

АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ІМ.І.М.ФРАНЦЕВИЧА

На правах рукопису

ФЛЮРОВА Світлана Олександрівна

ДИНАМІЧНІ ДОМЕННІ ЕФЕКТИ  
В СЕГНЕТОВЕЛЕКТРИЧНИХ КРИСТАЛАХ

Спеціальності: ОІ.04.07 - фізика твердого тіла;  
ОІ.04.10 - фізика напівпровідників  
та діелектриків

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Київ - 1994

Дисертація є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електрофізики Дніпропетровського державного університету.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор М.Д.ГЛІНЧУК  
доктор фізико-математичних наук, професор Е.В.БУРСІАН  
доктор фізико-математичних наук, професор Ю.М.ПОПЛАВКО

Провідна організація: інститут фізики АН України

Захист дисертації відбудеться 17 05 1994 р.  
о "14" год. на засіданні Спеціалізованої вченої ради  
Д 016.23.01 у інституті проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича АН України.

Адреса: 252680, Київ-680, вул. Крижановського, 3,  
інститут проблем матеріалознавства АН України,

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці інституту.

Автореферат розіславий "13" 04 1994 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради

Ю.Б.ПАДЕРНО

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00777821 (W)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Інтерес до теоретичних та експериментальних досліджень динаміки доменів, доменних меж та нерівноважних доменних станів у широкого кола сегнетоелектричних матеріалів збільшився внаслідок розвитку фізики реальних кристалів, близького зв'язку доменної структури з реальною дефектною структурою кристала, а також завдяки необхідності відокремлювати так звані фундаментальні ефекти у сегнетоелектриках від дійсно доменних ефектів.

У вивченні статистики сегнетоелектричних доменів досягнуто більш високого рівня закінченості, ніж у вивченні їх динамічної поведінки. До цього часу немає можливості однозначно прогнозувати поведінку доменів та доменних меж у електричному, механічному, тепловому та, тим більше, магнітному полях. Недостатньо досліджено зв'язок динаміки доменів з електронною підсистемою кристала, хоча й доведена фундаментальна роль екранування самодовільної поляризації як під час сегнетоелектричних фазових переходів, так і під час процесу переключення самодовільної поляризації.

Дія достатньо інтенсивних зовнішніх факторів призводить до нерівноважного стану доменної структури сегнетоелектрика, який супроводжується різноманітними недостатньо дослідженими явищами, такими як люмінесценція, акустична емісія, екзоелектронна емісія та інші. Вивчення останніх викликає самостійний науковий інтерес, утворив нові незалежні методи дослідження доменних процесів у реальних кристалах та має велике практичне значення для різних галузей електроніки та обчислювальної техніки.

Все це визначає актуальність дослідження динамічних доменних ефектів у широкому колі сегнетоелектричних матеріалів при залученні нових експериментальних методів та методик та розширенні спектра зовнішніх впливів. Це, зрештою, спрямовано на вирішення фундаментальної проблеми зв'язку фізики доменів з фізикою реальних кристалів. В свою чергу, ефективність дослідження динамічних властивостей доменів, їх взаємодії з дефектами кристалічних ґрат та змін цих властивостей під

впливом зовнішніх факторів повинні сприяти подальшому розвитку теорії сегнетоелектричних явищ та застосуванню доменних ефектів у практиці.

Основний напрямок цієї роботи полягає у дослідженні у сегнетоелектриках різного типу таких динамічних доменних ефектів, як люмінесценція, що індукована доменними процесами під впливом електричних, механічних та теплових полів; синхронні зміни параметрів переключення поляризації; зміни доменної структури, діелектричних, п'єзоелектричних та люмінесцентних властивостей, а також динамічної поведінки доменної структури у магнітному полі.

#### Стан проблеми.

Явище люмінесценції, що виникає у сегнетоелектричному кристалі титанату барію під впливом змінного електричного поля, вперше виявив G.G.Nagman (1956, 1958). Потім було здійснено декілька досліджень у інших сегнетоелектриках. Існували різні погляди щодо механізму цього явища: припускалися інжекційна модель (V.White, R.Gondhalekar, S.Shringi, 1965), модель пробов повітря на межі сегнетоелектрик-електрод (Y.Ishibashi, H.Stadler, 1968), модель, пов'язана з об'ємною рекомбінацією зарядів екранування самодовільної поляризації (И.И.Иванчик, 1967; В.В.Богатко, Г.М.Гуро, И.И.Иванчик, Н.Ф.Ковтоник, 1968) та деякі інші.

Таким чином, на початок цієї роботи не було загального погляду щодо природи люмінесценції під впливом електричного поля у сегнетоелектриках, а саме явище було вивчено надто замало і у обмеженій кількості сполук. Залишалось незрозумілим, чи є це явище загальним для сегнетоелектриків різних типів. Зовсім не була досліджена можливість спостереження об'ємної люмінесценції при відсутності зовнішнього електричного поля під час збудження перебудови доменної структури, зокрема, змінними механічними напруженнями або швидкісними змінами температури.

Питання, пов'язані з релаксацією доменів у різних режимах зміни електричних полів та механічних напружень, набувають важливого значення для розвитку фізики доменних процесів у сегнетоелектриках та для застосування їх в радіотехніці,

п'езотехніці, оптоелектроніці та інших галузях. Разом з тим дані про комплексні синхронні дослідження доменної структури, діелектричних, п'езоелектричних та, тим паче, люмінесцентних властивостей практично відсутні.

Сегнетоелектрики з розмитим фазовим переходом внаслідок характерних для них флуктуацій складу в межах переходу являють собою неоднорідну гетерофазну систему, в якій виникають інтенсивні термоактивовані переорієнтації поляризації та макроскопічна поляризація при відсутності зовнішніх полів дорівнює нулю. Процеси орієнтації поляризації у таких неоднорідних системах вивчені недостатньо, хоча саме ці процеси лежать у основі істотних нелінійних властивостей та обумовлюють великі електро- та пружнооптичні ефекти, гігантську електрострикцію та інші властивості сегнетоелектриків з розмитими фазовими переходами, що широко використовуються у сучасній техніці.

Теоретичні аспекти мікроскопічної природи взаємодії сегнетоелектриків з магнітними полями розглядались в багатьох роботах. Експериментальні дослідження цієї проблеми зосереджені головним чином на визначенні зміщень температур сегнетоелектричних фазових переходів під впливом магнітного поля, які були передбачені Р.Консин, Н.Кристовел (1970). Вплив магнітного поля на статичну доменну структуру кристалів титанату барію обговорювався В.Н.Новосильцевим и Б.Н.Роловим (1973), а дослідження динамічної поведінки доменної структури в магнітних полях практично не проводились, хоча такі дослідження можуть істотно розвинути уявлення про доменні межі, які рудуються, - динамічні неоднорідності в сегнетоелектричних кристалах.

За ініціативою автора у Дніпропетровському університеті були розпочаті роботи по вивченню люмінесценції, яка виникає у процесі переключення поляризації сегнетоелектриків. Були удосконалені методики дослідження та створена експериментальна база, яка дозволяє здійснювати систематичні дослідження закономірностей та природи явища, вивчати вплив електричних, механічних, теплових та магнітних полів на динамічну поведінку широкозонних сегнетоелектричних кристалів, які належать до різних класифікаційних груп.

Мета роботи полягала у одержанні нової інформації про процеси виникнення та руху доменних і гетерофазних меж у сегнетоелектриках під впливом різних зовнішніх полів; у з'ясуванні зв'язку між процесами зміни доменної та гетерофазної структури і люмінесценцією, яка виникає під час переключення поляризації, а також у вивченні впливу магнітного поля на динамічну поведінку доменної структури.

Об'єкти досліджень та техніка експерименту.

Об'єктами досліджень були обрані кристали, які належать до різних класифікаційних груп, відрізняються родом сегнетоелектричного фазового переходу, особливостями доменної структури, пов'язаними з симетрією кристала та числом можливих орієнтаційних станів вектору спонтанної поляризації, наявністю або відсутністю сегнетоелектричних та напівпровідникових властивостей, кількістю дефектів та домішок. В перелік досліджених кристалів входили:  $\text{BaTiO}_3$  (номінально-чистий та з великим набором легувальних домішок),  $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$  (чистий та легований Nd),  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ , сегнетова сіль, тригліцинсульфат,  $\text{Pb}_3\text{Ge}_3\text{O}_{11}$ ,  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ ,  $\text{Rb}_2\text{ZnCl}_4$  (чистий та з домішками K, Mn),  $\text{K}_2\text{ZnCl}_4$  (чистий та з домішками Rb, Co, Cu, Mn),  $\text{Li}_2\text{Gd}_4\text{Mo}_7\text{O}_{28}$ ,  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}$ .

