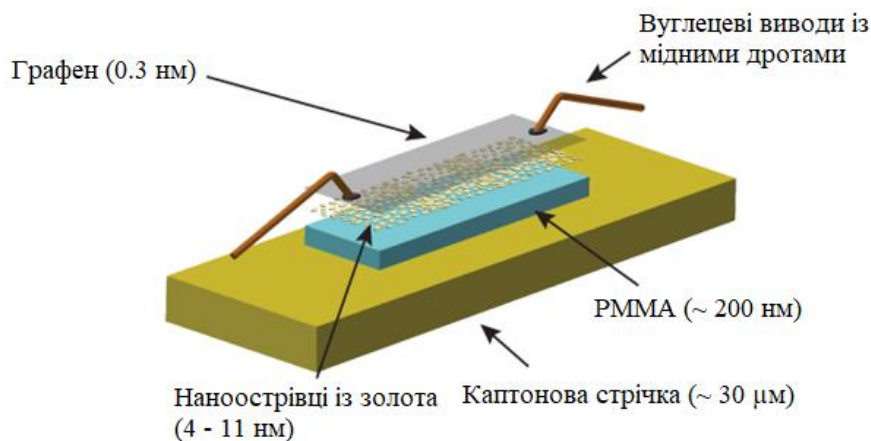


Рисунок 3.6 - Схема датчика з майже нульовим ТКО. Показаний порядок тонких плівкових шарів на натільному датчику та їх товщини [31]

В результаті, ця стратегія проектування матеріалів повинна бути легко узагальненою для інших перехідних металів для конкретних приладів (наприклад, хімічного зондування) та забезпечує надійну платформу для розробки пристроїв, що мінімізують коливання через температуру.

Сенсори біомолекул і ДНК. Один із способів визначення ДНК складається в зміні оптичних властивостей розчинів [32-36]. Для цієї мети, наночастинки модифікуються за допомогою тіолового зв'язку з одноланцюжковою ДНК, яка комплементарна ДНК мішені. Як видно на рис. 3.7 а, модифікація наночастинок впливає на кількість світла, поглиненого розчином, в порівнянні з немодифікованими наночастинками, що мають характерний пік близько 560 нм. Коли ДНК-мішень додають до розчину, відбувається агрегація - наночастинки зближуються і утворюють нанокластери. Це явище змінює оптичну густину розчину (рис.3.7 б). Положення піку поглинання є показником середнього розміру наночастинок. Коли пік зміщується в бік більших довжин хвиль від 560 нм до 600 нм, це означає, що середній розмір частинок в розчині більше через агрегації. Крім того, ширина піку значно збільшується після агрегації, що вказує на більш високий розподіл розмірів наночастинок у порівнянні з чистими наночастинками.

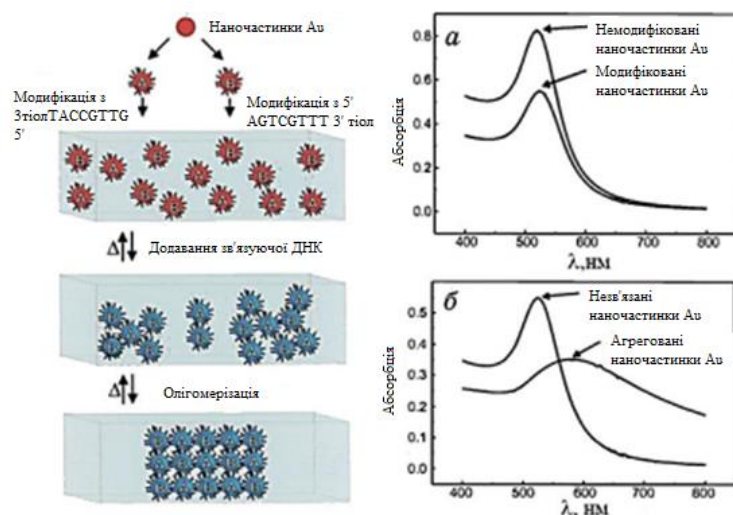


Рисунок 3.7 - Виявлення специфічної ДНК за допомогою наночастинок. Оптичний спектр чистих наночастинок Au у водному розчині (а); порівняння наночастинок Au, перед і після обробки (б) [44]

