

## ВІДГУК

офіційного опонента Бойко Ю.І. на дисертаційну роботу

**Саданова Євгенія Вікторовича**

**"Структурні характеристики, надміцність і радіаційна стійкість**

**нано- та пікорозмірних об'єктів"**

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук  
(спеціальність 01.04.07 - фізика твердого тіла)

**Актуальність теми дисертаційної роботи.** Однією з основних задач фізики твердого тіла є встановлення взаємозв'язку між атомною структурою і різними властивостями твердих тіл, такими як електропровідність, міцність і ін. В останні десятиліття однозначно встановлено, що розмірні фактори відіграють важливу роль у фізичних властивостях і технічних характеристиках матеріалів. Зокрема шлях створення наноструктур в кристалах відкрив нові можливості вдосконалення більшості важливих властивостей таких матеріалів. У цю ж логіку укладаються спроби виявити нові особливості у надмалих кристалічних об'єктів. Метою дисертаційної роботи Євгена Вікторовича Саданова є встановлення атомної структури нано- та пікорозмірних металевих і вуглецевих об'єктів та визначення закономірностей і фізичної природи процесів, які контролюють формування їх аномальних фізико-механічних і структурно-енергетичних властивостей. Струмопровідні голкоподібні об'єкти мають високий технологічний потенціал для використання в техніці в якості польових емітерів і зондів для різноманітних скануючих пристроїв. Зменшення таких об'єктів до нано- і пікорозмірного рівня відкриває нові можливості для застосування в нанотехнологіях, де потрібен контроль і маніпулювання окремими атомами. Тому **важливість і актуальність** виконаної роботи для розвитку молекулярної наноелектроніки не викликає сумнівів. Предмет дослідження - атомна структура, радіаційна стійкість, механічні та польові емісійні властивості металевих і вуглецевих нано- та пікорозмірних об'єктів повністю належать до кола класичних задач фізики твердого тіла. Для вирішення цієї багаторівневої проблеми потрібно використання високороздільних методик. Основні експерименти були виконані з застосуванням польової емісійної мікроскопії, що дозволило отримати інформацію на атомному рівні. Крім цього частина роботи виконувалася методами математичного моделювання.

Треба також відзначити той важливий факт, що вуглецеві ланцюжки, яким дисертант приділив в роботі значну увагу, дали початковий поштовх

розвитку всієї вуглецевої тематиці, на яку в наш час покладаються великі надії. Пошуки ланцюжків випадковим чином привели Смолі та інших авторів до відкриття фулеренів і у подальшому до отримання нанотрубок і графена. Це також свідчить на користь актуальності і важливості представленої дисертаційної роботи.

**Актуальність** дисертаційної роботи Саданова Є.В. підтверджується також і тим, що викладені результати було отримано в рамках комплексних наукових програм та тем відомчих завдань НАН України та Проектів Українського науково-технологічного центру (STCU).

На моє переконання запланована програма дослідження, що включає встановлення атомної структури нано- та пікорозмірних металевих і вуглецевих об'єктів, визначення закономірностей і фізичної природи процесів, які контролюють формування їх аномально високі фізико-механічні властивості, виконана у повній мірі. Результати дисертації являються **обґрунтованими і достовірними**, оскільки вони отримані на основі перевірених експериментальних методів і адекватних фізичних моделей досліджуваних явищ. Ряд положень і висновків, що виносяться на захист, знайшли своє підтвердження при порівнянні з результатами інших авторів, отриманих іншими методами.

Дисертаційна робота складається з вступу, семи розділів, висновків і списку використаних джерел з 433 найменувань. Дисертація оформлена відповідно до вимог ДАК МОН України до дисертацій.

У **вступі** наведені загальні відомості: короткий опис роботи, обґрунтування її актуальності, зв'язок роботи з науковими програмами, цілі, завдання та методи дослідження, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача та інформація про апробацію результатів дисертації,

**Перший** розділ присвячений огляду літератури, аналізу сучасного стану досліджуємої тематики і постановці завдань досліджень.

У **другому** розділі описані конструкція розробленого дисертантом польового емісійного мікроскопа і метод підвищення якості польових іонних зображень, який захищений авторським свідоцтвом.