Усі обрані об'єкти дослідження добре відомі, проте ступінь вивченості динамічної поведінки їх доменної структури неоднаковий. Об'єм досліджень, здійснених з кожним із них під час виконання дисертаційної роботи, також різний. Значна частина експериментів проведена на кристалах титанату барію, молібдату гадолінію, тригліцинсульфату, магніюобату свинцю. Інші кристали використані для підтвердження загальності явищ, перевірки припущень та моделей, апробації запропонованих методів дослідження. Для порівняння результатів частина досліджень проведена на керамічних зразках  $\text{BaTiO}_3$  та  $\text{KNO}_3$ . Спрямоване легування деяких кристалів було здійснено з метою зміни доменної та енергетичної структури кристалу. Контрольні експерименти та деякі дослідження були проведені на споріднених матеріалах, які не мають сегнетоелектричних властивостей. З цієї метов використовувались сегнетоеластик  $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ , п'єзоелектрики  $\text{Bi}_{12}\text{Ge}(\text{Si})\text{O}_{20}$ ,  $\text{Bi}_4\text{Ge}(\text{Si})_3\text{O}_{12}$ , піроелектрик  $\text{Li}_2\text{GeO}_3$ .

Відомо, що умови вирощування, термічної та механічної обробки дуже впливають на властивості сегнетоелектричного кристала, а особливо - на його доменну структуру. Через те, що у роботі передбачалось вирішення окремих принципових питань щодо існування динамічних доменних ефектів, таких як люмінесценція та магнітодоменні ефекти, а також виявлення їх спільності в різних сегнетоелектричних кристалах, велика увага приділялась технології росту та термічної обробки (гартування, термоудар, відтал у нейтральній, відновній та окислювальній атмосферах).

Схема впровадження програми досліджень зображена на рис.1. У кристалі, що досліджувався, збуджуючим зовнішнім фактором (ЗЗФ) створювався нерівноважний стан доменної структури кристала та оцінювалась реакція кристала (РК). Потім експеримент повторювався на фоні доповнюючих зовнішніх впливів - фонових впливів (ФВ).

В експериментах використовувались:

ЗЗФ - однополярні та біполярні імпульсні електричні поля прямокутної, трикутної та синусоїдної форми різної амплітуди, частоти та шпаруватості; імпульси механічного тиску різної амплітуди та тривалості; змінні механічні напруження; термічні збудження.

ФВ - постійні електричні поля (E); статичні механічні напруження стиснення, розтягнення, кручення ( $\sigma$ ); постійні магнітні поля та імпульсні магнітні поля, які були використані у квазістатичному режимі ( $t_{ФВ} \gg t_{ЗЗФ}$ ) (H); поле температурного градієнту (T); фотоактивне та нефотоактивне підсвічення ( $h\nu < E$ ).

РК - люмінесценція (фотометричні та спектральні вимірювання, візуальні та топографічні дослідження); зміни у доменній структурі (поляризаційно-оптичні дослідження); діелектрична проникність; ступінь поляризації зразка (вимірювання п'єзо ефекту, піро ефекту, петіль діелектричного гістерезису); кінетичні параметри переключення поляризації (по струму переключення).

З метою функціонального забезпечення кожної з позицій, які перелічені, у експериментальний комплекс входили спеці-

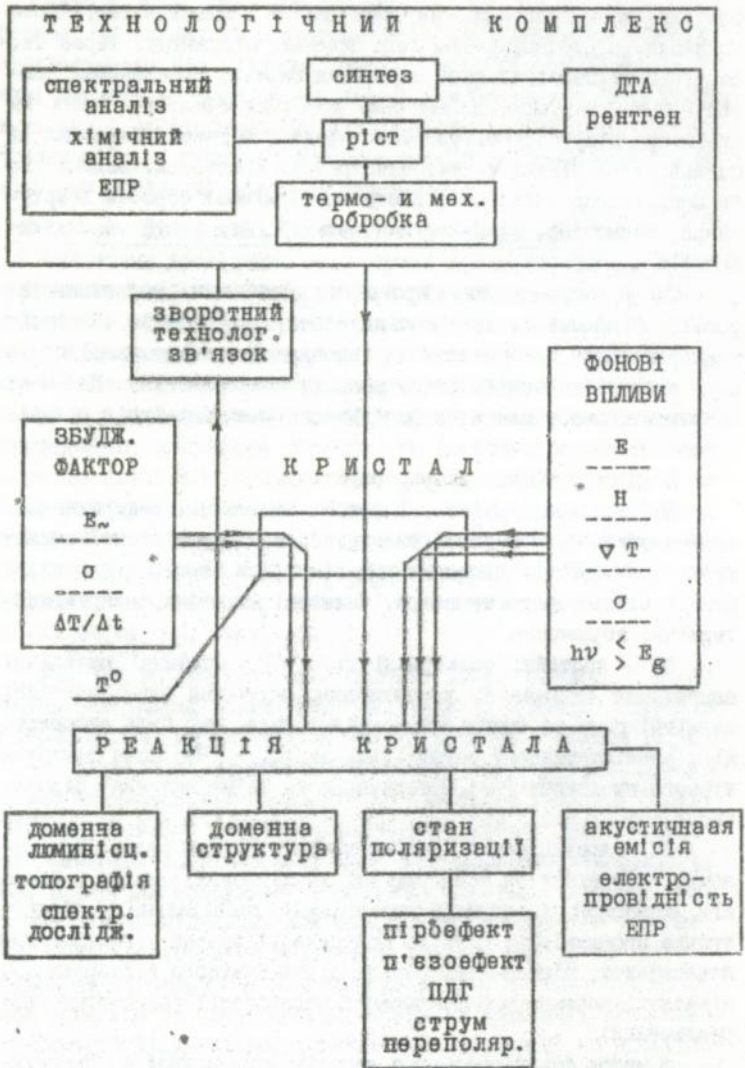


Рис.1 Схема реалізації програми експериментальних досліджень

альні пристрої, кристалотримачі та прилади, які випускає промисловість.

У схемах формування поляризуєчих та переполаризуєчих імпульсів електричного поля використовувались генератори типу Г5-54 та Г5-56, та ртутні реле, які забезпечували наносекундні фронти імпульсів електричного поля.

Імпульси механічної напруги виходили при спієударі пружної кульки з масивним загартованим сталевим кубом; низькочастотні (до 40 Гц) змінні напруги - завдяки використанню шатунно-кривошипного механізму, який забезпечував періодичне стиснення кристалу; синусоїдні напруження стиснення-розтягнення частотою до 20 кГц досягались у спеціальній системі типу "sandwich" при умові затиснення кристалу між двома п'езоелементами, один з котрих використовувався для генерації механічних напружень, а другий - для їх реєстрації.

Для створення термічних збуджень використовувались іЧ-лазер, піч радіаційного нагріву, контакт з розтопленими металами, силіконовим маслом, різними холодоагентами (охолоджений спирт, рідкий азот і т.п.).

Постійні магнітні поля до 23 кЕ створювались електромагнітом ФЛ-І з високостабільним джерелом живлення (коефіцієнт пульсувань  $\leq 0.05$ ); сильні імпульсні магнітні поля напруженістю до 350 кЕ - розрядом батареї імпульсних конденсаторів ІМ5-І40 крізь вакуумний розрядник на соленоїд біттеровського типу з берилієвої бронзи.

Для підсвічення використовувались He-Ne лазер, ксенонова лампа ДКСШ-1000 та лампа розжарення з спектральними фільтрами.

Поларизаційно-оптичні дослідження доменної структури проводились з використанням мікроскопа МІН-І0, який був модифікований для роботи у магнітних полях та полях механічних напружень.

Реєстрація люмінесценції здійснювалась за допомогою фотоелектронних помножувачів ФЕП-97, -79, -22, -19 на осцилографі з пам'яттю С8-І7. Частина експериментів була проведена з використанням комплексу, який був розроблений на базі мікроЕОМ "Електроніка-60М" та дозволяв проводити усереднення та обробку фотоімпульсів методом стробування. Для спектрометрії-

вання була застосована диспергуюча система монохроматора УМ-2.

У топографічних дослідженнях був використаний електронно-оптичний підсилювач яскравості зображення з коефіцієнтом підсилення  $\geq 10^4$ .