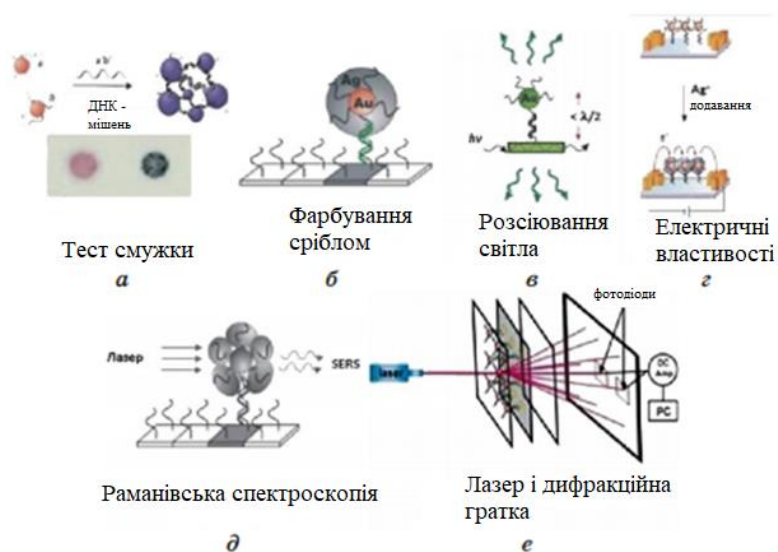


Рисунок 3.8 - Додавання матеріалу в розчин, що містить модифіковані золоті НЧ, призводить до утворення полімерної мережі наночастинок зі зміною кольору (а) [44, 45, 46]; дуже невеликі зміни температури дозволяють розрізняти невідповідність пари основ за допомогою фарбування сріблом [47, 48] або розсіювання світла [49] при сендвіч-аналізі (б-в); детектування зміни провідності при взаємодії ДНК з НЧ (г) [47]; детектування окремого сигналу від різних комплексів ДНК-Au НЧ (д) [47]; детектування ДНК в режимі реального часу за допомогою хемочутливості дифракційної ґратки і зонда з НЧ (е) [50]

Отже, наявність аналіту - цільової аналізованої речовини, (в цьому випадку ДНК) може бути визначена шляхом моніторингу оптичної щільності розчину. З урахуванням цього, моніторингом зміни оптичних властивостей при певних довжинах хвиль можна досліджувати сенсорні характеристики з використанням наступних принципів - сигнал, отриманий при 260 нм, відноситься до молекул ДНК, а сигнал, отриманий при приблизно 700 нм, відноситься до агрегатів ДНК з наночастинками золота.

Використання реакції ДНК з наночастинками золота є перспективним підходом для виявлення ниток ДНК шляхом регулювання температури розчину. Подібна концепція використовується і для створення сенсорів у вигляді паперових тест-смужок (рис. 3.8 а) [37-41]. Ця система не вимагає складного обладнання для аналізу і підходить в основному для визначення присутності аналізованої речовини, а не його концентрації. Виявлення невеликих концентрацій ДНК мішені є більш складним завданням.

Наночастинки золота, модифіковані одноланцюжковим ДНК, використовуються і для виявлення певної послідовності ДНК (рис.3.8 б) у форматі сендвіч-аналізу при їх гібридизації на прозорій підкладці [42,43]. При високій концентрації ДНК-аналіту, до поверхні прикріплюється багато наночастинок. Коли на сенсор потрапляє ДНК-аналіт, колір змінюється за рахунок агрегації. При більш низьких концентраціях зміни кольору не відбувається

Сенсори температури на основі квантових точок. Люмінесцентна термометрія, яка базується на змінах температурно-залежних характеристик сенсора, являє собою універсальний оптичний метод для вимірювання локальної температури [51-54]. Приклад такої системи показаний на рис. 3.9. У цій системі ультратонка плівка, що складається з КТ CdTe і подвійних гідроксидів, використана в якості датчика температури. Як видно на графіках на рис. 3.9, датчик на основі КТ зазнає значних змін як в інтенсивності люмінесценції, так і в положенні піку після термообробки протягом короткого періоду часу. При нагріванні сенсора від 23 до 80°C, інтенсивність

люмінесценції поступово зменшується з високою чутливістю реакції (1,47% на градус Цельсія). При нагріванні візуально спостерігається зміна кольору від жовто-зеленого до жовтого поряд зі зменшенням яскравості (графік б), а відтворюваність стабільна до восьми циклів.

