

## **Программа**

**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных работников  
высшей школы**

**на базе учебного курса**

**«Кинетика микро- и нанодоменной структуры сегнетоэлектриков»**

Цель: изучение основных теоретических и экспериментальных достижений в области микро – и нанодоменной инженерии

Категория слушателей: преподаватели и научные работники высшей школы

Срок обучения: 24 часа

Форма обучения: с частичным отрывом от работы

Режим занятий: 8 часов в день

**Целью данного курса** является ознакомление с основными физическими основами процессов переключения спонтанной поляризации в сегнетоэлектрических материалах. Основные положения теоретического рассмотрения подтверждаются экспериментальными результатами, полученными при исследовании особенностей кинетики доменной структуры в модельных кристаллах ниобата лития и танталата лития. Особое внимание посвящено обсуждению условий возникновения и развития самоорганизованных микро – и нанодоменных ансамблей. В предложенных лекциях показано, как рассмотренные общие положения теории эволюции доменных структур при сильнонеравновесных условиях переключения, позволили разработать новые оригинальные методы формирования периодических нанодоменных структур.

### **Требования к уровню освоения учебного курса**

**Преподаватели должны:**

**Знать:**

- основы электростатики диэлектриков
- особенности распространения электромагнитных волн в анизотропных средах
- феноменологическую теорию фазовых переходов первого и второго рода (теорию Л.Д. Ландау)

**Иметь навыки:**

- сбора, систематизации и анализа научно-технической литературы, посвященной доменной инженерии в сегнетоэлектрических материалах
- использования полученных знаний о проблемах и перспективах развития данной области, а также о физических основах процессов, позволяющих получать

упорядоченные микро- и нанодоменные структуры с заданными характеристиками, в процессе обучения студентов

- сопоставления полученных знаний об особенностях процессов переключения поляризации в сегнетоэлектриках с общими проблемами физики фазовых превращений и использовать эту аналогию для построения междисциплинарных методических разработок.

**Иметь представление:**

- об основных положениях феноменологической теории сегнетоэлектриков
- об основных положениях кинетической теории зародышеобразования новой фазы, как основного механизма фазовых превращений первого рода.
- об особенностях процесса экранирования электрического поля в диэлектриках.
- об особенностях распространения света в нелинейных оптических средах.
- о проблемах стоящих в настоящее время перед микро- и нанодоменной инженерией.

**Научные работники должны:**

**Знать:**

- области применения доменной инженерии сегнетоэлектриков в науке и технике
- основные положения физики сегнетоэлектриков
- устройство и принцип работы современных сканирующих зондовых микроскопов

**Иметь навыки:**

- сбора, систематизации и критического анализа научно-технической литературы и профессиональной информации в области микро - и нанодоменной инженерии.
- планирования и проведения исследований и экспериментов, с использованием современных методов, позволяющих исследовать процессы на микро и нано уровне.
- генерации самостоятельных научно-технических и инновационных идей, способствующих дальнейшему развитию микро- и нанодоменной инженерии и применению этих результатов для создания практических устройств и приборов.
- использования полученных знаний об особенностях управления процессом образования микро- и нано-периодических доменных структур в смежных областях науки и техники для модернизации уже существующих там нанотехнологий.

Учебный курс «Кинетика микро – и нанодоменной структуры сегнетоэлектриков» состоит из дистанционной и очной частей.

**Дистанционный учебный** образовательный курс призван обеспечить слушателей необходимым объемом знаний по рассмотренной тематике. Задачей данного курса является ознакомление слушателей с современными подходами к интерпретации экспериментальных результатов по исследованию кинетики доменов в сегнетоэлектриках и с передовыми достижениями в одном из направлений нанотехнологии – **нанодоменной инженерии**.

Задача дистанционной составляющей учебного курса – подготовить слушателя к очному посещению Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии»

Теоретическая часть учебного курса состоит из семи лекций.

### **Лекция 1: Модельные сегнетоэлектрические материалы**

Основные требования, предъявляемые к выбору модельных сегнетоэлектрических материалов и причины обусловившие необходимость их использования при исследовании особенностей кинетики доменных структур. Особенности строения и основные физические свойства кристаллов семейства ниобата лития и танталата лития.

### **Лекция 2: Методы исследования кинетики доменной структуры сегнетоэлектриков**

Локальные и интегральные методы исследования, сравнительный анализ их недостатков и преимуществ. Метод диэлектрического гистерезиса. Измерение тока переключения. Метод пьезоэлектрического гистерезиса. Методы визуализации доменной структуры: селективное химическое травление, метод пироэлектрического зонда, метод сканирующей электронной микроскопии, метод нематических жидких кристаллов. Оптические методы визуализации доменной структуры. Сканирующая зондовая микроскопия: атомно-силовая и пьезоэлектрическая силовая микроскопии.