Для відведення випромінювання від зразків, які перебувають у зоні дії магнітних полів або механічних напружень, застосовувались кварцові та склові волокняно-оптичні світловоди.

Діелектричні, п'єзоелектричні та піроелектричні вимірювання проводились за стандартними методиками.

Система терморегулювання забезпечувала програмаву зміну та стабілізацію температури з певною точністю у межах  $\pm 0.025 + 0.5$  К.

Велика увага приділялась синхронним вимірюванням лімінесценції, яка була спричинена переключенням доменів, а також параметрів, які характеризують переключення поляризації у сегнетоелектричному зразку, з метою вивчення кореляції кінетики випромінювання та кінетики переполіризації та отримання інформації про інші кореляційні залежності. Крім перелічених вище основних для цієї роботи досліджень, проводились вимірювання, які мали допоміжний або тестовий характер. Це й реєстрація акустичної емісії, вимірювання електропровідності, магнітоопору, спектрів оптичного пропускання, фотолімінесценції, комбінаційного розсіяння світла, ЕПР.

Поєднання технологічного та вимірювального комплексів дозволило у значній мірі усунути розходження "технологічного" та "методичного" характеру, а також надало можливості активно виправляти технологію отримання кристалів за рахунок зворотнього технологічного зв'язку.

#### Наукова новина.

Вперше експериментально доведено існування загального для сегнетоелектриків явища - доменної лімінесценції, яка виникає у сегнетоелектриках різних типів внаслідок дії зовнішніх факторів, які викликають динамічні зміни доменної структури.

Встановлена якісна відповідність параметрів доменної електролімінесценції відомим механізмам переключення поляризації під час дії збуджуючого електричного поля.

Передбачено і вперше в'явлено виникнення об'ємної лімінесценції у відсутності зовнішнього електричного поля при збудженні змін доменної і гетерофазної структури внаслідок дії механічних напружень та швидкісної зміни температури - специфічного для сегнетоелектриків виду тензора термолімінесценції.

Експериментально показано, що доменна лімінесценція не може бути пояснена будь яким одним механізмом збудження. На основі відомих теоретичних результатів запропонована узагальнена модель, згідно з якою збудження електронної підсистеми у кристалі відбувається внаслідок звільнення зарядів екранування під час зміщення заряджених доменних меж, виникнення нерівноважних електронно-діркових пар завдяки сильним локальним полям при боковому посуванні доменних меж, звільнення зарядів екранування під час колапсування доменних меж на кінцевому етапі встановлення однорідного монодоменового стану в об'ємі кристалу та інш.

Вперше систематично вивчений вплив механічних напружень (одновісні стиснення та розтягнення, деформації кручення) на зміну доменної структури, доменну лімінесценцію, діелектричні властивості і фазові переходи у модельних сегнетоелектриках-сегнетоеластиках  $\text{BaTiO}_3$  та  $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ .

Вперше виявлена та досліджена група магнітодомених ефектів у сегнетоелектриках.

Передбачений та виявлений вплив магнітного поля на доменну лімінесценцію.

Передбачений та виявлений вплив магнітного поля на виникнення сегнетофаз у електричному полі вище  $T_0$ .

Основні положення, що виносяться на захист.

1. Лімінесценція, яка виникає у процесі переорієнтації доменів електричним полем, є універсальним відгуком на перполяризацію широкозонних сегнетоелектриків різного типу. Вона виявляється у вигляді спалахів у об'ємі кристала. Випромінювання частково поляризовано, спалахи мають часову кореляцію з акустичною емісією.

2. Під впливом механічних напружень у широкозонних кристалах, які повднуть сегнетоелектричні та сегнетоеластич-

вні властивості, відбуваються колективні реорієнтації доменів, які супроводжуються люмінесценцією у видимій частині спектру.

3. У сегнетоелектриках з розмитим фазовим переходом змінюючи гетерофазної та доменної структури супроводяться люмінесценцією, яка спостерігається в зоні переходу як у процесі виникнення та збільшення областей сегнетоелектричної фази під час зростання напруженості електричного поля, так і при розпаді поляризованого стану у процесі деполіризації кристалу під час зменшення поля.

4. Поведінка інтенсивності, локалізації світіння у об'ємі кристалу, спектрального складу та інших параметрів люмінесценції, яка збуджується зовнішніми впливами (електричними полями, механічними напруженнями, швидкісними змінами температури, які спричиняють процеси перебудови доменної структури) має кореляцію з характером протікання цих процесів у відповідності з відомими механізмами переключення поляризації (фронтальний ріст доменів, бокове поширення, коалесценція, зворотне переключення). Все це обумовлює можливість використання даного виду люмінесценції як незалежного методу дослідження динаміки доменної та гетерофазної структури широкозонних сегнетоелектриків.

5. Доменні межі, що рухаються, у немагнітному сегнетоелектричному кристалі мають ефективний магнітний момент, який з'являється за рахунок неоднорідних струмів, локалізованих в зоні цих меж. Зовнішні магнітні поля, що взаємодіють з локальними струмами, впливають на нерівноважну доменну структуру сегнетоелектриків. В сегнетоелектриках-сегнетоеластиках внаслідок додаткових механічних напружень, виникаючих при такій взаємодії, можливі реорієнтації доменів та доменних меж як в зоні сегнетоелектричного фазового переходу, так і подалі від нього в сегнетофазі.

#### Практичне значення роботи.

Розроблені основи люмінесцентного емісійного методу дослідження процесів переключення доменів у широкозонних сегнетоелектричних кристалах.

Результати досліджень дозволяють поширити функціональні можливості елементів твердотільної оптоелектроніки, які ви-

готовлені на основі сегнетоелектричних кристалів, а також можуть бути використані під час конструювання пристроїв збереження та передачі інформації, розробці електропольових, тензо- та термодатчиків з оптичним зв'язком між елементами, спеціальних світловипромінювачів та перетворювачів сигналів.

Запропоновані засоби ефективного неруйнівного контролю ступеня поляризації сегнетоелектричного кристалу, схильності кристала до уніполярності переключення та динамічної втомленості, а також контролю якості електродного покриття сегнетоелектричного зразка, та спосіб оптимізації режимів реполяризації за рахунок зворотнього оптичного зв'язку кристалу і схеми формування реполяризуючої напруги.

Результати досліджень показали можливість використання магнітного поля у практиці спеціальних експериментів по вивченню орієнтації фазових меж у низькосиметричних сегнетоелектричних кристалах.

На прикладі  $\text{BaTiO}_3$  показана ефективність використання магнітних полів та механічних напружень при моделюванні доменної структури та створенні стійких доменних конфігурацій у сегнетоелектриках-сегнетоеластиках.

Розроблені способи підвищення п'єзомодулів кераміки  $\text{BaTiO}_3$ .

Розроблені технології синтезу і вирощування, покращені способи легування деяких кристалів активних діелектриків.

Результати експериментальних досліджень явищ, які пов'язані з нерівноважною доменною структурою, є корисними для розвитку теорії динаміки доменів та її зв'язку з електронною підсистемою сегнетоелектричних кристалів.

#### Апробація роботи.

Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на: IV-XIII Всесоюзних конференціях з сегнетоелектрики (Ростов-на-Дону-1964, Дніпропетровськ-1966, Рига-1968, Воронеж-1971, Ужгород-1974, Ростов-на-Дону-1979, Мінськ-1982, Чернівці-1987, Ростов-на-Дону-1989, Тверь-1992);

I Міжнародній конференції з сегнетоелектрики (Прага-1968); III-V Семінарах з напівпровідників-сегнетоелектриків (Ростов-на-Дону-1976, 1981, 1987, 1993);

I-V Всесоюзних семінарах з фізики сегнетоеластиків

(Калінін-1978, Воронеж-1982, Харків-1985, Дніпропетровськ-1988, Ужгород-1991);

I, II Всесоюзних конференціях з фізико-хімічних основ технології сегнетоелектричних та споріднених матеріалів (Звенигород-1980, 1983);

I-III Всесоюзних конференціях "Актуальні проблеми одержання та використання сегнето- і п'єзоелектричних матеріалів" (Москва-1981, 1984, 1987);

II Всесоюзному семінарі "Ефект Баркгаузена та його використання у техніці" (Калінін-1980);

I Всесоюзному семінарі "Візуалізація та теорія доменів у сегнетоелектричних та споріднених кристалах" (Волгоград-1980);

Всесоюзному семінарі з процесів переключення в сегнетоелектричних та споріднених матеріалах" (Калінін-1983);

Всесоюзному семінарі з магнітних напівпровідників (Москва-1984);

• III Міжвідомчому семінарі-виставці "Прозора сегнетокераміка. Одержання, дослідження, використання" (Рига-1988);

Науково-технічних семінарах в БНП (Москва-1972, 1975, 1978, 1979, Ленінград-1975);

Всесоюзній конференції "Реальна структура та властивості ацентричних кристалів" (Олександров-1990);

II Міжнародному семінарі країн СНД-США з сегнетоелектрики (С.-Петербург-1993);

Російській науково-технічній конференції з фізики діелектриків (з участю іноземних фахівців) (С.-Петербург-1993);

щорічних підсумкових наукових конференціях Дніпропетровського державного університету.

