

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

С.А. Рогожин

" ____ " _____ 2007 г.

ПРОГРАММА СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ
СУБМИКРОННЫХ И НАНО-ДОМЕННЫХ СТРУКТУР
В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОНОКРИСТАЛЛАХ
ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Направление - 510400 (физика)

Семестр - 9

Общее количество часов (трудоемкость)

в т.ч.:

лекции 36 час.

практические занятия

семинарские занятия

лабораторные занятия

Отчетности:

экзамен - 9 семестр.

Контрольные мероприятия:

коллоквиумы 9 семестр.

Разработчик программы:

Шур В.Я., д. ф.-м. н., профессор.
Румянцев Е.Л.

I. ВВЕДЕНИЕ

Целью специальной дисциплины «Исследование кинетики субмикронных и нанодоменных структур в сегнетоэлектрических монокристаллах при внешних воздействиях» является ознакомление студентов:

- с современными методами исследования кинетики доменной структуры сегнетоэлектриков,
- с экспериментально выявленными закономерностями эволюции субмикро- и нанодоменной структуры при внешних воздействиях,
- с теориями, используемыми для описания статистики и кинетики сегнетоэлектрических доменов.

Задачей дисциплины является

- рассмотрение основ кинетической теории, описывающей эволюцию доменной структуры в сегнетоэлектриках;
- изучение основных сценариев эволюции доменной структуры сегнетоэлектриков при различной эффективности экранирования деполяризующих полей;
- ознакомление с физическими основами доменной инженерии для создания периодических субмикро- и нанодоменных структур.

Место дисциплины в системе высшего профессионального образования

Для усвоения специального курса «Исследование кинетики субмикронных и нанодоменных структур в сегнетоэлектрических монокристаллах при внешних воздействиях» необходимо знание курсов «Физика твердого тела», «Электродинамика сплошных сред», «Термодинамика» и «Статистическая физика». Кроме того, необходимо знакомство со спецкурсами «Физика сегнетоэлектриков» и «Фракталы в физике».

В свою очередь знание спецкурса «Исследование кинетики субмикронных и нанодоменных структур в сегнетоэлектрических монокристаллах при внешних воздействиях» позволяет студентам освоить в дальнейшем специальные курсы по проблемам нанотехнологий.

Требования к уровню освоения содержания спецкурса

Студенты должны усвоить основные положения кинетической теории эволюции доменной структуры сегнетоэлектриков и уметь научно обоснованно подходить к объяснению конкретных экспериментальных данных, связанных с формированием микро-

и нано-доменных структур. Кроме этого студенты должны овладеть представлениями о методах создания периодических нано-доменных структур для управления нелинейно-оптическими свойствами кристаллов. Студенты должны усвоить физические основы микро- и нано-доменной инженерии и результатов ее применения для создания периодических структур.

Методическая новизна спецкурса

В спецкурсе впервые комплексно в рамках единого теоретического подхода рассмотрены различные аспекты формирования и эволюции микро- и нано-доменных структур в сегнетоэлектрических монокристаллах в результате внешних воздействий. Предлагаемый спецкурс позволяет сформировать у студентов целостное представление об этом интенсивно развивающемся направлении науки и нанотехнологии.

II. СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

ТЕМЫ КУРСА И ИХ КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. Модельные сегнетоэлектрические материалы.

Требования к модельным кристаллам для исследования кинетики доменной структуры сегнетоэлектриков. Основные свойства кристаллов семейства ниобата лития и танталата лития. Механизмы, приводящие к возможности визуализации доменной структуры в процессе переключения.

Тема 2. Методы исследования кинетики доменной структуры сегнетоэлектриков.

Интегральные методы исследования процессов переключения поляризации: петля диэлектрического гистерезиса, петля пьезоэлектрического гистерезиса, ток переключения. Локальные методы визуализации сегнетоэлектрических доменов: метод селективного химического травления, метод пироэлектрического зонда, методы сканирующей электронной микроскопии, метод нематических жидких кристаллов, оптические методы, методы сканирующей зондовой микроскопии.

Тема 3. Равновесная доменная структура. Проблема деполяризующего поля.