### **Лекция 3: Равновесная доменная структура. Проблема деполяризующего поля.**

Деполяризующее поле и его роль в процессе переключения спонтанной поляризации в диэлектрике - сегнетоэлектрике. Внешнее и объемное экранирование. Диэлектрический зазор и остаточное деполяризующее поле. Механизмы объемного экранирования.

### **Лекция 4: Основы кинетической теории формирования доменной структуры**

Основные положения классической теории зародышеобразования при фазовых превращениях первого рода. Кинетический подход к образованию наблюдаемых доменных структур. Эффективность экранирования деполяризующего поля.

### **Лекция 5: Рост изолированных доменов**

Основные стадии эволюции доменных структур, наблюдаемые в процессе переключения спонтанной поляризации. Особенности движения плоской доменной стенки с точки зрения теории зародышеобразования. Коррелированное зародышеобразование. Форма изолированных доменов: стохастическое и детерминированное зародышеобразование.

### **Лекция 6: Формирование нано – доменных ансамблей. Дискретное переключение.**

Условия наблюдения эффекта коррелированного зародышеобразования. Кинетика нанодоменов в сильнонеравновесных условиях переключения – дискретное переключение. Пальцеобразные структуры, нанодоменные ряды. Особенности кинетики доменов при переключении поляризации в экспериментах с искусственным диэлектрическим зазором. Формирование нанодоменных структур при облучении поверхности сегнетоэлектрика УФ лазером. Типы нанодоменных структур: ансамбли изолированных нанодоменов, периодические структуры нанодоменных лучей.

### **Лекция 7: Физические основы нанодоменной инженерии**

Основные области применения доменной инженерии. Кинетический подход к формированию доменных структур. Метод обратного переключения. Процессы умножения пространственной частоты доменной структуры и принципы управления этими процессами.

**Очная экспериментальная** часть учебного курса заключается в проведении исследований микро- и нанодоменных структур в сегнетоэлектриках на примере ниобата лития методом сканирующей зондовой микроскопии.

### **Методические рекомендации по реализации учебной программы**

На дистанционную часть учебного курса отводится 16 часа. На очную лабораторную часть - 8 часов. Полное содержание лекций находится на сайте [www.nanoobr.ru](http://www.nanoobr.ru) . Для контроля степени освоения данных лекций используются **тестовые вопросы** для самопроверки и **контрольные вопросы**.

## Тестовые вопросы к курсу: «Кинетика микро – и нанодоменных структур сегнетоэлектриков»

### Лекция 1 Модельные сегнетоэлектрические материалы

1. Модельные сегнетоэлектрические материалы это:
  - A) идеализированная теоретическая модель
  - B) реальные кристаллы с определенными характеристиками
  - C) гипотетический идеальный объект
  - D) любой одноосный сегнетоэлектрикОтвет:
2. Спонтанная поляризация является параметром порядка при описании в рамках теории Ландау:
  - A) несобственных сегнетоэлектриков
  - B) релаксорных сегнетоэлектриков
  - C) собственных сегнетоэлектриков
  - D) сегнетоэластиковОтвет:
3. Точечная симметрия кристаллов ниобата лития и танталата лития в сегнетоэлектрической фазе:
  - A)  $3m$  ( $C_{3v}$ )
  - B)  $\bar{3}m$  ( $D_{3d}$ )
  - C)  $32$  ( $D_3$ )
  - D)  $\bar{6}$  ( $C_{3h}$ )Ответ:
4. При переходе в сегнетоэлектрическую фазу симметрия кристаллов ниобата лития и танталата лития понижается за счет потери операции:
  - A) инверсии
  - B) зеркального отражения
  - C)  $C_3$
  - D)  $C_6$Ответ:
5. Число атомов в элементарной ячейке ниобата лития и танталата лития:
  - A) 9
  - B) 10
  - C) 5
  - D) 12Ответ:
6. Особенностью линейного электрооптического эффекта в кристаллах ниобата лития и танталата лития, позволяющей визуализировать домены методами оптической микроскопии является:
  - A) квадратичная полевая зависимость показателя преломления.
  - B) линейная полевая зависимость показателя преломления.
  - C) линейная полевая зависимость показателя преломления, зависящая от направления спонтанной поляризации

D) температурная зависимость показателя преломления

Ответ:

7. Нелинейное взаимодействие света со средой, приводящее к возникновению нелинейной поляризации, квадратично зависящей от интенсивности полей световых волн, не позволяет осуществить преобразование:

A) излучения частоты  $\omega$  в излучение с частотой  $2\omega$

B) излучения частоты  $2\omega$  в излучение с частотой  $\omega$

C) излучения частоты  $\omega$  в излучение с частотой  $\omega = 0$  (оптическое выпрямление)