#### Публікації.

З темі дисертації автором опубліковано більше 100 наукових праць. Праці, у котрих зосереджені основні результати, внесені у загальний бібліографічний перелік, наведений у кінці дисертації.

#### Особистий внесок автора.

На різних етапах роботи дослідження виконувалися сумісно з колегами по кафедрі електрофізики Дніпропетровського держуніверситету (О.С.Бочков, Ю.Д.Крохмаль, А.Ю.Кудзін,

С.О.Попов, Ю.І.Самченко, В.Г.Таран та Інш.), з АН Укр-  
їни (І.Є.Чупіс), АН РАН (Н.Н.Крайник) та ІК РАН (Т.Р.Волк,  
Н.А.Тихомирова). Підсумки цих досліджень відображені у суміс-  
них публікаціях. Автору дисертації належать визначення задач,  
вибір об'єктів досліджень, участь у розробці методик дослід-  
жень, у роботах по вирощуванню кристалів, у здійсненні експе-  
риментів, у обговоренні результатів. Особисто автору належать  
також узагальнення результатів, положення, що виносяться на  
захист, та висновки.

Автор з подякою відзначає, що робота виконувалась при  
повній підтримці завідуючого кафедрою електрофізики професора  
А.Ю.Кудзіна та всього колектива кафедри.

Структура та об'єм. Дисертація складається із вступу,  
чотирьох глав, заключення та бібліографії.

Загальний об'єм дисертації 364 сторінки, включаючи 94  
рисунки та 4 таблиці; бібліографія містить 299 найменувань.

#### ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обговорена актуальність проблеми, сформульована  
мета роботи, обґрунтован вибір об'єктів та методів досліджен-  
ня, сформульовані основні положення, що виносяться на захист.

У першій главі наведені результати досліджень лімінес-  
ценції, яка спричинена переключенням поляризації у сегнето-  
електриках різних типів під час зовнішніх впливів, та розгля-  
нуті основні закономірності такої лімінесценції.

Приймаючи за основу механізм випромінювання шляхом реком-  
бінації зарядів, екрануючих самодовільну поляризацію, яка пе-  
реключається, ми припустили, що якщо створити нерівноважний  
стан доменної структури за рахунок механічного напруження, що  
швидко змінюється, або швидкісної зміни температури, то і то-  
ді повинно реєструватися випромінювання світла. Дійсно, такі  
експерименти на кристалах  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$  та сегнетовій  
солі показали, що незалежно від способу перебудови доменної  
структури у кристалах виникає випромінювання у видимій части-  
ні спектру. Так були виявлені нові різновиди тензо- та термо-  
лімінесценції, які характерні для сегнетоелектричного стану  
кристалів.

Розширення кола об'єктів, порівняння з люмінесценцією при переполяризації електричним полем дозволили зробити висновок про те, що у реальних широкозонних сегнетоелектричних кристалах під час переключення самодовільної поляризації  $P_{\text{в}}$  спостерігається загальний тип об'ємної люмінесценції - доменна люмінесценція.

Експериментально встановлено, що випромінювання з об'єму кристала має спалахуючий характер. Тривалість окремого спалаху менш ніж  $10^{-7}$  с. Сумарне випромінювання є частково поляризованим, а його яскравість залежить від ступеню колективності та фізичної природи доменних процесів, що здійснюються.

При додержанні ієрархії під час переключення поляризації сегнетоелектричного зразка спостерігаються хвилі яскравості люмінесценції, кожна з котрих характеризується особливим спектральним складом, інтенсивністю, локалізацією у об'ємі кристала (рис.2). Часові інтервали випромінювання та відповідні їм величини зміни поляризації  $\Delta P$  обумовлюються коерцитивними полями, рухливістю доменів, специфікою розвитку процесу переполяризації, розміром  $P_{\text{в}}$ ; отже вони відрізняються не тільки у різних сполук, але й у різних зразків однакового складу.

Пряме проростання доменів крізь товщу кристала супроводжується світінням всього об'єму кристала. Інтенсивність його відносно мала. Ріст доменів за рахунок бокового руху  $180^\circ$ -меж також супроводжується випромінюванням у середині всього об'єму кристала. В процесі поєднання доменів основна частина випромінювання локалізована у приелектродних зонах. На етапі коалесценції та колапсування доменних меж яскравість цього світіння зростає, при подальшому зростанні напруженості переполяризуючого поля спостерігається насичення. Як показали спостереження, товщини приелектродних шарів яскравого світіння, обумовлюються розмірами зворотніх доменів, які виникають у зразках з металевими електродами під час вимкнення електричного поля. При змінах режимів переключення, температури, тиску, умов термообробки, опромінення, легування та інш. парціальний внесок кожного з можливих механізмів переполяризації може змінюватись, що, в свою чергу, спричиняє зміну параметрів доменної люмінесценції.

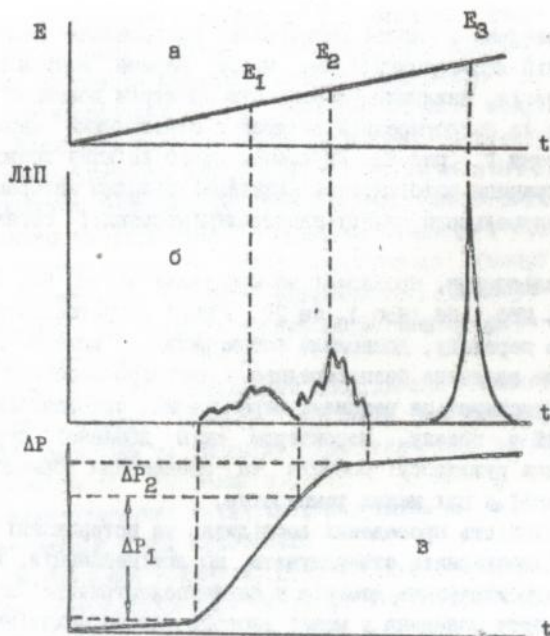


Рис.2 Кінетика розвитку люмінесценції, індукованої переполіризацією (ЛП) (б), при переполіризації лінійно зростаючим полем (а) в порівнянні із зміном поляризації зразка ΔP (в)

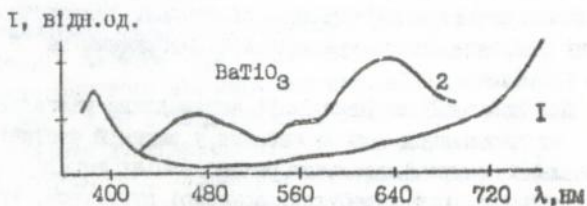


Рис.3 Спектри електролюмінесценції при різних способах збудження. 1 - синусоїдне поле частотою 1.5 кГц, 2 - П-подібна біполярна хвиля.  $E = 7.5$  кВ/см

Проведені в роботі спектральні вимірювання показали, що у доменній люмінесценції має місце власна випромінювальна рекомбінація. Важливою особливістю спектрів доменної люмінесценції є їх безпосередній зв'язок з кінетичними параметрами переключення  $P_n$  (рис.3). Виявлення цього зв'язку дозволяє зрозуміти причини розбіжностей наведених різними авторами даних щодо спектрального складу електролюмінесценції сегнетоелектриків.

Дослідження, проведені на кристалах  $BaTiO_3$ ,  $Pb_5Ge_3O_{11}$ ,  $K_2ZnCl_4$ ,  $KNO_3$ ,  $Gd_2(MoO_4)_3$  та  $TiO$  у зоні сегнетоелектричного фазового переходу, дозволили встановити, що доменна люмінесценція не зв'язана безпосередньо з природою фазового переходу, а обумовлюється режимами переключення самодовільної поляризації у зразку, характером змін доменної структури, зростанням рухливості доменів та зменшенням самодовільної поляризації у цих межах температур.