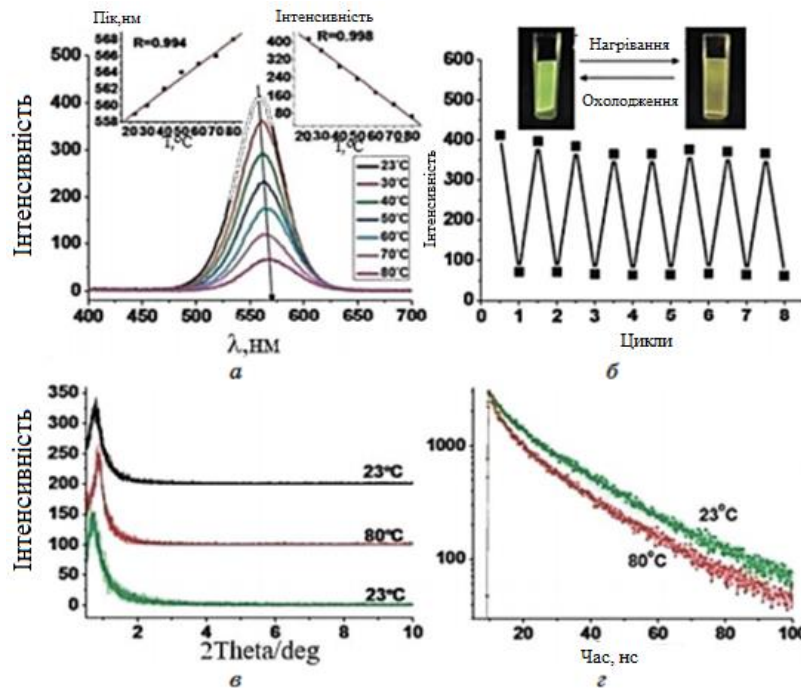


Рисунок 3.9 - Відповідь температурних датчиків з урахуванням КТ. Спектри люмінесценції КТ в діапазоні температур 23-80°C (а); оборотна реакція флуоресценції з восьми послідовних циклів (б); дифрактограми циклів нагрівання / охолодження (в); типові криві загасання флуоресценції (г) [55]

В якості високочутливих сенсорів температури також можуть використовуватися КТ складу Zn-AgInSe з різними співвідношеннями Zn/Ag, які мають залежність енергії і ширини піку люмінесценції від температури [56]. Люмінесцентний температурний сенсор на основі водного розчину КТ, інкапсульованих в фотонно-кристалічне волокно, був досліджений в [57]. Слід зазначити, що для вимірювання внутрішньоклітинної температури в фізіологічних умовах необхідно використовувати наносенсиори нечутливі до рН і іонної сили, так як від цього безпосередньо залежить точність і надійність визначаємих характеристик.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто основні механізми та принципи функціонування нанорозмірних гранульованих систем і наносенсорів на основі: вуглецевих, магнітних, молекулярних матеріалів, наночастинок металів, квантових точок, квантових ям, нанодротів. Наведено дані про особливості будови, характеристики, властивості наноструктур.
2. Встановлено, що введення наночастинок в мікроелектронні прилади підвищує їх коефіцієнт корисної дії, швидкодію, економність, довговічність, провідність, стабільність, теплову та радіаційну стійкість. Наноструктури на основі НЧ дозволяють створювати різноманітні електронні системи з унікальними властивостями та характеристиками, які можна змінювати у широкому діапазоні.
3. Досліджено, що сенсори на основі гранульованих систем мають гарну чутливість до температури, розпізнавання рідин, органічних молекул, різноманітних газів та біологічних об'єктів. Внаслідок невеликого розміру таких датчиків, можна створювати цілі системи із обробкою отриманих результатів експерименту прямо на поверхні кристалів. Завдяки наночастинками, ці системи можуть бути імплантовані в шкіру у якості біологічних сенсорів, для періодичного контролю за різноманітними показниками організму. Використання гранульованих систем призводить до значного покращення багатьох важливих параметрів приладів, але основними недоліками таких структур залишаються висока вартість технологічної процедури та синтез нових сполук.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Д.М. Костюк, С.І. Проценко, Л.В. Однодворець, І.В. Чешко, І.Ю. Проценко. Магніторезистивні властивості масиву наночастинок оксиду заліза у провідній матриці. – 2018. Журнал нано- та електронної фізики Том 7 № 4, 04039(7с) – 7 с.
2. Enrichi F., Quandt A., Righini G.C. Plasmonic enhanced solar cells: Summary of possible strategies and recent results. – 2018. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 82, Part 3, – P. 2433 – 2439.
3. M.M. Giangregorio, et al. Synthesis and characterization of plasmon resonant gold nanoparticles and graphene for photovoltaics. – 2013. Materials Science and Engineering: B. Vol. 178, Issue 9. – p. 559 – 567.
4. Maria Losurdo, et al. Enhanced absorption in Au nanoparticles/a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells exploiting Au surface plasmon resonance. – 2009. Solar Energy Materials and Solar Cells. Vol. 93, Issue 10. – p. 1749 – 1754.
5. Dyukov VG, Kulyupin YuA, Nepijko SA. Film diode. - 1977. USSR Patent No. 550066, Bull. No. 9, 202.
6. Nepijko SA. Potential distribution in discontinuous metal films under the electric current flow. - 1976. Mikroelektronika 5:86–89.
7. Borziak PG, Gorban' SA, Grigorieva LK, Nagaev EL, Nepijko SA, Chizhik SP. Mutual charging of small metallic particles. - 1990. Sov Phys JETP 70:347–352.
8. Alekseenko BV, Fedorovich RD. Anomalous electrophysical phenomena in dispersed metallic films. - 1979. Ukr Fiz Zhurnal 24:126–127.
9. Klein M. Switching and breakdown in films. - 1971. Thin Solid Films 7:149–177.
10. Pagnia H, Sotnik N. Bistable switching in electroformed metal-insulator-metal devices. - 1988. Phys Stat Solidi (a) 108: 11–65.
11. Fedorovich RD, Kiyayev OE, Naumovets AG, Ostranitsa AP. VCNR (switching phenomena) in regular chainlike islands. - 1991. In: Abstracts of 3 International Workshop “Electronic properties of metal/non metal microsystems”. Kleinheubach (FRG).
12. Alekseenko BV, Fedorovich RD, Tomchuk PM. The effect of adsorption on development of the VCNR in island metal film. - 1987. Mater Sci 13:161–166.
13. Alekseenko BV, Fedorovich RD. Electrical conductivity of discontinuous gold films with N-type voltage-current characteristics within the temperature range 30–290 K. - 1985. Ukr Fiz Zhurnal 30:1559–1563.

