

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Мазур Ольги Юріївни "Кінетика формування доменних структур у сегнетоелектриках у зовнішньому електричному полі", подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності

01.04.07 – фізика твердого тіла

Дисертаційна робота Мазур О.Ю. присвячена вивченню кінетичних особливостей поведінки сегнетоелектриків біля температури впорядкування та встановленню закономірностей формування фізичних властивостей сегнетоелектричних доменних структур в різних релаксаційних режимах. Робота виконана в Інституті фізики гірничих процесів Національної Академії Наук України.

Оцінюючи дисертаційну роботу, слід зазначити наступні моменти.

Актуальність теми дисертації. Питання, що стосуються процесів формування та еволюції доменної структури сегнетоелектриків, виникають у зв'язку з потребами фундаментальної та прикладної фізики. Відсутність детальних мікроскопічних уявлень стосовно механізмів релаксаційних процесів не дає пояснення значній кількості суперечних один одному експериментальних результатів. Необхідність дослідження процесів впорядкування також обумовлена важливим прикладним значенням неоднорідних сегнетоелектричних матеріалів. Зокрема, регулярні доменні структури з субмікронними та нанометровими періодами представляють значний інтерес для розвитку телекомунікаційних технологій, при створенні електрооптичних модуляторів та мікросхем енергонезалежної пам'яті. Для опису кінетичних процесів впорядкування використана модель Ландау – Гінзбурга, яку модифіковано для врахування впливу зовнішніх дій на формування доменної структури – температури охолодження, електричного (статичного та високочастотного) поля і гідростатичного тиску. Одна з вагомих відмінностей розробленої моделі полягає у використанні кореляційного аналізу, що дозволило отримати спрощені системи диференціальних рівнянь для

середньої поляризації та дисперсії, які придатні для опису кінетики впорядкування в різних умовах. Тема дисертації Мазур О.Ю., безумовно, актуальна, оскільки окрім вирішення фундаментальних питань, вона спрямована на практичне застосування отриманих результатів. У рамках дисертаційного дослідження отримано результати, які якісно збігаються з відомими експериментами та доводять перспективність запропонованих методів для прикладного застосування.

Наукова новизна. Дисертаційна робота Мазур О.Ю. базується на феноменологічній теорії фазових перетворень Ландау та статистичному підході. Доцільно виділити моменти, які визначають її новизну, наукову та практичну значимість.

До важливих результатів роботи слід віднести теоретичний опис процесів впорядкування, залежно від умов охолодження та релаксації, а також запропоновані методи практичного використання моделі щодо формування регулярних доменних структур мікронного періоду.

В рамках феноменологічної теорії в роботі описано кінетику впорядкування сегнетоелектриків, які переводять до термодинамічно нерівноважного стану методом швидкого охолодження нижче температури Кюрі. При цьому знайдено функціональну залежність, яка характеризує динаміку зростання розмірів доменів сегнетоелектричних кристалів під час їх релаксації до стану термодинамічної рівноваги. За допомогою побудови фазових портретів системи, що релаксує, знайдено фізичні умови, за яких відбувається формування монодоменних та полідоменних структур. Показано, що на характер впорядкування впливає як тип фазового переходу, так і значення керуючих параметрів, а саме: параметра переохолодження, зовнішнього електричного поля та гідростатичного тиску. Встановлено пороговий характер реалізації регулярних полідоменних структур, залежно від частоти та амплітуди високочастотного поля.

У першому розділі дисертації наведено огляд сучасних уявлень про явища впорядкування сегнетоелектриків різної природи. Обговорено переваги

та недоліки сучасних моделей опису таких процесів та методів створення доменних структур із заданими параметрами. Визначені основні моменти, які послужили відправною точкою даного дослідження.

У другому розділі в рамках феноменологічної теорії Ландау – Гінзбурга на прикладі кристалів тригліцинусульфату розглянуто процес впорядкування сегнетоелектриків, які зазнають фазові переходи другого роду. Процес релаксації системи до стану термодинамічної рівноваги описується за допомогою релаксаційного рівняння Ландау – Халатнікова та статистичного підходу. Досліджено закономірності формування монодоменних і полідоменних структур залежно від початкових умов охолодження, термічного, польового та механічного впливів. Показано, що варіюючи значення керуючих параметрів, можна формувати стабільні монодоменні та полідоменні структури. Встановлено, що середній розмір доменів зростає з часом за законом квадратного кореня, що якісно збігається з експериментальними результатами. Також показано можливість перебування сегнетоелектрика у квазістаціонарних станах, таких як асиметричні метастабільні полідоменні структури.

У третьому розділі роботи наводяться результати дослідження кінетики монодоменного впорядкування у сегнетоелектриках, які зазнають фазові переходи першого роду. За допомогою розщеплення кореляторів четвертого порядку виведено систему еволюційних рівнянь. В результаті комп'ютерного моделювання встановлено, що такі кристали більш стійкі до зовнішніх впливів та схильні до формування переважно монодоменних структур. Показано, що для отримання в них полідоменних структур необхідно застосовувати комбінований вплив на систему, а саме поряд зі зовнішнім електричним полем використовувати і гідростатичний тиск.