• Сукупність проведених досліджень та встановлені закономірності дозволяють стверджувати, що люмінесценція, яка індукована переключенням доменів у сегнетоелектричних кристалах не може бути пояснена у межах якогось одного механізму збудження.

На прикладі монокристалів молібдату гадолінію, у якому переполяризація відбувається переважно боковим переміщенням  $180^\circ$ -доменних меж нами вперше експериментально доведена можливість збудження люмінесценції за рахунок сильних локальних електричних полів, які виникають під час взаємодії рухомих доменних меж з дефектами - стопорами. Теоретично ці моделі уявлення були розвинені А.С.Сидоркиним та Б.М.Даринским (1984).

Для доменної люмінесценції справедлива узагальнена модель, згідно з якою випромінювання у видимій частині спектру обумовлено: випромінювальною рекомбінацією зарядів екравування, визволених при перебудові доменної структури; випромінювальною рекомбінацією електронно-діркових пар, народжених у локальних електричних полях, які виникають під час руху доменних меж внаслідок їх взаємодії з дефектами кристалічних ґрат; випромінювальною релаксацією електронної підсистеми

кристала за рахунок релаксації поляризації, гомогенно переключеної в окремих об'ємах кристала (Ю.И.Балкарей, Е.В.Ченский, 1971). Роль та внесок кожного з перелічених типів випромінювання у люмінесцентний сигнал, що реєструється, можуть бути різними у залежності від особливостей доменної структури реального сегнетоелектричного зразка, характеру та кінетичних параметрів збуджуючого фактора. При інтенсивних режимах збудження, які забезпечують синхронність доменних процесів у зразку, виявляються ознаки генерації світла: збужування спектру випромінювання, анізотропія діаграми спрямованості. Експериментально встановлено, що спалахи світла мають часову кореляцію зі спалахом акустичної емісії.

У другій главі наведені результати дослідження впливу механічних напружень стиску, розтягу, кручення на доменну структуру, фазові переходи та динаміку переполіаризації  $\text{BaTiO}_3$ . Розглянуті закономірності тензолюмінесценції у  $\text{BaTiO}_3$  та  $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$  та вплив статичних механічних напружень на тензо- та електролюмінесценцію в цих кристалах.

Проведені дослідження показали, що у реальному кристалі характер зміщення температури  $K_{\text{mp}}$  та зміни початкової  $\epsilon$  під впливом одноісного стиску не обумовлюються повністю термодинамічними параметрами монодоменого кристала, а залежать від змін його доменної структури. Розтяг вздовж псевдокубічного напрямку  $\langle 100 \rangle$  стабілізує тетрагональну фазу  $\text{BaTiO}_3$  і знижує температуру тетрагонально-ромбічного фазового переходу, в той час як розтяг вздовж  $\langle 110 \rangle$  стабілізує ромбічну фазу та підвищує температуру цього переходу.

Зовнішні механічні напруження приводять до нерівнозначних змін у динаміці доменів при переключенні поляризації електричним полем. Характер цих змін залежить від кристалграфічної орієнтації  $\sigma$  та  $\epsilon$ , від їхньої взаємної орієнтації та розміру. Результати дослідження струмів переключення  $I_{\text{с}}$ , діелектричної нелінійності, параметрів електролюмінесценції у сегнетофазі та у зоні сегнетоелектричних фазових переходів виявляють відтворювані кореляційні залежності, відображаючи процеси додаткової реорієнтації доменів при суперпозиції впливів, процеси збільшення, або зменшення переключаемого

об'єму кристалу, зміни рухомості доменних меж та процеси їх "замерзання", зміни залишкової поляризації, спричиняючи зміни піроелектричних коефіцієнтів та піезоелектричних модулів зразка.

Вивчення доменних процесів під дією імпульсів одновісного стиску в режимах оборотної  $90^\circ$ - або  $180^\circ$ -реорієнтації доменів привело до виявлення нового різновиду люмінесценції - доменно-тензолюмінесценції в сегнетоелектриках. Результати порівняльних експериментів по дослідженню тензо- та електролюмінесценції при  $90^\circ$ -переключенні  $\alpha$ -доменів у  $\text{BaTiO}_3$  одновісним стиском та електричним полем дозволяють стверджувати, що природа тензо- та електролюмінесценції однакова. Про це також свідчить повна збіжність залежностей тензо- та електролюмінесценції від величини навантаження та напруги електричного поля відповідно, отримана для кристалів молібдату гадолінію. Ці ж експерименти дозволили уточнити значення коефіцієнта стиску та привести до відповідності шкали навантажень та електричних полів, що може бути використано для незалежної оцінки доменного внеску у коефіцієнти електромеханічного зв'язку.

У третій главі наведені результати дослідження процесів переключення поляризації люмінесцентним методом у монокристалах магніюбату свинцю у зоні розмитого сегнетоелектричного фазового переходу.

Проведені експерименти дозволили вперше виявити доменну люмінесценцію в РМН у зоні РМН як у синусоїдних, так і в імпульсних електричних полях. Інтенсивність світіння була сумірна з інтенсивністю в "звичайних" сегнетоелектриках, максимум інтенсивності у видимій частині спектру був при 500-600 нм. Отримані температурні, польові та частотні залежності інтенсивності електролюмінесценції у різних режимах збуджувачих полів та їх порівняння із відомими даними свідчать про зв'язок люмінесценції у зоні РМН з проходженням колективних процесів зміни поляризації (рис. 4).

Характерною особливістю електролюмінесценції кристалів РМН у зоні РМН є випромінювання інтенсивного випромінювання не тільки при зв'язанні, але й при вимкненні електричного по-

ля. Воно обумовлено процесами деполяризації кристала та дозволяє спостерігати незвичайні лімінесцентні петлі гістерезису в залежностях інтенсивності лімінесценції від миттєвого значення напруженості поля, у котрих витки при деполяризації мають меншу інтенсивність, ніж витки при поляризації зростаючим полем. Виявлена аномалія у температурній залежності електролімінесценції, відповідно до зруйнування індукованого збуджуючим електричним полем макродоменого стану при нагріванні кристала.

Вперше були проведені дослідження електролімінесценції в PMN, котрий є сегнетоеластиком, при одночасному впливі механічного стиску у зоні РМН. Отримані результати є узгоджені з висновками, слідуєчими з розгляду сум'ясної дії електричного поля та стиску на термоактивовані незалежні одна від одної переорієнтації самовільно деформованих полярних областей, а також демонструють значний вплив внутрішніх механічних напружень на рухи полярних областей у гетерофазному стані кристала.

Було виявлено зростання інтенсивності тензолімінесценції із зростанням частоти розтягів-стисків у інтервалі частот від 1 до 20 кГц (рис.5). Подальш було показано, що амплітуда тензолімінесценції зростає із зростанням амплітуди деформації, а при відносних деформаціях, більших за  $\approx 10^{-4}$ , стрибкоподібно виникає більш інтенсивне світіння. Можливо, що електролімінесценція при деполяризації та тензолімінесценції на спадаючих витках механічного напруження є процеси типу протікання при зворотньому фазовому переході із індукованої у окремих областях сегнетоелектричної фази у початковий неоднорідний стан.

В четвертій главі викладені результати експериментального дослідження нерівноважної доменної структури сегнетоелектричних кристалів у магнітних полях.

Було досліджено вплив магнітного поля на процеси індуквання сегнетофази у  $\text{BaTiO}_3$  електричним полем. В'ясувалось, що в орієнтації  $E \parallel H \parallel (001)$  температурний інтервал існування та форма подвійних петель діелектричного гістерезису змінюється. Магнітне поле приводить до збільшення площі "крил" подвійних петель та зменшенню лінійної частки.

