

Відгук офіційного опонента

Доктора фізико-математичних наук, професора, професора кафедри фізики
Національного технічного університету «Харківський політехнічний
інститут»

Рогачової Олени Іванівни

На дисертаційну роботу

Герус Анни Олегівни

на тему

«Сенсорні властивості дендритних точково-контактних наноструктур»

на здобуття наукового ступеня доктор філософії

за спеціальністю 104 «фізика та астрономія»,

галузь знань 10 «природничі науки».

Актуальність обраної теми.

Розробка квантових сенсорних технологій відноситься на цей час до числа важливих і перспективних напрямів наукових досліджень, що охоплюють широкий клас галузей наук і технологій. Серед сенсорів різного типу широке використання мають сенсори, які функціонують за принципом зміни електропровідності під дією зовнішніх факторів і це обумовлене їх високими технологічними характеристиками, простотою експлуатації, швидкістю одержання результатів, невисокою вартістю, а також можливістю створення портативних пристроїв на їх основі. Особливе місце серед таких сенсорів займають квантові точково-контактні структури, виготовлені за технологією мікроконтактної спектроскопії Янсона, які мають ряд переваг перед іншими сенсорами. Так, в точкових контактах Янсона реалізується стан з надвисокою густиною струму, що не призводить до руйнації контакту на противагу однорідним зразкам. Таким сенсорам вже присвячена низка робіт в тому числі в лабораторії, яку очолює проф. Камарчук Г.В. у ФТІНТі, і вже створені газочутливі наносенсори з параметрами, які перевершують параметри існуючих на даний час аналогів. Дослідження в цьому напрямі,

безумовно, потребують як подальшого поширення експериментальних робіт з використанням різних типів мікроконтактів, зовнішніх середовищ і технологій, розвитку теоретичних уявлень про процеси, що визначають сенсорний ефект, так і появи нових ідей і нетрадиційних методів підвищення якості квантових сенсорів. Безумовно, важливою проблемою залишається розробка сенсорів, які могли би детектувати складні газові суміші, і практично відсутні роботи з детектування рідин.

Дисертаційна робота Герус А.О. присвячена дослідженню сенсорних властивостей одного з дуже цікавих, мало досліджених і принципово відмінних від інших класів точково-контактних структур Янсона – дендритних структур, які створюються між двома електродами у розчині електроліту. Унікальною характеристикою такої системи є набір метастабільних квантових станів, що виявляються у процесі її еволюції. Важливість розуміння природи процесів в цьому об'єкті обумовлена тим, що дендритний точковий контакт Янсона має унікальний набір квантових фізико-хімічних перетворень і може стати чутливим елементом квантового сенсора нового типу. Використання циклічного комутаційного ефекту, який супроводжує зростання дендритів, дає якісно нові можливості для спостереження квантових перетворень у структурі та електричних властивостях у широкому колі об'єктів. Можна прогнозувати, що застосування цих можливостей буде корисним для створення квантових сенсорів нового типу, зокрема сенсорів, здатних до селективного детектування в газах та рідинах. Враховуючи сказане, не викликає сумніву, що тема дисертаційної роботи Герус А.О. актуальна як з точки зору подальшого розвитку фундаментальних уявлень в галузі квантової фізики, квантових розмірних ефектів, квантової сенсорики, так і з точки зору поширення практичних застосувань і створення нового класу селективних квантових систем.

Наукова новизна отриманих результатів.

В процесі виконання дисертаційної роботи був проведений комплекс експериментальних робіт по дослідженню характеру зміни електричної провідності у наноструктурах з дендритними точковими контактами Янсона в процесі циклічного комутаційного ефекту, який дав можливість спостерігати квантові перетворення у структурі та електричних властивостях у динамічному режимі. У свою чергу, застосування цього ефекту дало можливість визначити реакцію квантового об'єкта – дендритного точкового контакту Янсона (на основі Cu) – на вплив зовнішнього середовища (гази, рідина) і виявити сенсорні властивості таких нанооб'єктів.

Хочу відзначити основні нові найважливіші, з моєї точки зору, результати роботи:

1. Запропоновано оригінальний метод реєстрації енергетичних станів квантової системи дендритних точкових контактів Янсона шляхом вимірювання в динамічному режимі зміни електропровідності з часом в процесі циклічного комутаційного ефекту, який надає унікальні можливості для спостереження квантових перетворень у структурі та електричних властивостях цієї системи.

2. Запропоновано та розроблено метод селективного детектування складних газоподібних та рідких середовищ, заснований на формуванні квантової системи дендритних точкових контактів Янсона, синтезованих електрохімічним шляхом у досліджуваному середовищі, та реєстрації її енергетичних станів у динамічному режимі.

