

## ВІДГУК

офіційного опонента Багмута О.Г. на дисертаційну роботу

Саданова Євгенія Вікторовича

**«Структурні властивості, 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)

Докторська дисертація Саданова Євгенія Вікторовича присвячена актуальній темі – розробці методів створення надмалих електропровідних об'єктів та аналізу їх фізико-механічних властивостей. Зараз такі об'єкти вже застосовуються як зонди в різноманітних пристроях для сканування. Зрозуміло, що зменшення розмірів зондів до атомного рівня може суттєво покращувати розрізнення та інформативність цих пристроїв. Крім того, в найсучасніших електронних мікроскопах такі об'єкти використовуються як холодні катоди, які забезпечують монохроматичність електронної емісії. Зменшення розміру катодів підсилює їх точковість та покращує розрізнення електронних мікроскопів. Стабільність роботи холодних катодів залежить від бомбардування їх поверхні іонами залишкових газів, що потребує досконалого дослідження цих процесів та розробки методів відновлення структури поверхні електронних емітерів *in situ*. Враховуючи, що надмалі металеві об'єкти відіграють важливу роль у сучасних прецизійних приладах, створення емітерів та зондів атомного розміру, дослідження їх структури, фізико-механічних і емісійних властивостей та поведінки при низькоенергетичному опроміненні є **актуальним** для розвитку сучасної фізики твердого тіла, електроніки та нанотехнологій. Дисертацію виконано відповідно до плану науково-дослідних робіт ННЦ ХФТІ за держбюджетними темами НАН України, що також свідчить про важливість і актуальність представленої роботи.

Дисертація Саданова Є.В. є самостійною завершеною науковою працею, яка присвячена встановленню атомної структури нано- та пікорозмірних металевих і

вуглецевих об'єктів, визначенню закономірностей та фізичної природи процесів, що контролюють формування їх аномально високих фізико-механічних і структурно-енергетичних властивостей та радіаційну стійкість.

Постановка задач, що вирішувались в дисертації, спрямована на подальший розвиток високопольових методів дослідження нано- та субнанорозмірних об'єктів. В роботі сформульовано принципово нові уявлення про фізику процесів, які відбуваються з пікорозмірними об'єктами в надпотужних електричних полях. Дисертантом вирішено важливе питання підвищення латерального розрізнення польових електронних мікроскопів до рівня, достатнього для прямого спостереження внутрішньоатомної електронної структури моноатомних вуглецевих ланцюжків. Розроблено метод їх виготовлення шляхом високопольового анравелінга. На вуглецевих пікорозмірних об'єктах отримані польові електронні зображення молекулярних орбіталей карбінів. Встановлені особливості атомної структури елементарних вуглецевих субнанотрубок. Досліджені закономірності руйнування і польового випаровування вуглецевих ланцюжків, графена і нанокристалів вольфраму та молібдену при навантаженні поверхневими силами Максвелла. Визначено атомні механізми явища радіаційно-стимульованої поверхневої дифузії та її ролі в ерозії поверхні та процесах самолікування поверхневих пошкоджень.

Достовірність одержаних результатів та наукова обґрунтованість висновків дисертаційної роботи базуються на адекватних фізичних моделях досліджених явищ та вичерпному аналізі експериментальних результатів, отриманих перевіреними методиками. Ряд положень і висновків, що виносяться на захист, знайшли своє підтвердження при порівнянні з результатами інших авторів, отриманими іншими методами. Значна частина результатів дисертації отримана вперше.

Дисертація **Саданова Є.В.** складається з вступу, семи розділів, висновків, переліку використаних джерел та публікацій здобувача. Дисертаційний матеріал вичерпно ілюстровано мікрофотографіями та пояснювальними схемами, перелік

використаних літературних джерел дозволяє повністю ознайомитися з проблемою досліджень.

Вступ містить необхідну інформацію щодо оформлення дисертації.

Перший розділ є оглядом літератури за основними проблемами, що вирішуються в дисертації **Саданова Є.В.**

У другому розділі наведено опис конструкції польового емісійного мікроскопа та розробленого дисертантом методу, покращення іонно-мікроскопічних зображень металевих нанорозмірних об'єктів.

У третьому розділі описана аналітична модель розрізнення польових іонних зображень пікооб'єктів, в якій сформульовано принципово нові уявлення про фізику формування іонних зображень надмалих об'єктів. Продемонстровано, що використання моноатомних вуглецевих ланцюжків як вістрійних зразків дослідження покращує розрізнення до субангстремного рівня, що на порядок перевищує номінальне розрізнення іонного мікроскопа. З використанням такого розрізнення отримані дані про будову елементарних субнанотрубок та зафіксовані динамічні зображення вуглецевих ланцюжків зі зламами в процесі стереоконформаційних перетворень. Четвертий розділ присвячений польовим електронним зображенням вуглецевих ланцюжків. В цьому розділі показано, що і в автоелектронному режимі пікорозмірні об'єкти підвищують розрізнення до рівня, який дозволив отримати зображення кінцевих атомів вуглецевих ланцюжків (карбінів) у вигляді молекулярних орбіталей у двох різних квантових станах. Зафіксовані спонтанні перетворення ланцюжків з одного стана в другий.

