

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Фомічова Євгена Миколайовича

«Вплив флексоєфекту та поверхневого екранування на функціональні властивості нанорозмірних фероїків»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

Дисертація Фомічова Є. М. присвячена визначенню впливу флексоєфекту та поверхневого екранування на полярні властивості, доменну структуру та фазові діаграми нанорозмірних фероїків, зокрема фероелектричних наночастинок та тонких плівок. Актуальність тематики дисертаційного дослідження обумовлена їх повною відповідністю сучасним світовим тенденціям розвитку наноелектроніки, фотоніки та спінтроніки, перспективністю досліджуваних нанорозмірних фероїків та мультифероїків для розвитку їх як елементної бази, необхідністю мініатюризації та поліпшення характеристик різноманітних функціональних пристроїв. Варто зазначити, що всі провідні держави світу віднесли пошук та дослідження методів керованої зміни електротранспортних, електрофізичних, полярних, магнітних і магнітоелектричних властивостей мультифероїків до числа своїх пріоритетних фундаментальних і технологічних напрямів.

Більшість теоретичних моделей розглядають тонкі плівки та наночастинки фероїків вкриті ідеально провідними електродами, і тому їх монодомений стан апріорі вважається стабільним за умов повного екранування спонтанної поляризації електродами з нескінченно малою довжиною екранування. Незначна кількість моделей враховує реальну

ситуацію, що відповідає неповному екрануванню спонтанної поляризації вільними поверхневими зарядами з ненульовою довжиною екранування у фероелектричних наночастинках та тонких плівках. Дослідження впливу флексоелектричного ефекту на доменну структуру і фазові діаграми фероелектричних наночастинок та тонких плівок, за умов неповного екранування спонтанної поляризації, були відсутніми до публікації основних результатів цієї дисертаційної роботи.

Тому **обґрунтованість вибору теми дослідження** та **високий рівень її актуальності** та новизни не викликає у мене жодного сумніву.

Дисертація складається з вступу, трьох змістовних розділів, загальних висновків, списку посилань. Кожен розділ містить вступ та висновки, посилання на інші розділи. У вступі зазначено актуальність тематики досліджень, зв'язок з науковими темами, мету і завдання, об'єкт і предмет дослідження, методи дослідження, наукову новизну одержаних результатів, практичне значення, особистий внесок здобувача, інформацію про апробацію результатів дисертації, публікації, структуру та обсяг дисертації. У першому розділі представлено огляд літератури, основні поняття та означення, стан сучасного рівня розвитку фізики нанорозмірних фероїків та мультифероїків. Продемонстровано можливість впливати на фізичні властивості фероїків за допомогою зміни температури і зовнішніх полів. В кінці розділу стисло розглянуті класичні та новітні застосування фероїків та мультифероїків.

У другому розділі представлені результати оригінальних теоретичних досліджень впливу флексоелектричного ефекту і механічних напружень Вегарда (тобто флексо-хімічного зв'язку) на фазові діаграми, полярні властивості і морфологію доменної структури тонких фероелектричних плівок за умов неповного екранування розподілу їх спонтанної поляризації. Отримано та проаналізовано аналітичні вирази для розподілу поляризації,

електричного поля і густини заряду для випадків одновимірної періодичної доменної структури у плівці, циліндричного домену та монодоменної плівки.

У третьому розділі представлено та проведено аналіз оригінальних результатів теоретичних досліджень впливу температури та довжини поверхневого екранування поляризації на фазові діаграми, полярні і діелектричні властивості фероелектричних наночастинок різної форми, а також на морфологію їх доменної структури за умов неповного екранування спонтанної поляризації. Головна увага приділена розмірним ефектам розподілу поляризації, морфології доменної структури і температурі переходу у неполярну параелектричну фазу в фероелектричних наночастинках.

Наукова новизна роботи полягає в наступному.

1. Вперше в умовах неповного екранування спонтанної поляризації розраховано чисельно та проаналізовано фазові діаграми і доменну структуру фероелектричних тонких плівок PbTiO_3 і наночастинок $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$, CuInP_2S_6 , $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ для різних температур, товщин плівок і розмірів наночастинок.

2. Встановлено вплив флексо-хімічного зв'язку та поверхневого екранування на температуру фероелектричного переходу, розподіл спонтанної поляризації та властивості доменної структури тонких плівок та наночастинок фероелектриків.