У четвертому розділі розглянуто процеси впорядкування сегнетоелектриків під впливом просторово неоднорідного високочастотного електричного поля. Для кристалу танталату літію розраховано критичні значення амплітуди зовнішнього електричного поля, за яких формуються регулярні доменні структури. На якісному рівні зроблено спробу розширити

можливості розробленої моделі для опису сегнетоелектриків типу зміщення на прикладі кристалів ніобату літію. Ця група сегнетоелектриків знаходиться поза межами поставлених у роботі задач, тому проведений якісний аналіз можна вважати поштовхом для наступних досліджень.

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якому виконані всі поставлені задачі. Але вона залишає можливість постановки та вирішення нових задач. Серед них може бути використання розробленої моделі для опису процесу впорядкування та росту доменів, які спостерігаються експериментально, а також застосування запропонованих методів на практиці для отримання мікронних регулярних доменних структур. Подальший розвиток розробленої теорії можна направити на врахування впливу додаткових факторів на релаксаційні процеси, таких як дефекти, температурні градієнти, внутрішні механічні напруження. Розвиток подібної теорії для сегнетоелектриків типу зміщення також може представляти перспективну проблему.

Питання методики. В роботі використано багато сучасних методів фізики та математичної фізики: феноменологічна теорія фазових переходів Ландау, кореляційний аналіз із залученням тривимірного Фур'є-перетворення, якісна теорія диференціальних рівнянь. Для розв'язання складних рівнянь та візуалізації процесів впорядкування залучено методи комп'ютерного моделювання. Показано зв'язок зроблених висновків з відомими експериментальними даними та придатність моделі для опису багатьох реальних систем. Тому достовірність і обґрунтованість отриманих в роботі наукових результатів не викликає сумніву.

Недоліки роботи.

1. Основною метою роботи є дослідження кінетики сегнетоелектричних кристалів, які релаксують в умовах накладеного електричного поля. Вплив поля на формування доменних структур розглядається в усіх розділах дисертації. У четвертому розділі наведені конкретні параметри високочастотного електричного поля, рекомендовані для отримання полідоменних та монодоменних зразків. Доцільно було б аналогічно навести величину

статичного поля при розгляді кристалів тригліцинсульфату та нітриту натрію у розділах 2 та 3, де значення критичних полів наводиться лише у безрозмірному виді.

2. В розділі 3 розглянуто вплив швидкості охолодження зразка на формування доменної структури. Але при дуже швидкому охолодженні можуть виникати внутрішні механічні напруження та значні градієнти температури. Це може привести до того, що в межах одного зразка може існувати як полярна фаза, яка поширюється вглиб з поверхні зразка, так і неполярна фаза в об'ємі, що обумовлено кінцевою теплопровідністю матеріалу. Цей фактор може зумовити неодночасний початок релаксації в різних областях зразка. В дисертації ці аспекти не обговорюються, тому не зрозуміло, як вони впливатимуть на кінетику фазового переходу.

3. В розділах 2 та 3 розглянуто вплив гідростатичного тиску на процеси впорядкування. При розгляді сегнетоелектриків, які зазнають фазові переходи першого роду, зроблено висновок, що лише комплексний вплив електричного поля та тиску стимулює систему до полідоменного впорядкування. Зі змісту дисертації зрозуміло, як це впливає з математичних рівнянь, але не достатньо пояснено фізичний зміст такого впливу та механізм зміни тенденції впорядкування.

4. В розділі 3 дисертації фігурують параметри термодинамічного функціонала Гіббса $A(p)$ та $B(p)$, які залежать від внутрішньокристалічного p' та трикритичного p_{cr} тисків відповідно. Зі змісту не зрозуміло, якого вони порядку, та чи є між ними якийсь зв'язок.

Однак, перераховані недоліки не применшують наукової цінності отриманих результатів та не ставлять під сумнів їх достовірність і обґрунтованість.

Оформлення роботи відповідає встановленим вимогам. Автореферат повністю відображає зміст дисертації.

Основні результати дисертації достатньо повно викладено у 16 основних публікаціях автора та обговорено на багатьох міжнародних та національних конференціях.

В цілому, дисертаційна робота Мазур О.Ю. є цілісним, цілеспрямованим та завершеним дослідженням, яке виконано на високому науковому рівні. Результати роботи мають вагому наукову цінність та представляють значний інтерес у практичному відношенні.

Висновок. Вважаю, що робота Мазур О.Ю. «Кінетика формування доменних структур у сегнетоелектриках у зовнішньому електричному полі» за актуальністю, методичному рівню, науковому змісту та новизні отриманих результатів відповідає усім вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 зі змінами, затвердженими Постановами Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 р. та № 1159 від 30.12.2015 р., а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Професор кафедри прикладної математики
та моделювання складних систем
Сумського державного університету,
доктор фіз.-мат. наук, професор

О. В. Хоменко

