

## Відгук

**офіційного опонента на дисертаційну роботу Лєня Ю.А.  
«Дослідження взаємодії кисню з поверхнею кремнію (001),  
вкритою передадсорбційними шарами»,  
подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка**

Останнім часом різноманітні електронні прилади стали невід'ємною частиною життя людини, і їх зручність в роботі, енергоекономічність та надійність вимагають неперервного вдосконалення наноелектронних технологій, які базуються на досягненнях нанофізики та нанохімії. Одним з найбільш успішних напрямів розвитку наноелектроніки є кремнієва технологія, яка вдало поєднує можливості використання поверхні кремнію з його напівпровідниковими властивостями та тонких шарів продуктів взаємодії з цією поверхнею інших речовин з широким спектром електронних властивостей, від діелектричних до металічних. Тому експериментальне дослідження механізмів взаємодії з поверхнею Si(001) співадсорбованих кисню та Ge, Sb, Cr, Ti, представлене в дисертаційній роботі Ю.А. Лєня, є *актуальним*. Дисертаційна робота проводилася за програмою основних напрямів наукових досліджень кафедри нанофізики та наноелектроніки факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка в межах чотирьох держбюджетних науково-дослідних тем і одного гранту Міністерства освіти і науки України.

Сформульовані в дисертації Ю.А. Лєня наукові положення та висновки є цілком *обґрунтованими*. Вони базуються на ретельному доборі сучасних методів дослідження, значному обсязі отриманих результатів експерименту і сумлінному їх аналізі. Висока *достовірність висновків*, сформульованих на підставі результатів роботи, обумовлена високою чутливістю і роздільною здатністю застосованих методів дослідження та несуперечливістю даних, отриманих різними методами. В роботі використано широкий набір експериментальної техніки: оже-електронна спектроскопія, іонізаційна спектроскопія, растрова електронна мікроскопія. Комплексний підхід до застосування в рецензованій дисертації методичних засобів обумовлює *надійність* вимірів.

*Новизна* результатів, наведених в дисертаційній роботі, визначається тим, що більшість з них одержана вперше або відтворює раніше відомі дані з більшою вірогідністю. Найбільш суттєвими результатами є такі:

- Показано, що для визначення хімічного стану атомів хрому на поверхні кремнію Si(001) можна використовувати іонізаційну лінію Cr M<sub>2,3</sub>.
- При окисленні поверхні кремнію, яка вкрита плівкою титану, відбувається зміна в іонізаційних лініях титану M<sub>2,3</sub>. В енергетичному спектрі ІЛ з'являється додатковий пік з положенням 43,5 еВ, що може бути характерною ознакою утворення оксиду титану.
- Встановлено, що субмоношарові плівки Ti та Cr на поверхні Si(001) виступають в якості пришвидчувача процесу окислення. Каталітичні властивості субмоношарової плівки титану слабші, ніж відповідної плівки хрому.

Наукові положення і висновки дисертаційної роботи *повністю викладено* у 32 публікаціях, серед яких 1 стаття у збірнику і 8 у фахових виданнях, що реферуються. Хоча всі статті опубліковані у співавторстві, особисто Ю.А. Ленем підготовлено повністю 5 статей, а в 4 інших – окремі розділи. Матеріали дисертації пройшли серйозну апробацію на багатьох (21) міжнародних та вітчизняних наукових конференціях і семінарах, на які було представлено 23 доповіді. Опубліковані наукові праці, що викладають матеріали дисертації, їх кількість, обсяг, рівень видання та особистий внесок здобувача безперечно відповідають вимогам, встановленим для присудження наукового ступеня. Зміст *автореферату* є ідентичним основним положенням дисертації.

Дисертаційна робота Ю.А. Леня складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків і списку літератури. Матеріали дисертації викладено на 174 сторінках тексту з 74 рисунками і 2 таблицями. Бібліографія включає 215 найменувань, серед яких 183 посилання на праці інших авторів. Дисертаційну роботу написано ясною, логічною мовою, оформлено охайно.