Поля внешнего и объемного экранирования. Роль естественного диэлектрического зазора. Объемное экранирование - процесс, позволяющий стабилизировать произвольную доменную конфигурацию. Механизмы объемного экранирования. Параметры равновесной доменной структуры в рамках классического термодинамического подхода.

Тема 4. Основы кинетической теории формирования доменной структуры.

Переключение поляризации сегнетоэлектриков как аналог фазового превращения. Основные принципы классической теории зародышеобразования. Образование одномерных, двумерных и трехмерных зародышей в электрическом поле. Локальное электрическое поле как управляющая сила процесса переключения. Запаздывание экранирования деполяризующего поля. Эффективность экранирования деполяризующего поля как мера равновесности условий переключения.

Тема 5. Рост изолированных доменов.

Движение плоской доменной стенки. Эффект торможения. Форма доменной стенки. Стохастическое и детерминированное зародышеобразование: условия реализации и основные следствия. Многообразие экспериментально наблюдаемых форм доменов в кристаллах тригональной симметрии. Зависимость формы изолированных доменов от эффективности экранирования.

Тема 6. Дискретное переключение поляризации.

Явление дискретного переключения поляризации. Эффект коррелированного зародышеобразования. Конкуренция эффектов подавления и стимуляции зародышеобразования вблизи движущейся доменной стенки. Экспериментальные методы создания сильнонеравновесных условий переключения поляризации.

Тема 7. Формирование нано-доменных ансамблей.

Самопроизвольное обратное переключение после выключения внешнего электрического поля. Потеря устойчивости формы доменной стенки. Переключение с искусственным диэлектрическим зазором. Экспериментальные способы создания диэлектрического зазора. Образование нано-доменных ансамблей перед движущейся стенкой. Закономерности роста «доменной паутины».

Тема 8. Формирование самоподобных нано-доменных структур.

Переключение поляризации в результате импульсного нагрева. Роль пирозлектрического поля. Кинетика одномерного роста нано-доменных цепей. Основные закономерности формирования самоподобных нано-доменных структур. Процессы роста, отражения и ветвления нано-доменных лучей. Фрактальный анализ самоподобных структур. Моделирование формирования самоподобных нано-доменных структур.

Тема 9. Физические основы микро- и нано-доменной инженерии.

Методы создания периодических доменных структур. Создание нано-доменных ансамблей при самопроизвольном обратном переключении. Эффекты умножения пространственной частоты периодических доменных структур. Нелинейно-оптические свойства периодически поляризованных кристаллов. Выполнение условия квазифазового синхронизма. Генерация второй гармоники в кристаллах с периодической доменной структурой.

IV. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ И ЗАДАНИЙ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Собственные и несобственные сегнетоэлектрики: определения и примеры.
2. Теория среднего поля и теория фазовых переходов Ландау. Общие представления - параметр порядка, разложение свободной энергии по степеням параметра порядка в случае одноосных сегнетоэлектриков.
3. Модельные сегнетоэлектрические кристаллы для исследования кинетики доменной структуры: основные свойства и обоснование их выбора.
4. Электрооптический эффект. Доказательство на основе теории Ландау линейной зависимости показателя преломления от спонтанной поляризации в электрическом поле. Зависимость показателя преломления от спонтанной поляризации без внешнего поля.
5. Основные свойства кристаллов семейства ниобата лития и танталата лития. Кристаллы конгруэнтного и стехиометрического состава: основные различия.
6. Явление фазового синхронизма. Обоснование квадратичной зависимости нелинейной поляризации от внешнего электрического поля в одноосных кристаллах без центра инверсии. Вывод зависимости тензора квадратичной восприимчивости в одноосных сегнетоэлектриках от величины спонтанной поляризации.
7. Локальные и интегральные методы исследования кинетики доменной структуры: различия и преимущества.
8. Петля диэлектрического гистерезиса: принципиальная схема измерений и основные измеряемые параметры.
9. Измерения тока переключения: схема измерений и основные экспериментально определяемые параметры.
10. Связь пьезоэлектрического и диэлектрического гистерезиса. Сравнение характеристик получаемых этими методами.