14. Sukhariier AS, Zagrebneva SV, Suchilin VM, Trusakov VM. Investigation of the emission properties of discontinuous gold films activated by BaO. - 1985. *Elektr Tekhn Ser 5*, No 2, 10–18.
15. Viduta LV, Fedorovich RD. Large-area cathode based on discontinuous metal films. - 1976. In *Abstracts of the 16 AllUnion Conference on Emission Electronics. Makhachkala (USSR)*, pp 40–41.
16. Wang Z, Li D, Yao B, Wang J. Electron emission from discontinuous gold-carbon compound film on etched porous aluminum oxide. - 2006.
17. Elinson. Cold cathodes. - 1974. *Sovetskoe Radio, Moscow*.
18. Yamaguchi E, Sakai K, Nomura I, Ono T, Yamanobe M, Abe N, Hara T, Hatanaka K, Osada Y, Yamamoto H, Nakagiri T. A 10-in surface-conduction electron-emitter display. - 1997. *J Soc Int Display* 5(4):345–348.
19. Borziak PG, Viduta LV, Kandyba PE, Kolesnikov DP, Kostenko AD, Kulyupin YuA, Fedorovich RD, Yastrebov VG. Cold electron emission from cathodes based on discontinuous molybdenum films. - 1973b. *Izv Akad Nauk USSR Ser Fiz* 37:2613–2616.
20. Benditskii AA, Danko DV, Fedorovich RD, Nepijko SA, Viduta LV. Use of dispersed systems of fine particles as IR detectors. - 1994. *Int J Electron* 77:985–988.
21. Viduta LV, Kiyayev OE, Naumuvets AG, Ostranitsa AP, Fedorovich RD. Electron emission from gold and graphite films of a special structure under conduction current and IR laser excitation. - 1992. *Sov J Commun Technol Electron (USA)* 37:98–104.
22. Belotskii ED, Tomchuk PM. Electron-phonon interaction and hot electrons in small metal islands. - 1990. *Surf Sci* 239:143–155.
23. Jung YC, Cho KH, Hong BY, Son SY, Kim DS, Whang D., Hwang SW , Yu YS, Ahn D. Fabrication and Gharacterization of Sidewell Defined Silicon-on-Insulator Single-Electron Transistor. - 2008. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. - Vol. 7, No 5. P. 544-550.
24. Miyaji K., Saitoh M. Hiramoto T. Compact Analytical Model for Room-Temperature-Operating Silicon Single-Electron Transistors With Discrete Quantum Energy Levels. – 2006. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. - Vol. 5, No 3. P. 167-173.
25. Tarakeshwar P., Palacios J.J., Kim D.M. Electrode-Molecule Interface Effects on Molecular Conductance. – 2009. *IEEE Transactions on Nanotechnology*. - Vol. 8, No 1. P. 16-21.
26. Каттралл Роберт В. Хімічні сенсори. - 2000. - М.: Науковий світ.

