ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Фомічова Євгена Миколайовича
«Вплив флексоефекту 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

Розробка теоретичного опису морфології доменної структури та фазових діаграм сегнетоелектричних наноматеріалів (нанокерамік, наночастинок і тонких плівок), встановлення впливу розмірних ефектів та неповного екранування поляризації на морфологію доменної структури, фазові діаграми, полярні та електрофізичні характеристики сегнетоелектричних наноматеріалів є надзвичайно актуальною фундаментальною проблемою фізики твердого тіла.

Оскільки дисертація Фомічова Є. М. присвячена визначенню впливу флексоефекту та поверхневого екранування на полярні властивості, доменну структуру та фазові діаграми нанорозмірних сегнетоелектриків, зокрема наночастинок та тонких плівок, то актуальність обраної теми не викликає у мене жодного сумніву.

Дисертація складається з формального вступу (який задовольняє всім вимогам МОН до кандидатських дисертацій), трьох розділів, загальних висновків, списку посилань. Кожен розділ містить вступ та висновки, посилання на інші розділи.

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** проаналізовані результати теоретичних досліджень впливу флексоелектричного ефекту і механічних напружень Вегарда (тобто флексо-хімічного зв'язку) на фазові діаграми, полярні властивості і морфологію доменної структури тонких сегнетоелектричних плівок за умов

неповного екранування розподілу їх спонтанної поляризації. Показано, що внутрішнє електричне поле, яке виникає через неповне поверхневе екранування спонтанної поляризації, зв'язку неоднорідних напружень Вегарда та флексоелектричного ефекту, має сильний вплив на полярні та пружні властивості деформованих плівок. Виявилося, що вплив флексоелектрохімічного зв'язку і довжини поверхневого екранування на температуру фероелектричного фазового переходу плівки, розподіл спонтанної поляризації і пружних полів, структуру доменної стінки і період доменної структури є значним та нетривіальним.

У **третьому розділі** проведено аналіз результатів теоретичних досліджень впливу температури та довжини поверхневого екранування поляризації на фазові діаграми, полярні і діелектричні властивості сегнетоелектричних 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 сегнетоелектричних наночастинках в рамках феноменології Ландау-Гінзбурга-Девоншира в поєднанні з рівняннями електростатики. Постановка задачі ідентична до викладеної у розділі 2, але враховано форму наночастинок (сферичну, циліндричну, еліпсоїдальну) у поверхневій енергії і граничних умовах. Розраховано методом кінцевих елементів фазові діаграми для сферичних наночастинок одновісних ($CuInP_2S_6$, $Sn_2P_2S_6$, $SrBi_2Ta_2O_9$) фероелектриків у координатах "довжина поверхневого екранування – температура" для різних розмірів наночастинок (4 - 40) нм. Запропоновано аналітичний опис морфології доменної структури та фазових діаграм фероелектричних наночастинок. Виведено аналітичні вирази для залежності температури фероелектричного-параелектричного переходу від довжини поверхневого екранування та радіуса наночастинки та порівняно з аналогічними залежностями, розрахованими методом кінцевих елементів та виміряними експериментально для різних наночастинок в однодоменних та полідоменних станах.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше встановлено вплив флексо-хімічного зв'язку та поверхневого екранування на температуру сегнетоелектричного переходу, розподіл спонтанної поляризації та властивості доменної структури тонких плівок та наночастинок

сегнетоелектриків. Показано, що внутрішнє електричне поле має сильний вплив на полярні та пружні властивості деформованих плівок завдяки зв'язку неоднорідних напружень Вегарда та флексоелектричного ефекту. Через флексоелектричний ефект не відбувається індукованого розміром переходу до параелектричної фази у тонких плівках $PbTiO_3$ до товщин (1 - 4) нм. Походження цього явища – перебудова доменної структури в плівці, а саме перехід від смугових доменів до замикаючих доменів, що виникають у разі зменшення її товщини нижче 4 нм. Виявлено зародження полідоменної області в трікритичній точці фазової діаграми сегнетоелектричних наночастинок та її розширення зі збільшенням довжини поверхневого екранування для радіуса частинки більше, ніж критичний.

Практичне значення: Отримані результати вказують на привабливі можливості керування полярними, діелектричними та електромеханічними властивостями наночастинок та тонких плівок сегнетоелектриків 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 сегнетоелектриків.

У якості зауважень можна виділити наступне:

1) Підпис до рисунків із схематичними поясненнями геометрії задачі не містить явним чином згадки про те, що наведені на рисунку елементи зображенні без збереження реального масштабу.
2) В деяких формулах (наприклад (2.1б)) використовується частина вільної енергії Гіббса сегнетоелектричної плівки без явного введення визначення вільної енергії.
3) У рівнянні (2.7) використовується анізотропне рівняння Пуассона, проте у тексті, який стосується цього рівняння, не наведено означення цього рівняння.
4) Підпис для рисунку 3.8б не містить інформації про наявність доменної стінки в дводоменному стані.

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 високорейтингових виданнях, у тому

числі Physical Review B, Journal of Applied Physics, Eur. Phys. J. B., Acta Materialia.

Вважаю, що дисертаційна робота «Вплив флексоефекту та поверхневого екранування на функціональні властивості нанорозмірних фероїків» задовольняє всім вимогам МОН України до кандидатських дисертацій, "Порядку присудження наукових ступенів і присудження наукового звання старшого наукового співробітника", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567 та є самостійною завершеною науковою працею виконаною на високому науковому рівні, а Фомічов Євген Миколайович безумовно заслуговує присвоєння наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 — фізика твердого тіла.

Доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник відділу фізики
високих густин енергії
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова
НАН Украйни Д.В. Анчишкін

Підпис Д.В. Анчишкіна
засвідчую:
Зав. відділу кадрів
«14» 12 2018 р.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ім. М.М. БОГОЛЮБОВА
Ідентифікаційний код 05417124
м. КИЇВ