11. Метод селективного химического травления. Форма рельефа травления и причины его формирования в монокристаллах ниобата лития и танталата лития.
12. Метод нематических жидких кристаллов. Физические причины получения оптического контраста.
13. Оптические методы визуализации доменной структуры. Физические эффекты, позволяющих получать оптический контраст доменов и доменных стенок.
14. Методы сканирующей зондовой микроскопии. Принципиальная схема измерений. Основные моды и их применение при визуализации доменной структуры.
15. Равновесная периодическая доменная структура. Вывод зависимости периода этой структуры в сегнетоэлектрической пластине от величины спонтанной поляризации в рамках теории фазовых переходов Ландау.
16. Деполяризующее поле. Связанные заряды. Заряженные доменные стенки.
17. Внешнее экранирование. Основные механизмы внешнего экранирования.
18. Объемное экранирование. Конкурирующие механизмы объемного экранирования.
19. Естественный диэлектрический зазор и его роль в появлении остаточного деполяризующего поля.
20. Классическая теория зародышеобразования. Зародыши различной размерности и их роль в процессе переключения поляризации.
21. Вероятность образования зародыша. Активационный механизм.
22. Вклад деполяризующего поля в вероятность генерации и рост ступеней на доменной стенке. Возможные подходы к учету влияния деполяризующего поля.
23. Основные положения классического подхода к описанию эволюции доменной структуры. Метастабильность и причины, приводящие к существованию долгоживущих метастабильных состояний.
24. Локальное значение макроскопического электрического поля и характеристика полей, являющихся его компонентами.
25. Эффективность экранирования деполяризующего поля, как главный фактор, определяющий сценарий эволюции доменной структуры. Критерий эффективности экранирования.
26. Экспериментальные способы создания неравновесных условий переключения.
27. Скачкообразное движение плоской доменной стенки.
28. Стохастическое зародышеобразование. Объяснение формы плоской доменной стенки в рамках классического подхода.

29. Детерминированное зародышеобразование. Переход от правильных шестиугольных доменов к треугольным доменам. Зависимость формы изолированных доменов от эффективности экранирования.
30. Эффект коррелированного зародышеобразования. Физические причины, приводящие к дискретному переключению.
31. Особенности кинетики доменной структуры при самопроизвольном обратном переключении.
32. Переключение поляризации в сегнетоэлектрическом конденсаторе с искусственным диэлектрическим зазором.
33. Объяснение в рамках кинетического подхода наблюдаемых особенностей кинетики доменной структуры в результате импульсного лазерного облучения.
34. Типы доменных структур, возникающих в результате импульсного разогрева сегнетоэлектрика лазерным излучением.
35. Основные физические принципы, положенные в основу моделирования процесса роста и взаимодействия нано-доменных лучей.
36. Фракталы. Фрактальный анализ. Определения и практические методы определения фрактальной размерности данной структуры.
37. Доменная инженерия. Достоинства и недостатки основных способов получения периодических доменных структур в ниобате лития и танталате лития. Причины нарушения регулярности доменных структур и способы их устранения.

V. ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ЭКЗАМЕНУ

1. Модельные сегнетоэлектрические кристаллы. Основные свойства и причины их выбора как основных объектов исследования кинетики доменных структур.
2. Кристаллофизические и физические свойства кристаллов семейства ниобата лития и танталата лития.
3. Общая характеристика интегральных методов. Петля диэлектрического гистерезиса.
4. Форма тока переключения при воздействии прямоугольных импульсов поля.
5. Общая характеристика локальных методов. Визуализация доменных структур.
6. Метод селективного химического травления. Преимущества и недостатки метода.
7. Метод нематических жидких кристаллов. Преимущества и недостатки метода.
8. Сканирующая зондовая микроскопия. Атомно-силовая микроскопия. Пьезоэлектрическая мода. Модификация доменной структуры с помощью SPM.