27. Ngeontae W, et al. Novel potentiometric approach in glucose biosensor using silver nanoparticles as redox marker. – 2009. *Sensors and Actuators BChemical*. 137:320–326.
28. The region ion sensitive field effect transistor, a novel bioelectronic nanosensor. – 2007. K. Risveden a, J.F. Ponten' a, N. Calander b, M. Willander b, B. Danielsson.
29. Dienerowitz, M. Optical manipulation of nanoparticles: a review. – 2008. M. Dienerowitz, M. Mazilu // *J. Nanophoton.* – № 2.
30. Khokhlova M. D., Lyubin E. V., Zhdanov A. G., Rykova S. Y., Sokolova I.A., Fedyanin A. A.. Normal and system lupus erythematosus red blood cell interactions studied by double trap optical tweezers: direct measurements of aggregation forces. – 2012. *Journal of Biomedical Optics*. O. 17, N. 025001.
31. Brandon C. Marin, Samuel E. Root, Armando D. Urbina, Eden Aklile, Rachel Miller, Aliaksandr V. Zaretski, and Darren J. Graphene–Metal Composite Sensors with Near-Zero Temperature Coefficient of Resistance. -2017. *ACS Omega*, 2, 2, 626-630
32. J. J. Storhoff, S. S. Marla, P. Bao, S. Hagenow, H. Mehta, A. Lucas, V. Garimella, T. Patno, W. Buckingham et al. Gold nanoparticle-based detection of genomic DNA targets on microarrays using a novel optical detection system. *Biosens.* – 2004. *Bioelectron.*, 19: 875.
33. C. Sonnichsen, B. M. Reinhard, J. Liphard, and A. P. Alivisatos. A Molecular Ruler Based on Plasmon Coupling of Single Gold and Silver Nanoparticles. *Nat.* – 2005. *Biotechnol.*, 23: 741.
34. W. J. Qin and L. Y. Yung. Nanoparticle-based Detection and Quantification of DNA With Single Nucleotide Polymorphism (SNP) Discrimination Selectivity. *Nucleic Acids*. - 2007. *Res.*, 35, No. 17: e111.
35. L. M. Zanolli, R. D'Agata, and G. Spoto. Functionalized gold nanoparticles for ultrasensitive DNA detection. *Anal. Bioanal.* - 2012. *Chem.*, 402: 1759.
36. S. Vial, Y. Berrahal, M. Prado, and J. Wenger. Single-Step DNA Detection Assay Monitoring Dual-Color Light Scattering from Individual Metal Nanoparticle Aggregate. *ACS*. - 2017. *Sens.*, 2, No. 2: 251.
37. R. Elghanian, J. J. Storhoff, R. C. Mucic, R. L. Letsinger, and C. A. Mirkin. Selective Colorimetric Detection of Polynucleotides Based on the Distance-Dependent Optical Properties of Gold Nanoparticles. - 1997. *Science*, 277: 1078.
38. F. Zarlaida and M. Adlim, *Microchim.* Gold and silver nanoparticles and indicator dyes as active agents in colorimetric spot and strip tests for mercury(II) ions: a review. - 2017. *Acta*, 184, No. 1: 45.