3. Показано, що внутрішнє електричне поле має сильний вплив на полярні та пружні властивості деформованих плівок завдяки зв'язку неоднорідних напружень Вегарда та флексоелектричного ефекту. Зокрема, через флексоелектричний ефект не відбувається індукованого розміром переходу до параелектричної фази до товщини (2 - 4) нм в епітаксialьних плівках PbTiO_3 на підкладці, яка стискає плівку.

4. Виявлено зародження полідоменної області в трікритичній точці фазової діаграми фероелектричних наночастинок та її розширення зі

збільшенням довжини поверхневого екранування для радіуса частинки більше, ніж критичний. Розвинутий аналітичний опис складної морфології доменної структури та фазових діаграм фероелектричних наночастинок.

Практичне значення теоретичних результатів полягає в тому, що результати вказують на привабливі можливості керування полярними, діелектричними та електромеханічними властивостями наночастинок та тонких плівок фероелектриків за рахунок підбору умов неповного екранування спонтанної поляризації і коефіцієнта флексоелектричного зв'язку, що може бути дуже перспективним для вдосконалення вже існуючих приладів, так і для створення нових технологій на основі фероелектриків.

Достовірність теоретичних результатів забезпечується їх якісним та кількісним узгодженням з експериментальними результатами, а також використанням сучасних та класичних методів дослідження та числових розрахунків.

Попри загальне позитивне враження, робота містить ряд недоліків та неточностей. У якості **зауважень** можна виділити наступне.

- 1) Постановка задачі в більшості розділів містить систему рівнянь, що описує досліджувану систему, проте в тексті не наводиться перелік величин, які є невідомими. Інколи хотілось би мати порівняльні числові оцінки доданків. Наприклад, в параграфі 2.2 «Постановка задачі» було б бажано пояснити фізичний зміст кожного із доданків. В рівнянні (2.1б) враховано доданки до шостого порядку за ступенями вектора спонтанної поляризації. Було б добре пояснити чому нехтується перехресними доданками, в які входила б наведена поляризація та спонтанна поляризація, наприклад, $P_i P_j \varepsilon_b E_k \varepsilon_b E_l$ та біль високого порядку за ступенями поляризації, яка наведена полем.
- 2) В роботі використовується умова неперервності електричного потенціалу на межі двох середовищ, яка є частинним випадком загальної умови про

неперервність тангенціальної складової напруженості електричного поля і отримується з цієї загальної умови за відсутності подвійного електричного шару на границі розділу. Думаю, що про це треба було б сказати.

- 3) Рівняння під номером (2.7) зустрічається в роботі двічі, на сторінках 48 та 77.
- 4) Мова дисертації перенасичена термінами англomовного походження, бажано було б використовувати українські аналоги. Інколи, побудова певної частини фрази вказує на її англійське походження, тобто дисертант мав би робити не дослівний переклад речень з англomовних статей, а перекладати на українську мову зміст речення.
- 5) Як на мене, бракує додатків українською мовою, які б містили деталі розрахунків, наприклад код COMSOL Multiphysics. Це б надало можливість майбутнім читачам дисертації перевірити розрахунки або модифікувати їх.

Ці зауваження не є принциповими, і не зменшують загальне позитивне враження від роботи. Дисертація виконана на високому науковому рівні, містить оригінальні результати, що достатньою мірою обґрунтовані, апробовані й надруковані у фахових виданнях.

В цілому робота гарно структурована та ілюстрована, матеріал викладено доступно і логічно. Основні результати дисертації відомі фахівцям та своєчасно опубліковані у 6 фахових високореєтингових виданнях, у тому числі у Physical Review B (3), Journal of Applied Physics (1), Acta Materialia (1), Eur. Phys. J. B. (1) та одному авторському огляді. Автореферат і публікації за матеріалами роботи правильно відображає зміст та структуру дисертації.

Вважаю, що дисертаційна робота «Вплив флексоєфекту та поверхневого екранування на функціональні властивості нанорозмірних фероїків» задовольняє пп. 9, 11-13 «Порядку присудження наукових

ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами внесеними постановою Кабінету Міністрів України № 656, від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р. та №567 від 27.07.2016 р.), які висуваються до кандидатських дисертацій, та є завершеною науковою працею виконаною на високому науковому рівні, і тому Фомічов Євген Миколайович, безумовно, заслуговує присвоєння наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 — фізика твердого тіла.

Доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедру теоретичної фізики
фізичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка



Решетняк В. Ю.

Підпис засвіачув
ВЧЕННИЙ СЕКРЕТАР НАЧ
КАРСУЛЬНА Н.В.
12.12 2018