**Третій** розділ присвячений розгляду особливостей формування іонних зображень моноатомних вуглецевих ланцюжків. В розділі обговорюється аналітична модель розрізнення польових іонних зображень пікооб'єктів, яка показала, що перехід від стандартних зразків до субнанорозмірних призводить до значного підвищення рівня роздільної здатності. На прикладі

виявлення елементарних субнанотрубок і двомірних вуглецевих ланцюжків, а також отримання динамічних зображення ланцюжків із зламами продемонстровані можливості такої надвисокої роздільної здатності, що перевершує номінальну на порядок.

У **четвертому** розділі розглянуто метод отримання зображень вуглецевих ланцюжків в польовому електронному режимі. Показано, що отримані в цьому режимі зображення ланцюжків відповідають зображенням молекулярних орбіталей в різних квантових станах. Доказом такого ствердження є практично повний збіг виду отриманих експериментальних зображень з розподілом квадрата хвильової функції, що розрахована в рамках квантово-механічної моделі. Для оцінки термічного вкладу в розмиття зображень ланцюжків проведено математичне моделювання їх коливань при кімнатній температурі.

**П'ятий** розділ присвячений дослідженню голчастих нанорозмірних кристалів W і Mo, визначенню їх міцності і дослідженню процесів руйнування та деформації. У розділі описуються розвинені методи навантаження голчастих зразків поверхневими силами Максвелла, що дозволяють досягати гігапаскального рівня навантажень. З використанням цього методу визначено гранично можливі рівні міцності вольфраму і молібдену. Проведено тестування на міцність бікристальних нанооб'єктів та отримано значення когезійної міцності меж зерен з несумірною атомною структурою.

У **шостому** розділі досліджені механічні характеристики пікорозмерних об'єктів. Описано експерименти по визначенню міцності вуглецевих ланцюжків і графенових нанолістів. Міцність графена, що отримана методом високопольового навантаження виявилася порівняно близькою до міцності, яка була виміряна методом біаксіальної деформації. На відміну від графена, міцність ланцюжків була визначена вперше, а отримані значення підтвердили передбачення, що моноатомні вуглецеві ланцюжки є найбільш міцними на розтягнення об'єктами в природі. У цьому ж розділі наведені результати математичного моделювання процесів руйнування ланцюжків при високих температурах, що виявили суттєву відмінність поведінки ланцюжків від тривимірних кристалів. Крім цього побудована аналітична модель польового випаровування вуглецевих матеріалів, яка показала виключно високу стійкість вуглецевих ланцюжків до зазначеного процесу.

**Сьомий** розділ присвячений розгляду результатів дослідження радіаційного впливу на структуру голчастих нанокристалів при різних

енергіях опромінення і типах бомбардуючих частинок. Було визначено спектр дефектів, що виникають в зразках вольфраму при високоенергетичному опроміненні осколками розпаду каліфорнію і їх просторовий розподіл. При низькоенергетичному опроміненні досліджувалися процеси радіаційно-індукованої поверхневої самодифузії. Проаналізовано розподіл точкових дефектів на конкретних ділянках поверхні і їх подальша еволюція в процесі опромінення. У цьому розділі описано спеціально розроблений метод експериментального визначення енергії утворення власних міжвузлових атомів, який був успішно застосований для кількісного визначення енергії утворення міжвузлових атомів на межах зерен. Такий підхід дозволив дисертанту зробити висновки про зниження рухливості власних міжвузлових атомів вздовж меж зерен.

Результати дисертації Саданова Є.В. є новими і обґрунтованими; вони опубліковані в 43 наукових роботах в вітчизняних та іноземних фахових наукових виданнях, серед яких 3 глави в колективних монографіях і 3 патенти України. Автореферат правильно і повно відображає зміст дисертації.

До основних найбільш значимих результатів дисертації на мій погляд можна віднести наступне:

1. Вперше з застосуванням електронної емісійної мікроскопії автору вдалося розрізнити просторові конфігурації атомних орбіталей, що відповідають різним квантовим станам атома на кінці вуглецевого атомного ланцюжка.

2. Вперше розроблена аналітична модель розрізнення польових іонних зображень нанооб'єктів: вуглецевих нанотрубок, нанодротів та лінійних моноатомних ланцюжків і експериментально реалізовано надвисоке розрізнення на рівні ( $0.34 \pm 0.05 \text{ \AA}$ ).