39. X. Liu, J.-J. Xiang, Y. Tang, X.-L. Zhang, Q.-Q. Fu, J.-H. Zou, and Y. H. Lin. Colloidal gold nanoparticle probe-based immunochromatographic assay for the rapid detection of chromium ions in water and serum samples. *Anal. Chim. - 2012. Acta*, 745C: 99.
40. Z. Gao, H. Ye, D. Tang, J. Tao, S. Habibi, A. Minerick, D. Tang, and X. Xia. Platinum-Decorated Gold Nanoparticles with Dual Functionalities for Ultrasensitive Colorimetric in Vitro Diagnostics. - 2017. *Nano Lett.*, 17, No. 9: 5572.
41. N. Nagatani, R. Tanaka, T. Yuhi, T. Endo, K. Kerman, Y. Takamura, and E. Tamiya. Gold nanoparticle-based novel enhancement method for the development of highly sensitive immunochromatographic test strips. *Sci. - 2006. Technol. Adv. Mater.*, 7: 270.
42. J.-M. Nam, C. S. Thaxton, and C. A. Mirkin. Nanoparticle-based Bio-Bar Codes for the Ultrasensitive Detection of Proteins. - 2003. *Science*, 301, No. 5641: 1884.
43. C.-H. Yeh, H.-H. Huang, T.-C. Chang, H.-P. Lin, and Y.-C. Lin. Using an electro-microchip, a nanogold probe, and silver enhancement in an immunoassay. - 2009. *Biosens. Bioelectron.*, 24, No. 6: 1661.
44. C. A. Mirkin, R. L. Letsinger, R. C. Mucic and J. J. Storhoff. A DNA-based Method for Rationally Assembling Nanoparticles Into Macroscopic Materials. - 1996. *Nature*, 382: 607.
45. J. J. Storhoff, A. D. Lucas, V. Garimella, Y. P. Bao, and U. R. Müller. Homogeneous detection of unamplified genomic DNA sequences based on colorimetric scatter of gold nanoparticle probes. - 2004. *Nat. Biotechnol.*, 22, No. 7: 883.
46. M. Cordeiro, F. F. Carlos, P. Pedrosa, A. Lopez, and P. V. Gold nanoparticles for diagnostics: advances towards points of care. - 2016. *Baptista, Diagnostics*, 6, No. 4: 43.
47. D.-K. Lim, A. Kumar, and J.-M. Nam, Detection of Non-Amplified Genomic DNA (Eds. G. Spoto and R. Corradini). - 2012. (Berlin: Springer: p. 6.
48. T. A. Taton, C. A. Mirkin, and R. L. Letsinger. Scanometric DNA array detection with nanoparticle probes. - 2000. *Science*, 289: 1757.
49. J. J. Storhoff, A. A. Lazarides, R. C. Mucic, C. A. Mirkin, R. L. Letsinger, and G. C. Schatz, *J. Am. Chem. Soc.* What Controls the Optical Properties of DNA-Linked Gold Nanoparticle Assemblies?. - 2000. *Chem. Soc.*, 122, No. 19: 4640.
50. R. C. Bailey, J.-M. Nam, C. A. Mirkin, and J. T. Hupp, *J. Am. Chem. Soc.* Real-time Multicolor DNA Detection With Chemoresponsive Diffraction Gratings and Nanoparticle Probes. - 2003. *Chem. Soc.*, 125, No. 44: 13541.

51. A. Bueno, I. Suarez, R. Abargues, S. Sales, and J. P. Martínez-Pastor. Temperature sensor based on colloidal Quantum Dots-PMMA nanocomposite waveguides. - 2012. *IEEE Sensors J.*, 12, No. 10: 3069.
52. G. de Bastida, F. J. Arregui, J. Goicoechea, and I. R. Matias. Quantum dots-based optical fiber temperature sensors fabricated by layer-by-layer. - 2006. *IEEE Sensors J.*, 6, No. 6: 1378.
53. B. Larión, M. Hernáez, F. J. Arregui, J. Goicoechea, J. Bravo, and I. R. Matías. Photonic Crystal Fiber Temperature Sensor Based on Quantum Dot Nanocoatings. - 2009. *Journal of Sensors*, 2009: 932471.
54. J.-H. Yoo, S. J. Park, and J. S. Kim, *Mol. Cryst.* - 2010. Fabrication and Characterization of Quantum Dot-Based Optical Fiber Temperature Sensor. *Liq. Cryst.*, 519, No. 1: 62.
55. R. Liang, R. Tian, W. Shi, Z. Liu, D. Yan, M. Wei, D. G. Evans, and X. Duan. A temperature sensor based on CdTe quantum dots-layered double hydroxide ultrathin films via layer-by-layer assembly. *Chem. Commun.*, 49, No. 10: 969.
56. Q. Ding, X. Zhang, L. Li, X. Lou, J. Xu, P. Zhou, and M. Yan. Temperature dependent photoluminescence of composition tunable $Zn_xAgInSe$ quantum dots and temperature sensor application. -2017. *Opt. Express*, 25, No. 16: 19065.
57. X. Yin, W. Wang, Y. Yu, Y. Geng, and X. Li. Temperature Sensor Based on Quantum Dots Solution Encapsulated in Photonic Crystal Fiber. - 2015. *IEEE Sensors J.*, 15, No. 5: 2810.