У результаті експериментів зі зразками різних техноло-

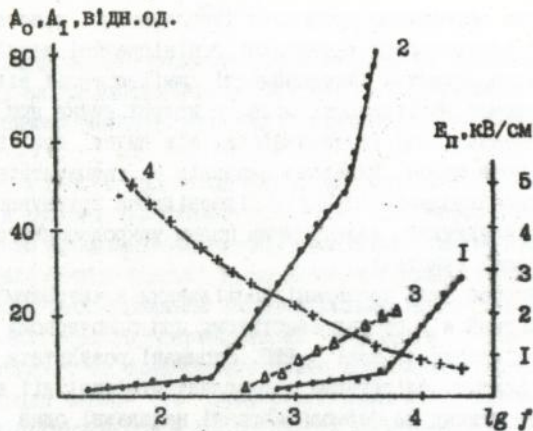


Рис. 4 Залежності амплітуди електролімінесценції  $A_0$  (1, 2)  $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ , інтенсивності лімінесценції у момент нульового значення поля  $A_1$  (3) та порогового поля  $E_{II}$  (4) від частоти  $\nu_0$ , кВ/см: 1 - 4.2; 2 - 16.7; 3 - 19.2

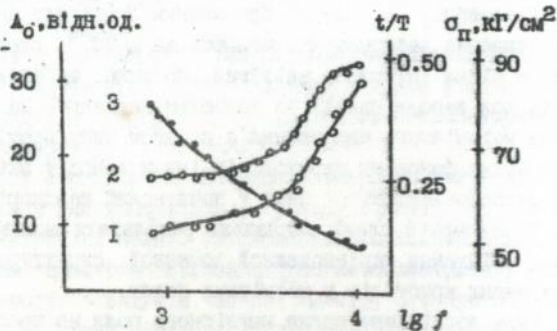


Рис. 5 Залежність амплітуди імпульсу тензолімінесценції  $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$   $A_0$  (1), тривалості світіння  $t$ , віднесеної до тривалості періоду  $T$  (2), та порогового значення механічного напруження  $\sigma_{II}$  (3) від частоти зміни навантаження.  $\sigma_0 = 75$  кг/см<sup>2</sup> (для 1 та 2)

гичних партій, що відрізняються товщиною та ступенем дефектності, був зроблен висновок, що зміни подвійних петіль у магнітному полі спостерігаються внаслідок взаємодії магнітного поля з гетерофазними межами, неодмінно виникаючими у результаті неоднорідного індукування сегнетофазу в реальному кристалі.

У платівкових ос-доменних кристалах  $\text{BaTiO}_3$ , вирощених з розчину у розплаві  $\text{KF}$ , при всій різноманітності доменних конфігурацій у зоні тетрагонально-кубічного фазового переходу I роду спостерігається певний стереотип у поведінці доменної структури. Виявлено, що магнітне поле впливає тільки на нерівноважну доменну структуру.

Додатково до вимірювань на монокристалах були проведені дослідження двох партій керамічних зразків  $\text{BaTiO}_3$ , кригтованих з матеріалів "ОСЧ": неполяризованих та попередньо поляризованих способом "гарячої" поляризації. Виявилось, що положення максимуму  $\epsilon(T)$  неполяризованої кераміки у межах похибки експерименту залишалось незмінним при будь-якій орієнтації магнітного поля. На поляризованій кераміці спостерігалась орієнтаційна залежність (рис.6).

У кристалах  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  зміщення максимуму  $\epsilon(T)$  також залежить від орієнтації зразка у магнітному полі (рис.7).

Ретельні діелектричні вимірювання у магнітних полях до 23 кЕ у кристалах ТТС показали, що температура максимуму  $\epsilon$  в цих кристалах залишається незмінною. Ми припускаємо, що ці результати обумовлені тим, що у ТТС фазовий перехід є переходом II роду, при котрому не виформовуються термічні доменні межі - фазові фронти.

Поляризаційно-оптичні дослідження переключення доменів у кристалах молібдату гадолінію у електричному полі при одночасовій дії постійного магнітного поля дозволили встановити, що швидкість руху  $180^\circ$ -доменної межі, орієнтованої паралельно силовим лініям магнітного поля напруженість  $\sim 20$  кЕ, зростає у 1.2-1.5 рази, навпроти при перпендикулярній орієнтації - зменшується у 2-2.5 рази. Відповідно змінюється і поле старту, при якому розпочинається переключення поляризації в цих кристалах.

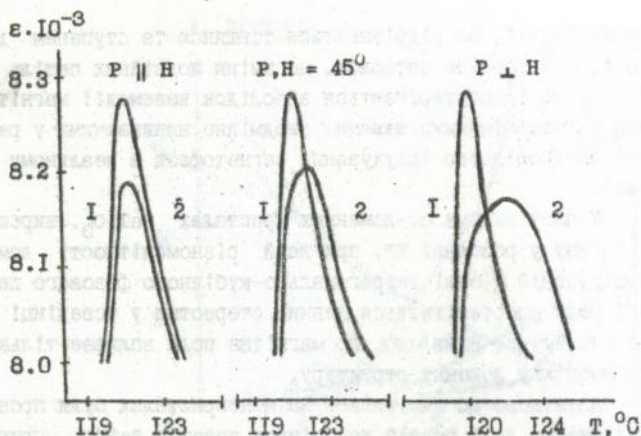


Рис.6 Температурні залежності діелектричної проникності попередньо наполяризованої кераміки  $\text{BaTiO}_3$ , виміряні при нагріванні зразка без магнітного поля (1) та в магнітному полі напруженості 20 кЕ (2) при різній взаємній орієнтації векторів  $P$  и  $H$ . Ступінь поляризації зразка у всіх випадках була однаковою

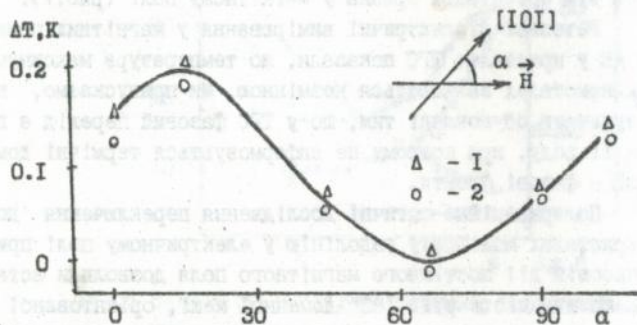


Рис.7 Залежність зміщення температури максимуму  $\epsilon$  кристалів  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$  від орієнтації магнітного поля

Крім того, для  $\text{BaTiO}_3$  нами встановлено вплив магнітного поля на процеси екранування  $P_s$ . Це може бути пов'язано з розщепленням уловлюючих рівнів у магнітному полі, полегшувати процеси екранування.

Виявлена та досліджена у роботі група магнітодоменних ефектів дозволяє зробити висновок про те, що рухомі доменні межі - динамічні неоднорідності у сегнетоелектричному кристалі мають ефективний магнітний момент, виникаючий за рахунок струмів, локалізованих у зоні доменних меж. Специфіка переключення доменів кристалів  $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ , у котрих переполяризація можлива під час руху поодинокі  $180^\circ$ -межі, дозволили провести прямі експерименти по виявленню магнітного моменту, пов'язаного з рухом межі та оцінити розміри магнітного моменту. По даним цих вимірювань оцінка товщини динамічної неоднорідності дає значення на порядок вище за товщину статичної доменної межі.

В заключенні надані основні результати та запропоновані по їх використанню, формулюються висновки.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі еспериментальними методами у сегнетоелектриках різного типу проведено вивчення процесів зміни доменної та гетерофазної структури під час дії електричних полів, механічних напружень та інших зовнішніх впливів та зв'язку цих процесів з виникаючою при переключенні поляризацією лімнісценцією, а також вплив на них магнітного поля.

Знайдені умови оптимального спостереження лімнісценції у кристалах сегнетоелектриків різного типу: вимоги до якості кристалів, умов їх механічної та хімічної обробки та подальшого відпалу, нанесення електродів, виконання вимог до кристалотримачів.

Виділена з низки спостережуваних явищ та вивчена лімнісценція, яка супроводжує об'ємні зміни нерівноважної доменної структури у сегнетоелектричних кристалах та яку умовно можна назвати доменною лімнісценцією.

Вперше виявлено виникнення доменної лімнісценції у видимій частині спектру при відсутності зовнішнього електричного поля під час збудження змін доменної та гетерофазної структур

механічними напруженнями та швидкісною зміною температури у широкозонних сегнетоелектриках. Досліджена електролюмінесценція при переполяризації електричним полем синхронно із спостереженням струму та тривалості переполяризації у широкозонних сегнетоелектриках різного типу; у деяких з них доменна люмінесценція виявлена вперше. Виявлена кореляція певних механізмів переполяризації, параметрів збуджуючого електричного поля та параметрів доменної люмінесценції.

Проведено систематичне вивчення впливу механічних напружень (розтягу, стиску, крутіння) на доменну структуру, процеси встановлення поляризації, електролюмінесценцію, діелектричні властивості та фазові переходи титанату барію.

Вперше спостерегалася електро- та тензолюмінесценція в модельному сегнетоелектрику  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  з розмитим фазовим переходом, які пов'язані із зміною доменного та гетерофазного станів під впливом електричного поля або механічного напруження. У магніобаті свинцю вивчені температурні, польові та частотні залежності інтенсивності електролюмінесценції та залежності тензолюмінесценції від механічного напруження.