У *вступі* обґрунтовано актуальність роботи, її мету, сформульовані *задачі дисертаційної роботи*, а також приведено у стислій формі основні наукові результати і їх практичне значення. *Перший розділ* містить аналітичний огляд сучасного стану знань про поверхню Si(001) та взаємодію кисню з цією поверхнею, попередньо вкриту адсорбованими шарами Ge, Sb, Cr, Ti. Також розглянуті відомості про взаємодію зазначених адсорбатів з підкладкою у відсутності кисню. У *другому розділі* подано опис застосованих в роботі експериментальних методів, надвисоковакуумної камери і процедур приготування зразків. У *третьому, четвертому і п'ятому розділах* представлено результати дослідження взаємодії кисню з поверхнею Si(001), вкритою відповідно: Sb, сплавом  $Si_{1-x}Ge_x$  та Cr чи Ti. Вони включають отримані дані про механізми формування оксидів кремнію у перелічених системах, які визначають окиснювальну активність поверхні. У *висновках* підсумовані головні наукові результати роботи і окреслені шляхи їх практичного використання.

До роботи слід зробити такі *зауваження*:

1. Не виглядають вдалими назви розділів 2 і 3. Розділ 2 охоплює не всю експериментальну частину, а лише методичні питання. Так само розділ 3 охоплює не всі результати, а лише ті, що стосуються системи O/Sb/Si(001).

2. На мій погляд, об'єктом дослідження, як більш загальним поняттям по відношенню до предмету дослідження, можна вважати поверхню Si(001), вкриту співадсорбованими на ній киснем та Ge, Sb, Cr, Ti, а процеси, що відбуваються у цій системі, я б відніс до предмету дослідження. (С.с. 23-24 дисертації, с. 2 автореферату).

3. У розділі 1.1 (с. 31-33) наведені літературні дані про поверхню Si(001), зокрема про її низьку активність до окиснення. Проте не вказано кількісної величини коефіцієнта прилипання кисню, без якої важко зрозуміти наскільки низькою є ця активність.

4. Є недоліки у представленні деяких матеріалів. Так, на с. 36 рис. 1.4 приведено у надто дрібному масштабі, що зводить нанівель можливість отримання з рисунку інформації про  $(2 \times n)$  реконструкцію поверхні, до того ж величина  $n$  не вказана. На с. 61, рис. 1.16, немає позначок позицій адатома Ti ("P", "V"), які розглядаються у тексті. У рівнянні (1.3) на с. 74 не збалансовані коефіцієнти хімічної реакції.

5. Метод визначення коефіцієнта прилипання молекулярного кисню на поверхні Si(001) в присутності субмоношарового покриття Cr, Ti зазначено як такий, що

уособлює наукову новизну одержаних результатів. Тому у розділі 2.4 (с.с. 99-101) варто було б докладніше зупинитися на процедурі калібрування оже-спектрометра для отримання кількісних даних щодо  $\text{SiO}_2$ , Cr, Ti конкретно у даній роботі, а не обмежуватися посиланням на літературне джерело [194]. Адже всі кількісні дані у розділах 3-5 виражені у відносних одиницях величини оже-піка, а не ступеня покриття.

б.Є лексичні вади, наприклад, «окислення» (с. 2 і далі); «металевічним типом провідності» (с 20 і далі); «змочуючвальний» (с. 36), «стискаючдльні» (і т.п. на с. 40); «випуекаромінюється» (сю 83), тощо.

В цілому рецензована дисертаційна робота є *завершеним дослідженням з актуальної теми*, як з наукової, так і з практичної точок зору. Висловлені вище зауваження не знижують моєї високої оцінки цієї роботи, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності розкривають механізми взаємодії кисню з поверхнею Si(001), вкритої тонкими плівками Sb, Cr, Ti, а також сплаву  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , і *можуть бути використані* в технологічних розробках виготовлення елементів мікро- і наноелектронних приладів на основі кремнію.

На підставі викладеного вважаю, що рецензована робота Ю.А. Леня «Дослідження взаємодії кисню з поверхнею кремнію (001), вкритою передадсорбційними шарами» за своїм обсягом і методичним та науковим рівнем повністю відповідає вимогам, які встановлені для кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

Провідний науковий співробітник  
Інституту фізики НАН України,  
доктор фізико-математичних наук

О.Г. Федорус

14 лютого 2019 р.