9. Деполяризирующее поле. Заряженные доменные стенки. Связанные заряды. Равновесная периодическая структура пространственно ограниченного сегнетоэлектрика.
10. Внешнее экранирование. Основные механизмы.
11. Диэлектрический зазор. Остаточное деполяризирующее поле.
12. Объемное экранирование. Необходимость учета объемного экранирования. Эффекты запаздывания. Основные механизмы.
13. Классическая теория зародышеобразования. Основные положения.
14. Применимость классической теории зародышеобразования к описанию процессов переключения спонтанной поляризации.
15. Вероятности образования n-мерных зародышей (новых доменов, ступеней и их рост). Поле активации.
16. Кинетический подход к описанию эволюции доменной структуры во внешнем электрическом поле. Основные положения.
17. Локальное поле. Характеристика полей составляющих локальное поле. Пространственная и временная эволюция локального поля при учете эффектов запаздывания. Общие представления.
18. Эффективность экранировки деполяризирующего поля, как главный фактор, определяющий сценарий эволюции доменной структуры. Основные экспериментальные способы уменьшения эффективности экранирования деполяризирующего поля и создания неравновесных условий переключения.
19. Анализ скачкообразного движения плоской доменной стенки с точки зрения кинетического подхода. Переключающее поле на доменной стенке и его изменение.
20. Стохастическое и детерминированное зародышеобразование. Объяснение детерминированного зародышеобразования в рамках кинетического подхода.
21. Описание причин и возможной эволюции формы изолированного домена в ниобате лития и танталате лития в рамках кинетического подхода.
22. Эффект коррелированного зародышеобразования. Причины возникновения. Дискретное переключение поляризации и распространение нано-доменных ансамблей.
23. Кинетика нано-доменов в сильнонеравновесных условиях переключения поляризации.
24. Явление самопроизвольного обратного переключения. Объяснение наблюдаемых особенностей эволюции доменной структуры в рамках кинетического подхода.

25. Особенности эволюции доменной структуры при переключении с искусственным диэлектрическим зазором.
26. Физические причины возникновения и особенности наблюдаемых доменных структур при переключении, инициированном импульсным лазерным облучением.
27. Основные положения компьютерной модели кинетики переключения, инициированной лазерным излучением. Законы распространения доменных лучей. Способы описания взаимодействия доменных лучей.
28. Физические основы доменной инженерии. Способ создания периодических доменных структур с использованием периодической системы электродов, полученной методами фотолитографии. Недостатки метода и объяснение их причин с точки зрения кинетического подхода.
29. Метод обратного переключения. Анализ формы импульса внешнего электрического поля. Объяснение выбора формы импульса с точки зрения кинетического подхода.
30. Умножение пространственной частоты периодической доменной структуры в результате контролируемого обратного переключения. Анализ явления в рамках кинетического подхода.
31. Образование квази-регулярных нано-доменных структур. Основные эффекты, приводящие к возникновению нано-доменных ансамблей.
32. Основы нано-доменной инженерии. Самоорганизованное формирование квази-периодических нано-доменных структур.

VI. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСОВ КУРСА ПО ТЕМАМ И ВИДАМ РАБОТ

№ п/п	Наименование разделов и тем	ВСЕГО (часов)	Аудиторные занятия (час)		Самостоятельная работа
			в том числе		
			Лекции	Практические (семинары, лабораторные работы)	
1	Модельные сегнетоэлектрические материалы	6	4		2
2	Экспериментальные методы исследования кинетики доменной структуры сегнетоэлектриков	9	6		3
3	Равновесная доменная структура. Проблема деполяризующего поля	6	4		2
4	Основы кинетической теории формирования доменной структуры.	9	6		3
5	Рост изолированных доменов	6	4		2
6	Формирование нано-доменных ансамблей. Дискретное переключение	12	8		4
7	Физические основы нано-доменной инженерии	6	4		2
	ИТОГО:	54	36		18

VI. ФОРМА ИТОГОВОГО КОНТРОЛЯ

Экзамен

VII. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КУРСА

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА (ОСНОВНАЯ)

1. М. Лайнс, А. Глас, «Сегнетоэлектрики и родственные им материалы». Мир, Москва, 1981.
2. Дж. Барфут, Дж. Тейлор, «Полярные диэлектрики и их применение». Мир, Москва, 1981.
3. А.П. Леванюк, Б.А. Струков, «Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах». Наука, Москва, 1995.
4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, «Электродинамика сплошных сред». Издательство «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1982.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА (ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ)

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, «Статистическая физика». Издательство «Наука», Москва, 1964.
2. Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский, «Физическая кинетика». Издательство «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1979.
3. Е. Федер, «Фракталы». Мир, Москва, 1991.
4. В.Г. Дмитриев, Л.В. Тарасов, «Прикладная нелинейная оптика», Москва, Физматлит, 2004.