Досліджено вплив магнітного поля на процеси зміни доменної та гетерофазної структур у деяких сегнетоелектриках.

Безпосередні розробки конкретних технічних пристроїв у роботі не проводились, однак результати проведених досліджень та встановлені закономірності дозволяють аргументовано казати про можливість реалізації деяких пристроїв та практичного використання ряду результатів.

Якщо доменної тензолюмінесценції сегнетоелектриків при нерівноважних станах доменної структури можуть стати підставою для розробки неконтактних датчиків імпульсних механічних напружень, а якщо доменної термолюмінесценції – датчиків для реєстрації імпульсних теплових потоків.

На основі люмінесцентного емісійного методу стає також можливим створення електропольових датчиків з оптичним зв'язком та спеціальних світловипромінювачів та перетворювачів сигналів, наприклад, пристроїв перетворення амплітудної модуляції у фазову, тому що у синусоїдному полі спостерігається ефект зміни фази періодичного люмінесцентного сигналу ам-

плітудою збуджуючого поля.

Виконані дослідження дають внесок у розвиток динаміки доменів - важливого розділу фізики твердого тіла та вирішують проблему природи доменної люмінесценції - динамічного доменного явища, яке виникає під час переключення поляризації у широкозонних сегнетоелектриках.

#### Основні висновки роботи

1. Встановлено, що у реальних широкозонних сегнетоелектричних кристалах спостерігається особливий вид люмінесценції - доменна люмінесценція. Це є динамічний доменний ефект, обумовлений процесами колективної перебудови доменної або гетерофазної структури сегнетоелектрика. Доведена єдність доменної природи люмінесценції, яка виникає при різних способах збудження. При додержанні ієрархії механізмів переключення поляризації (зародження, фронтальний ріст, бокове розростання, тощо) у еволюції переключення спостерігаються хвилі яскравості доменної люмінесценції, які чітко відокремлюються; кожна з хвиль характеризується своїм особливим спектральним складом, інтенсивністю, локалізацією в об'ємі.

2. Доведено, що доменна люмінесценція не може бути пояснена в межах якогось одного механізму збудження. На підставі отриманих експериментальних та відомих теоретичних результатів запропонована якісна узагальнююча модель, яка припускає, що збудження електронної підсистеми відбувається за рахунок визволення зарядів екранування при зсуві зарядженої доменної межі, народження нерівноважних пар носіїв сильними локальними полями при боковому русі доменних меж, а також визволення зарядів екранування при колапсуванні доменних меж під час завершуючого етапу встановлення однорідного монодоменового стану.

3. Встановлено, що активаторні домішки у сегнетоелектричному кристалі змінюють характеристики доменної люмінесценції не тільки за рахунок змін у енергетичній зонній структурі, але і за рахунок змін у динаміці доменних меж. Внесок змін кінетичних параметрів доменних меж у ці процеси залежить від співвідношення між властивостями домішок і кристалічної матриці та характером розподілу домішок у кристалі, що, у

свою чергу, залежить від технології отримання сегнетоелектричного зразка.

4. Виявлення тензолімінесценції у кристалах магнітоісату свинцю у зоні розмитого фазового переходу незалежно підтвердило, що і за відсутності зовнішнього електричного поля у кристалі виникають спонтанно деформовані ділянки полярної фази, які можуть бути колективно переорієнтовані зовнішніми механічними напруженнями. При зменшенні механічних напружень також спостерігається світіння, яке в результаті розпаду стану, виникаючого внаслідок процесів зростання напружень.

5. Доведено, що розімкнені доменні межі, які рухаються, - динамічні неоднорідності у сегнетоелектричному кристалі можуть мати ефективний магнітний момент. Взаємодія магнітного поля з цими магнітними моментами призводить до низки ефектів: зміни орієнтації фронту сегнетоелектричного фазового переходу I роду у багатовісних сегнетоелектриках при його формуванні у магнітному полі; реорієнтації збуджених доменних меж у кристалах, симетрія яких дозволяє таку орієнтацію; зміни швидкості руху доменних меж, яка залежить від взаємоорієнтації магнітного поля та напрямку руху; зміни температури максимуму діелектричної проникності, обумовленої зміною доменно-орієнтаційного внеску; зміни довжини лінійної частини подвійної петлі гістерезису вище  $T_C$  I роду, яка обумовлена зміною доменних процесів у гетерофазній області.

Крім того, зроблено декілька висновків, які мають менш узагальнюючий характер:

І. Більш яскраве світіння у приелектродних об'ємах металізованої сегнетоелектричної платівки, яка переполяризується, обумовлено множиною непрорісших зворотних доменів у цій області зразка. Встановлено, що товщина приелектродного шару, яка визначена з безпосередніх візуальних спостережень  $BaTiO_3$ ,  $Pb_5Ge_3O_{11}$ , складає  $10^{-2}$  см і співпадає з оцінками, зробленими для  $BaTiO_3$  під час вимірювання товщинних залежностей коефіцієнта електричного поля, поля активації, поля максимального зростання лімінесценції, поля зміни знаку похідної функції діелектричної проникності під дією стиску та інш.

2. У кристалах з розмитим фазовим переходом у гетерофазній області вище середньої температури Кюрі відсутні ефекти старіння та динамічної втоми, наслідком чого, звичайно, є деградація електролюмінесценції у сегнетоелектриках; відсутні також не спостереження неоднорідності світіння по товщині кристала.

3. Куполоподібний максимум та додаткові температурні аномалії, які виявлені у температурній залежності електролюмінесценції магнітобату свинцю у зоні розмитого сегнетоелектричного фазового переходу, підтверджують неоднорідну температурну залежність змін концентрації полярної фази, яка встановлена раніш у еспериментах з інтегрального розсіяння світла, з діелектричних вимірювань та інш.

4. Експериментально доведено, що у зміни параметрів доменної люмінесценції у магнітному полі дають внесок зміни в умовах екранування спонтанної поляризації та зміни кінетичних параметрів доменних меж.

5. Встановлено, що вплив зовнішніх магнітних полів та механічних напружень на процес індукування сегнетофазки електричним полем у сегнетоелектриках-сегнетоеластиках, що залежить від взаємної орієнтації електричного поля із зовнішнім магнітним полем або механічним напруженням, обумовлений неоднорідністю доменної та гетерофазної структури, індукованої електричним полем.

#### ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ АВТОРА З ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Синяков Е.В., Флерова С.А., Кубышкин О.А. Влияние одностороннего механического давления на фазовые переходы в монокристаллах  $\text{BaTiO}_3$  // Изв. АН СССР, сер. физ.- 1967.- Т.31, № 11.-С.1768-1770.

2. Синяков Е.В., Флерова С.А., Баринов Г.В. Релаксационные процессы в монокристаллах  $\text{BaTiO}_3$  при воздействии импульсного одностороннего механического давления // ФТТ.-1968.-Т.10, № 2.-С.529-533.

3. Синяков Е.В., Флерова С.А. Влияние одномерных растягивающих напряжений на электрические свойства и доменную

структуру монокристаллов  $\text{BaTiO}_3$  // ФТТ.- 1970.- Т.12, № 7. - С.2728-2630.

4. Флерова С.А., Самченко Ю.И. Излучение света кристаллами  $\text{BaTiO}_3$  под действием одномерного импульсного давления// ФТТ.-1972.-Т.14, № 2.-С.592-594.

5. Флерова С.А., Самченко Ю.И. Излучение света кристаллами  $\text{BaTiO}_3$  при фазовых переходах// ФТТ.-1972.-Т.14, № 9.- С.2777-2779.

6. Синяков Е.В., Флерова С.А., Архипов В.Н. Влияние одномерных механических напряжений на доменную структуру монокристаллов  $\text{BaTiO}_3$  в ромбической фазе// ФТТ.-1973.-Т.15, № 4.- С.1237-1239.

7. Самченко Ю.И., Флерова С.А. Особенности люминесценции кристаллов  $\text{BaTiO}_3$  при реполяризации одиночными импульсами// ФТТ.-1975.-Т.17, № 11.-С.3444-3446.

8. Флерова С.А., Самченко Ю.И. Связь доменной структуры кристаллов  $\text{BaTiO}_3$  с излучением света при скоростном нагреве выше точки Кюри// ФТТ.-1976.-Т.18, № 1.-С.347-349.