3. Встановлено залежність характеру гістограм електропровідності дендритних точкових контактів Янсона та їх енергетичних станів від типу та хімічного складу (включаючи концентрації компонентів) зовнішнього газового середовища.

4. Запропоновано феноменологічну модель активації циклічного комутаційного ефекту в дендритних точкових контактах Янсона, яка описує

природу процесів синтезу та руйнування контактів і визначає квантовий механізм селективного детектування складних газових сумішей та рідин.

5. Продемонстровано на практиці, що квантові дендритні точково-контактні сенсори Янсона спроможні селективно детектувати широке коло газових середовищ, від інертних газів до складних газових сумішей, що свідчить про можливості практичного застосування виявлених квантових сенсорних ефектів.

Практичне значення отриманих результатів.

Комплекс експериментальних результатів, одержаних у дисертаційній роботі, запропонований на їх основі новий метод селективного виявлення газів та рідин шляхом формування вихідної квантової системи за участі об'єкту, що аналізується, вказані автором можливості практичного застосування цих результатів і підтвердження реалізації цих можливостей в рамках даної дисертаційної роботи шляхом розробки і дослідження прототипу нового квантового сенсора, чутливим елементом якого є точковий контакт Янсона, – все це вказує на практичне значення отриманих даних. Запропонований підхід дозволяє розробити універсальний метод селективного виявлення багатьох газоподібних і рідких середовищ, у тому числі таких речовин, що важко піддаються виявленню. Реєстрація енергетичних станів системи здійснюється у динамічному режимі за допомогою дендритних точкових контактів Янсона, які синтезуються електрохімічно у досліджуваному газовому середовищі.

Треба обов'язково сказати і про фундаментальне значення одержаних результатів для розвитку фізичних уявлень в галузі квантової фізики і сенсорики. Відкриття та попереднє дослідження механізму селективного детектування складних середовищ на основі квантування провідності, що мали місце при виконанні даної дисертаційної роботи, створюють умови для подальших фундаментальних досліджень квантових сенсорних ефектів, спрямованих на пошук нових сенсорних механізмів та розвиток квантової

сенсорики. Дуже привабливо, наприклад, виглядає запропонований в дисертації метод визначення енергетичних станів квантової системи при проведенні дослідів (вимірюванні часових залежностей електропровідності) не в статичному, а в динамічному режимі. Одержані результати та їх інтерпретація стимулюють широке коло подальших експериментальних і теоретичних досліджень як в напрямі селективного виявлення газоподібних і рідких середовищ з використанням точкових контактів Янсона дендритного типу або інших типів, так і в напрямі інших, навіть загальних, питань фізики.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та їх достовірність.

Всі отримані експериментальні результати базуються на використанні добре апробованих методів виготовлення і аналізу досліджуваних зразків – дендритних контактів, на використанні сучасного обладнання і сучасних методів дослідження для досягнення основних цілей роботи, на всебічному аналізі експериментальних результатів, на узгодженні між собою даних, які одержані в роботі різними методами, а також на відповідності теоретичних і експериментальних результатів і свідчать про високий рівень обґрунтованості наукових положень та висновків, які сформульовані в дисертаційній роботі. Аналіз даних проводився в рамках сучасних концепцій квантової фізики, з урахуванням основних тенденцій і досягнень у галузі точково-контактної спектроскопії Янсона і нанотехнологій.

Результати роботи можна відтворити, базуючись на відкритих та описаних ефектах, які викладені у роботі. Всі результати дисертаційної роботи опубліковані в фахових виданнях, які пройшли рецензування, та були апробовані на міжнародних наукових конференціях.

Повнота викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації.

Основні отримані результати, що увійшли в дисертацію, викладені в 4

статтях, опублікованих у провідних наукових журналах, що індексуються в міжнародних наукометричних базах SCOPUS та Web of Science. Всі статті опубліковані в провідних журналах таких, як Springer Nature Applied Sciences та Nanomaterials, чого достатньо для дисертаційної роботи доктора філософії згідно встановленим вимогам МОН України, щодо публікацій основного змісту дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 «фізика та астрономія». Всі статті у співавторстві, і я можу підкреслити, що в одній статті дисертантка являється першим автором. Також можу зазначити, що описані в дисертації результати були апробовані на 19 вітчизняних та міжнародних наукових конференціях, на всіх з яких дисертант доповідав особисто.

Зауваження до дисертаційної роботи.