3. Вперше експериментально виявлені найтонші вуглецеві нанотрубки субнанометрового діаметра, атомна будова яких суттєво відрізняється від структури фулеренових нанотрубок.

4. Вперше експериментально виміряна міцність на розрив моноатомних вуглецевих ланцюжків і графенових нанолістів. Межа міцності вуглецевих ланцюжків істотно перевищила межу міцності всіх відомих матеріалів, включаючи вуглецеві нанотрубки і графен

5. Методом молекулярної динаміки встановлено, що локальні значення відносної деформації атомних зв'язків всередині карбінового ланцюжка при

кімнатних і підвищених температурах можуть істотно перевищувати критичні значення деформації руйнування атомних зв'язків при абсолютному нулі.

6. Методами польової іонної мікроскопії виявлено існування явища далекодуючої підповерхневої взаємодії власних міжвузлових атомів з адатомами радіаційного походження. Встановлено, що в результаті такої взаємодії при опроміненні вольфраму гелієвими атомами в кеВ-ному діапазоні енергій відбувається специфічне самоузгоджене формування поверхневих ланцюжків адатомів з міжатомними відстанями близько одного нанометра.

Разом з тим, по роботі "Структурні характеристики, надміцність і радіаційна стійкість нано- та пікоразмерних об'єктів" Саданова Є.В. можна висловити деякі зауваження і побажання, а саме:

1. Для аналізу енергетичних характеристик нано- та пікооб'єктів, а також для багатьох практичних застосувань значний інтерес представляють дані про їх структуру та властивості при підвищених температурах. На жаль, дисертант не в повній мірі реалізував можливості проведення польових іонно-мікроскопічних досліджень цих цікавих об'єктів при підвищених температурах.

2. У розділі «Методика» недостатньо повно обґрунтовано вибір вольфраму і вуглецю в якості основних матеріалів дослідження.

3. Деякі підрозділи огляду не мають висновків, які б пояснювали формулювання мети і постановку завдань, що вирішував дисертант при виконанні досліджень.

4. На польових електронних і іонних зображеннях, представлених в дисертації, як правило, не вказано масштаб.

5. У тексті зустрічаються русизми, особливо в дієприкметникових зворотах. В окремих випадках відсутні коми, що ускладнює сприйняття тексту при його читанні.

6. На сторінках 163 і 183 замість формули (5.1) і математичного виразу, який наведено в тексті знаходяться рисунки.

Але вказані зауваження не впливають істотно на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Саданова Є.В. "Структурні характеристики,



надміцність і радіаційна стійкість нано- та пікорозмірних об'єктів", яка є закінченим науковим дослідженням.

Дисертаційна робота Саданова Є.В. виконана на високому науковому рівні і має пряме відношення до фізики твердого тіла. В ній досліджені властивості одновимірних кристалічних структур та радіаційна стійкість. Дисертантом продемонстрований високий рівень володіння методами високопольових досліджень і комп'ютерного математичного моделювання. **Практичне значення** отриманих результатів полягає в тому, що конкретні результати роботи можуть бути використані для знаходження оптимальних умов формування атомної топографії поверхні з використання широкого класу радіаційно-стимульованих фізичних процесів в твердих тілах в умовах дії надсильних електричних полів. Отримана в дисертації інформація створює основу для розробки високопольової нанотехнології спрямованої на модифікації поверхні металевих і вуглецевих матеріалів.

Вважаю, що дисертація Євгена Вікторовича Саданова повністю відповідає паспорту спеціальності 01.04.07 та є завершеною науковою роботою високого рівня і задовольняє всім вимогам, які застосовуються до дисертацій, зокрема з пунктами 9, 10 і 12 "Порядку присудження наукових ступенів и присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника" і вимогам Департаменту по атестації кадрів Міністерства освіти і науки України, а її автор, безумовно, заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,

професор кафедри фізики кристалів

Харківського національного університету

ім. В.Н. Каразіна МОН України

Доктор фізико-математичних наук, професор

*Ю.І. Бойко*

Ю.І. Бойко

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ  
Начальник відділу  
кадрів