9. Волнянский М.Д., Кудзин А.Ю., Самченко Ю.И., Флерова С.А. Люминесценция кристаллов  $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$  при импульсной реполяризации// ФТТ.-1976.-Т.18, № 2.-С.583-585.

10. Панченко Т.В., Самченко Ю.И., Таран В.Г., Флерова С.А. Излучение света при реполяризации монокристаллов  $\text{BaTiO}_3$ // Кристаллография.-1976.-Т.21, № 4.-С.841-843.

11. Бочков О.Е., Горбенко В.М., Забара Ю.В., Кудзин А.Ю., Флерова С.А. Выращивание и некоторые свойства монокристаллов  $\text{Li}_2\text{Gd}_4\text{Mo}_7\text{O}_{28}$ // Кристаллография.-1977.-Т.22, № 3.-С.647-649.

12. Флерова С.А., Бочкова Т.М. Изменение зонной структуры эвлинита при переходе в аморфное состояние// ФТТ.- 1978.- Т.20, № 4.-С.1222-1223.

13. Самченко Ю.И., Флерова С.А. Спектры излучения кристаллов  $\text{BaTiO}_3$  при импульсной реполяризации// Кристаллография.-Т.21, № 6.-С.1272-1273.

14. Флерова С.А., Таран В.Г. Люминесценция при механическом переключении кристаллов, обладающих сегнетоэлектрическими и сегнетоэластическими свойствами// Изв. АН СССР, сер. физ.-1979.-Т.43, № 8.-С.1745-1748.

15. Флерова С.А., Бочков О.Е. Влияние магнитного поля на фазовую границу в кристаллах  $\text{BaTiO}_3$ // Письма в ЖЭТФ.- 1981.- Т.33, № 1.-С.37-40.

16. Флерова С.А., Таран В.Г. Связь фазы электролюминесценции  $\text{BaTiO}_3$  с амплитудой возбуждающего поля//Письма в ЖЭТФ.- 1981.-Т.7, № 4.-С.212-213.

17. Флерова С.А., Таран В.Г., Самченко Ю.И. Особенности электролюминесценции и сегнетоэлектрического состояния кристаллов  $\text{BaTiO}_3$ , подверженных термоудару// Изв. ВУЗов, физика.- 1981.- № 10.- С.72-76.

18. Флерова С.А., Самченко Ю.И., Горбенко В.М. Излучение света при импульсной реполяризации деформированных кристаллов  $\text{BaTiO}_3$ // ФТТ.-1981.-Т.23, № 9.-С.2775-2778.

19. Флерова С.А., Таран В.Г., Бочков О.Е. Связь электролюминесценции со скачкообразными процессами переключения монокристаллов  $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ // Изв. АН СССР, сер. физ.-1981.-Т.45, № 9.-С.1698-1700.

20. Флерова С.А., Таран В.Г., Бочков О.Е. Люминесценция кристаллов молибдата гадолиния при неравновесном состоянии доменной структуры//ФТТ.-1981.-Т.23, № 3.-С.873-875.

21. Флерова С.А., Бочков О.Е. Влияние магнитного поля на поведение кристаллов  $\text{BaTiO}_3$  вблизи сегнетоэлектрического фазового перехода// Кристаллография.-1982.-Т.27, № 1.-С.198-201.

22. Флерова С.А., Таран В.Г., Бочков О.Е. Реполяризация и люминесценция монокристаллов  $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$ // Кристаллография.- 1982.-Т.27, № 2.-С.302-304.

23. Flerova S.A., Bochkov O.E., Kudzin A.Yu., Krochmal Yu.D. Influence of magnetic field on the ferroelectric properties of  $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$  crystals// Ferroelectrics.-1982.-V.45, No 1/2.- P.131-135.

24. Флерова С.А., Бочков О.Е., Цинман И.Л. Влияние магнитного поля на сегнетоэлектрический фазовый переход в титанате бария// ФТТ.-1982.-Т.24, № 8.-С.2505-2507.
25. Бочков О.Е., Крохмаль Ю.Д., Флерова С.А., Кудзин А.Ю. Выращивание и некоторые диэлектрические свойства кристаллов  $K_2ZnCl_4$ // Кристаллография.-1982.-Т.27, № 5.-С.1005-1006.
26. Крохмаль Ю.Д., Бочков О.Е., Кудзин А.Ю., Флерова С.А. Влияние магнитного поля на фотоиндуцированный сдвиг температуры Кюри кристаллов  $Sn_2P_2S_6$ // Изв. АН СССР, сер. физ.-1983.-Т.47, № 4.-С.734-735.
27. Флерова С.А. Люминесценция при переполяризации сегнетоэлектрических кристаллов// Изв. АН СССР, сер. физ.- 1984.-Т.48, № 6.-С.1233-1237.
28. Бочков О.Е., Подольский В.А., Попов С.А., Флерова С.А. Люминесценция при переполяризации кристаллов  $Bi_4Ti_3O_{12}$ // Кристаллография.-1984.-Т.29, № 4.-С.805-806.
29. Волк Т.Р., Максимова Н.Г., Попов С.А., Флерова С.А., Шлак Н.В. Люминесценция при преполяризации кристаллов ТГС// Кристаллография.-1985.-Т.30, № 4.-С.720-725.
30. Попов С.А., Тихомирова Н.А., Флерова С.А. Взаимодействие движущихся доменных границ с магнитным полем в  $Gd_2(MoO_4)_3$ // Кристаллография.-1985.-Т.33, № 3.- С.608-609.
31. Флерова С.А., Попов С.А., Крайник Н.Н., Бочков О.Е., Лазарев А.П. Электролюминесценция в сегнетоэлектрике с размытым фазовым переходом  $RbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ // ФТТ.-1985.-Т.27, № II.-С.3492-3494.
32. Флерова С.А., Попов С.А., Крайник Н.Н., Лазарев А.П. Люминесценция при деполяризации кристаллов  $RbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$  в области размытого фазового перехода// Письма в ЖТФ.- 1985.-Т. II, № 18.-С.1134-1137.
33. Флерова С.А., Цинман И.Л. Влияние магнитного поля на формирование доменной структуры  $Gd_2(MoO_4)_3$  в области фазового перехода// Кристаллография.-1987.-Т.32, № 4.-С.1047-1048.
34. Крайник Н.Н., Флерова С.А., Попов С.А. Электролюми-

несценция в магнониобате свинца при наложении одноосного давления// ФТТ.-1987.-Т.29, № 9.-С.2845-2847.

35. Орлов О.Л., Попов С.А., Флерова С.А., Цинман И.Л. Магнитный момент, связанный с движущейся доменной стенкой сегнетоэлектрика// Письма в ЖТФ.-1988.-Т.14, № 2.-С.118-121.

36. Flerova S.A., Krainik N.N., Popov S.A. Luminescence by polarization switching in the diffuse phase transition ferroelectric  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ // Ferroelectrics.-1988.-V.82.-P.167-171.

37. Флерова С.А., Кудзин А.Ю., Бочков О.Е., Крайник Н.Н. Тензолюминесценция в кристаллах  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  в области размытого фазового перехода// Письма в ЖТФ.-1988.-Т.14, № 21.-С.1960-1963.

38. Флерова С.А., Кудзин А.Ю., Бочков О.Е., Крайник Н.Н. Кинетика электролюминесценции  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  в синусоидальных электрических полях в области размытого фазового перехода// ФТТ.-1989.-Т.31, № 2.-С.123-127.

39. Флерова С.А., Кудзин А.Ю., Бочков О.Е., Крайник Н.Н. Тензолюминесценция кристаллов магнониобата свинца в области размытого сегнетоэлектрического фазового перехода// Изв. АН СССР, сер.физ.-1989.-Т.53, № 7.-С.1399-1402.

40. Flerova S.A., Krainik N.N., Kudzin A.Yu. Electroluminescence in crystal of  $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$  at the ferroelectric diffuse phase transition// Ferroelectrics.-1989.-V.90.-P.135-139.

41. Бочков О.Е., Крайник Н.Н., Кудзин А.Ю., Флерова С.А. Влияние постоянного смещающего поля на люминесценцию сегнетоэлектриков в синусоидальных электрических полях// Изв. РАН, сер.физ.-1993.-Т.57, № 3.-С.36-39.

42. Флерова С.А., Чупис И.Е. О магнитном моменте, возникающем при движении сегнетоэлектрической доменной границы в молибдате гадолиния// Изв. РАН, сер.физ.-1993.-Т.57, № 3.-С.20-22.

man. ФТТ за 1982-1990

*Handwritten signature*



Abraham

147194

AB 29.612