Природно, що дисертаційна робота не позбавлена деяких недоліків. До них можна віднести такі:

1. При описі методики експериментів в розділі 2 було би бажано, щоб були більш-менш компактно вказані точності визначення фізичних величин, які безпосередньо вимірювались в даній роботі (електропровідності, час), або могли впливати на результати експерименту (температура зовнішнього середовища, хімічний склад і концентрація сумішей газів та інших речовин, що використовувалися, якість виготовлення деталей приладів, кількість проведених експериментів для будування гістограм електропровідності і, відповідно, точність визначення енергетичних станів квантової системи та інші). Наприклад, у розділі 3 серед численних експериментальних даних немає інформації про можливий вплив температури на характеристики дендритних точкових контактів Янсона і у зв'язку з цим виникає питання: чи може змінити режим протікання струму в точковому контакті зміна температури оточуючого середовища у діапазоні 5-10 градусів під час експериментів?

2. В розділі 4 на рис 4.2,а наведена експериментальна залежність опору R дендритних точкових контактів від часу експозиції t в іонопровідному середовищі в процесі циклічного електрохімічного комутаційного ефекту в усьому інтервалі часу ($t = 1000$ сек), і червоним прямокутником виділено малу ділянку ($\Delta t = (926,1-927,3)$ с, яка показана на рис 4.2,б в другому масштабі. На рис. 4.2,б для цієї ділянки наведені експериментальна залежність $R(t)$ і для порівняння залежність $R(t)$, яка одержана на основі теоретичних розрахунків для опису процесу розчинення дендритного точкового контакту Янсона. Але, по перше, було би бажано, щоб таке порівняння було зроблено не для одної вузької ділянки, а хоча б для двох-трьох з різних часових областей, а, по друге, на рис. 4.2,б не наведені експериментальні точки, а проведена крива. Оскільки в тексті не вказано, з якою точністю визначались t і R , не вказані довірчі інтервали, судити про ступінь відповідності теоретичної та експериментальної кривих важко.

3. В розділі 4 на рис. 4.3 представлені експериментальна і розрахункова залежності часу переривання прямої провідності точкового контакту (час життя контактів) від його початкового опору із зазначенням довірчих інтервалів при вірогідності 95%. В результаті порівняння цих залежностей виявилось, що розрахункові значення часу життя точкових контактів значно вище, ніж отримані експериментально для тих самих опорів. Після проведеного аналізу причин такої невідповідності дисертантка приходить до висновку, що «розбіжності між модельними та експериментальними значеннями можуть бути пов'язані з тим, що модель електрохімічної кінетики, яка використовується для розрахунків, не враховує підвищену вільну поверхневу енергію, якою володіє наноструктура, що аналізується», що може бути результатом ефекту розміру або наслідком участі новоутвореної поверхні в анодному процесі. Оскільки добре відомо, що в загальному випадку властивості поверхні відрізняються від

властивостей в об'ємі, що особливо проявляється при розгляданні квантових об'єктів, було би бажано більш детально розглянути це питання.

Деякі термінологічні та стилістичні недоліки:

1. Не дуже вдало підібрані ключові слова: їх занадто багато, тому що деякі повторюються, маючи однаковий зміст і трохи іншу назву. Наприклад, одночасно серед ключових слів стоять: електрична провідність, електричний опір, провідність, питомий електричний опір, транспортні властивості (2 рази). Або: квантові розмірні ефекти, квантові ефекти, квантування провідності. В склад ключових слів входить «Раманівська спектроскопія», про яку зовсім не йде мова.

2. Дуже часто по тексту йдуть повтори. Наприклад, в різних варіантах, в різних розділах говориться про значення нанотехнологій, точкових контактів Янсона, квантових сенсорів і т.д., неодноразово розповідається про суть тих чи інших ефектів, повторюється опис методики досліджень.

Однак відзначені зауваження не знижують актуальності, достовірності й оригінальності одержаних в дисертаційній роботі результатів, їхнього практичного значення, не ставлять під сумнів достовірність та обґрунтованість основних положень, що виносяться на захист. Деякі зауваження можна розглядати як побажання проведення у майбутньому досліджень в цьому напрямі, пов'язаних з розширенням класу об'єктів дослідження, з удосконаленням запропонованого методу та проведенням більш глибокого теоретичного аналізу.

Загальна оцінка дисертаційної роботи та висновок.

Вважаю, що дисертаційна робота Герус Анни Олегівни «Сенсорні властивості дендритних точково-контактних наноструктур» є оригінальним,

самостійним та закінченим науковим дослідженням, в якому вирішено актуальну наукову задачу. За своїм спрямуванням, рівнем, новизною, об'ємом, використаними методами досліджень і отриманими результатами робота повністю відповідає спеціальності 104 – «Фізика та астрономія», а її автор Герус А.О. заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» в галузі знань 10 – «Природничі науки».

Офіційний опонент:

Доктор фізико-математичних наук,
професор, професор кафедри фізики

Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»



Олена РОГАЧОВА

Підпис *проф. Олена Рогачова*

ЗАСВІДЧУЮ:
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

[Signature]

"__" ____ 20__ р.

ЗАЙЦЕВ Ю.І.