У п'ятому розділі розвинені методи механічного навантаження зразків електричним полем, що дозволило провести експерименти з вимірювання міцності голчастих нанокристалів W і Mo. На підставі пошарового аналізу фрактограм руйнування встановлено характер пластичної деформації, що передуює руйнуванню. Значна частина розділу присвячена аналізу структури ядра гвинтової дислокації  $\frac{1}{2} \langle 111 \rangle$  в вольфрамі та особливостям мікротопографії поверхні на сходинках, які виникають при переміщенні дислокації. Виміряна

когезійна міцність меж зерен з несумірною атомною структурою. У шостому розділі метод навантаження електричним полем використано для експериментального визначення міцності вуглецевих ланцюжків і графенових нанолістів. Отримане значення міцності ланцюжків перевищило міцність всіх відомих матеріалів. Для дослідження динаміки руйнування вуглецевих ланцюжків при високих температурах було застосоване комп'ютерне моделювання, яке виявило суттєву різницю механічної поведінки одновимірних вуглецевих ланцюжків і тривимірних кристалів при підвищених температурах. Сьомий розділ присвячений дослідженню радіаційних порушень при низькоенергетичному опроміненні. Іонно-мікроскопічний аналіз розподілу радіаційних адатомів на плоских ділянках поверхні виявив існування явища далекодіючої взаємодії власних міжвузлових атомів з адатомами радіаційного походження. В розділі описано розроблений дисертантом високопольовий спосіб експериментального визначення енергії утворення міжвузлових атомів на межах зерен, який дав можливість проаналізувати зерномежеву рухливість міжвузлових атомів. За допомогою комп'ютерного моделювання виявлено колективне зміщення значних груп поверхневих атомів, яке приводить до радіаційно-стимульованого самолікування лінійних кластерів поверхневих вакансій. Цей процес описаний в рамках моделі поверхневих воїдїонів.

Серед найбільш вагомих та цікавих результатів роботи Саданова Є.В. слід відзначити таке:

- створення автором аналітичної моделі розрізнення польових іонних зображень нанооб'єктів: вуглецевих нанотрубок, нанодротів та лінійних моноатомних ланцюжків, а також експериментальну реалізацію надвисокого розрізнення на рівні ( $0.34 \pm 0.05 \text{ \AA}$ ).

- отримання зображень кінцевих атомів вуглецевих ланцюжків у вигляді молекулярних орбіталей.

- вимірювання міцності на розрив моноатомних вуглецевих ланцюжків і графенових нанолістів

- виявлення явища далекодіючої підповерхневої взаємодії власних міжвузлових атомів з адатомами радіаційного походження.

Основний зміст дисертації Саданова Є.В. викладено у 43 наукових публікаціях, зокрема, у 3 главах колективних монографій видавництв Taylor & Francis (USA), Formatex Res. (Spain) і Wiley-VCH Verlag (Germany) та у 37 визнаних фахових вітчизняних та міжнародних журналах, таких як *Physical Review*, *Nano Letters*, *Surface Science*, *Materials Letters*, *Philosophical Magazine* та в 3 патентах України. Матеріали 21 тези доповідей на українських та міжнародних наукових конференціях додатково відображають наукові результати дисертації та є свідченням достатньої апробації роботи. Для всіх публікацій наведено особистий внесок здобувача. Зміст автореферату дисертації повністю відповідає основним положенням дисертаційної роботи.

Таким чином, дисертаційна робота Саданова Є.В. є важливим науковим дослідженням, в якому наведено велика кількість цінних результатів і виконано їх ґрунтовний аналіз. В той же час можна зробити деякі зауваження.

1. Автором розроблений ряд високопольових методик формування атомно-гладкий поверхні нанорозмірних об'єктів, проте в тексті дисертації практично відсутня кількісна інформація про вплив запропонованої методики на їх експлуатаційні характеристики.

2. Автором експериментально виявлено існування в приповерхневих шарах вольфраму далекодіючої взаємодії міжвузлових атомів з радіаційними адатомами. При описі такого типу взаємодії автор обмежився лише схематичними якісними поясненнями. Механізм цього цікавого явища залишається нез'ясованим.

3. На польових іонно-мікроскопічних мікрофотографіях здебільшого відсутні масштабні мітки та не завжди приводиться індексація поверхневих фасеток, що утруднює їх інтерпретацію.

Слід зазначити, що наведені зауваження не є принциповими і не зменшують загальної значущості дисертаційної роботи Саданова Є.В. Результати



наукових досліджень, за якими Саданов Є.В. захистив кандидатську дисертацію, в докторську дисертацію не внесені.

Вважаю, що за своєю спрямованістю та змістом представлена дисертація повністю відповідає обраній спеціальності 01.04.07 - фізика твердого тіла. За актуальністю теми досліджень, науковою новизною та обсягом результатів, обґрунтованістю висновків, науково-практичною значимістю дисертаційна робота Саданова Є.В. «Структурні властивості, надміцність і радіаційна стійкість нано- та пікорозмірних об'єктів» відповідає всім вимогам, що пред'являються до дисертацій, зокрема 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

Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут» МОН України

Доктор фізико-математичних наук, професор



Олександр БАГМУТ

Підпис доктора фізико-математичних наук,  
професора Багмута О.Г. засвідчую:

вчений секретар

Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»

професор



Олександр ЗАКОВОРОТНИЙ