D) излучения частоты  $\omega$  в излучение с частотой  $\omega/2$

Ответ:

8. Отличие кристаллов стехиометрического состава от кристаллов конгруэнтного состава заключается в том, что:

A) конгруэнтный состав соответствует химической формуле соединения

B) стехиометрический состав соответствует химической формуле соединения

C) стехиометрические кристаллы обладают повышенной степенью дефектности

D) конгруэнтные кристаллы обладают аномально низкими значениями переключающих полей

Ответ:

9. Явление прямого пьезоэлектрического эффекта заключается в:

A) зависимости температуры перехода от внешних напряжений

B) индуцировании поляризации под действием механических нагрузок

C) зависимости диэлектрической проницаемости от деформаций

D) появление механических напряжений в кристалле при приложении внешнего электрического поля

Ответ:

10. Ниобат лития и танталат лития называют «замороженными» сегнетоэлектриками потому что:

A) они обладают аномально высокими значениями спонтанной поляризации при комнатной температуре

B) они обладают аномально высокими температурами фазовых переходов

C) они обладают аномально высокими значениями спонтанной деформации

D) они обладают аномально высокими значениями коэрцитивных полей.

Ответ:

## **Лекция 2 Методы исследования кинетики доменной структуры сегнетоэлектриков**

1. К интегральным методам измерений не относится:

A) Измерение петли диэлектрического гистерезиса

B) Метод селективного химического травления

C) Измерение тока переключения

D) Измерение петли пьезоэлектрического гистерезиса

Ответ:

2. Параметр, не извлекаемый из экспериментов по измерению тока переключения:

A) время переключения

B) максимальное значение тока переключения

С) сопротивление образца

Д) время, необходимое для достижения максимально возможного значения тока переключения

Ответ:

3. Поверхностный рельеф полидоменного кристалла, выявленный в результате химического травления не может быть визуализирован с помощью:

А) оптической микроскопии

В) спектроскопии комбинационного рассеяния

С) сканирующей электронной микроскопии

Д) сканирующей зондовой микроскопии

Ответ:

4. Эффектом усталости в сегнетоэлектриках называется:

А) появление новых доменов при переключении в растущем внешнем электрическом поле

В) возникновение и рост областей, не участвующих в циклическом переключении

С) неполное переключение при подаче короткого импульса внешнего электрического поля

Д) асимметрия петли гистерезиса

Ответ:

5. Коэрцитивные поля определяются из петель диэлектрического гистерезиса как

А) точки пересечения с осью поляризации

В) точки пересечения с осью внешнего электрического поля

С) точки пересечения с осью поляризации линий, характеризующих асимптотическое поведение поляризации

Д) точка на оси внешнего электрического поля, характеризующая асимметрию петли гистерезиса

Ответ:

### **Лекция 3 Равновесная доменная структура. Проблема деполяризующего поля**

1. Связанные заряды по определению являются характеристикой:

А) пространственно неоднородного поведения спонтанной поляризации

В) монодоменизации сегнетоэлектрика

С) дефектности кристалла

Д) пространственно неоднородного напряженного состояния

Ответ:

2. Диэлектрический зазор в сегнетоэлектрике это:

А) расстояние от пластины конденсатора до поверхности сегнетоэлектрика

В) собственный поверхностный слой в сегнетоэлектрике, в котором отсутствует спонтанная поляризация

С) искусственный диэлектрический слой на поверхности сегнетоэлектрика

Д) диэлектрический слой в объеме сегнетоэлектрика

Ответ:

3. Внешним экранированием называется:

А) экранирование деполяризующего поля в сегнетоэлектрике за счет перераспределения заряда между обкладками конденсатора

- В) экранирование электрон-электронного взаимодействия в металлическом электроде
  - С) экранирование внешнего приложенного поля за счет возникновения индуцированной поляризации
  - Д) экранирование деполяризующего поля за счет разбиения на полосовые домены
- Ответ:

#### Лекция 4 Кинетическая теория формирования доменной структуры

1. Наибольшей вероятностью возникновения при равных внешних условиях обладают:

- А) 1D зародыши
- В) 3D зародыши
- С) полосовые домены
- Д) 2D зародыши

Ответ:

2. Если процесс бокового движения доменной стенки лимитируется процессами образования ступеней, то зависимость скорости бокового движения доменной стенки  $v$  от напряженности внешнего электрического поля  $E_{ext}$  задается выражением:

А)  $v = v_0 \exp\left(-\frac{E_{acc}}{E_{ext}}\right)$

В)  $v = \alpha E_{ext}$

С)  $v = v_0 \exp\left(-\frac{E_{acc}}{E_{ext}^2}\right)$

Д)  $v = v_0 \exp\left(-\frac{E_{acc}^2}{E_{ext}^2}\right)$

Ответ:

#### Лекция 5 Рост изолированных доменов

1. Изолированные домены, растущие в виде правильных шестиугольников, наблюдаются:

- А) в LN при переключении в условиях эффективной экранировки деполяризующего поля
- В) в CLT при переключении в любом поле
- С) в конгруэнтном LN при переключении с искусственным диэлектрическим зазором
- Д) при переключении в LN и LT в условиях неэффективного объемного экранирования

Ответ:

2. Отличие стохастического механизма образования ступеней от детерминированного заключается в том, что:

- А) ступени образуются на фиксированном расстоянии друг от друга
- В) возникающие ступени случайным образом распределяются вдоль доменной стенки
- С) центры образования ступеней строго фиксированы, и их местоположение задается геометрией домена.
- Д) образование ступеней происходит только на определенных центрах зародышеобразования, которые случайным образом распределены вдоль доменной стенки.

Ответ:

#### Лекция 6 Формирование нано - доменных ансамблей. дискретное переключение

1. Дискретное переключение – это процесс, при котором переключение спонтанной поляризации в сегнетоэлектрике осуществляется путем:



- A) бокового роста изолированных макро-доменов
- B) возникновения и роста коррелированных ансамблей нанодоменов
- C) движения одиночной доменной стенки
- D) коалесценции доменов

Ответ

2. Необходимым условием для инициирования коррелированного зародышеобразования является:

- A) наличие достаточного количества хаотически распределенных центров зародышеобразования
- B) легирование кристалла донорно-акцепторными примесями
- C) неэффективность объемного экранирования
- D) использование жидких электродов

Ответ:

3. Причиной формирования самоподобных поверхностных нанодоменных структур при воздействии на поверхность сегнетоэлектрика лазерным излучением является:

- A) пьезоэлектрическое поле
- B) пироэлектрическое поле
- C) поле электромагнитной волны
- D) молекулярное поле

Ответ

### **Лекция 7 Физические основы нанодоменной инженерии**

1. Форма импульса внешнего поля, используемая при управлении процессом обратного переключения, не имеет стадии:

- A) стабилизации
- B) коалесценции
- C) переключения в «сильном» поле
- D) обратного переключения в «слабом» поле

Ответ:

2. Уширение доменов за пределы электродов осуществляется за счет:

- A) заторможенного движения плоской доменной стенки
- B) самоорганизованного роста квазипериодических микро и нанодоменных ансамблей
- C) хаотического образования и роста макро-доменов
- D) роста изолированных доменов

Ответ

### **Контрольные вопросы для проверки материала в количестве 17 вопросов**

- 1) Сформулируйте основные критерии отбора модельных сегнетоэлектрических материалов
- 2) Какие свойства ниобата лития и танталата лития позволяют рассматривать их в качестве перспективных модельных кристаллов
- 3) Что представляет из себя прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты
- 4) Перечислите основные стадии процесса переключения спонтанной поляризации
- 5) Перечислите основные интегральные и локальные методы, используемые при изучении процессов переключения. Сравните преимущества и недостатки интегрального и локального подходов.
- 6) Перечислите основные моды сканирующей зондовой микроскопии, используемые при исследовании доменных структур
- 7) Перечислите и охарактеризуйте основные электрические поля, вносящие вклад в формирование локального электрического поля – движущей силы процесса переключения спонтанной поляризации
- 8) Что является основной причиной самопроизвольного обратного переключения?
- 9) Какой физический параметр служит критерием выбора определенного кинетического сценария?
- 10) Опишите основные особенности кинетики доменов при дискретном переключении
- 11) Опишите основные экспериментальные проявления процесса коррелированного зародышеобразования
- 12) Какие особенности эволюции доменных структур наблюдаются при переключении с искусственным диэлектрическим зазором
- 13) Что такое пироэлектрическое поле и как оно формируется в результате облучения поверхности сегнетоэлектрика УФ излучением
- 14) Опишите основные особенности доменных структур, возникающих при облучении полярной поверхности кристалла импульсным УФ лазером
- 15) Как можно объяснить в рамках предложенного теоретического подхода возникновение регулярных нанодоменных структур
- 16) Перечислите и охарактеризуйте области науки и техники, в которых применяется доменная инженерия
- 17) Приведите форму импульса обратного переключения, используемого для умножения пространственной частоты периодической доменной структуры и охарактеризуйте основные стадии процесса переключения

### **Список литературы и других дополнительных источников информации**

1. Струков Б.А., Леванюк А.П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. Наука, М., 1995.
2. Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применение. Мир, М., 1981.
3. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. Мир, М., 1981.
4. Физика сегнетоэлектрических явлений. Под ред. Смоленского Г.А. Наука, М., 1985.
5. Фридкин В.М. Фотосегнетоэлектрики. Наука, М., 1979.