Тезисы доклада

**Кинетика доменной структуры сегнетоэлектриков.   
Доменные микро- и нанотехнологии.**

Шур Владимир Яковлевич

Уральский федеральный университет

Впервые систематически исследовано формирование и эволюция самоорганизованных микро- и нанодоменных структур в сегнетоэлектриках. Визуализация доменов с высоким пространственным разрешением и непосредственное наблюдение кинетики доменов позволили детально изучить формирование доменной структуры. Экспериментально обнаружены и обоснованы эффекты потери устойчивости формы доменных стенок и переход к дискретному переключению.

Экспериментально исследовалось формирование доменных структур при переключении поляризации в монокристаллических пластинах одноосных сегнетоэлектриков семейства ниобата лития (LiNbO3) и танталата лития (LiTaO3) с различной степенью отклонения от стехиометрического состава и легированных Mg.

Для *in situ* визуализации кинетики доменной структуры использовалась оптическая микроскопия со скоростной камерой. Микроскопия пьезоэлектрического отклика и сканирующая электронная микроскопия обеспечивали визуализацию статической доменной структуры на поверхности кристалла с пространственным разрешением до 2 нм. Конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния позволяла наблюдать положение доменных стенок в объеме кристалла. Обработка серии изображений доменов на разной глубине позволяла выявлять стадии формирования микро- и нанодоменных структур.

Для анализа полученных результатов использовался оригинальный кинетический подход. При этом кинетика доменов при переключении поляризации рассматривалась как аналог фазового перехода первого рода, при котором вероятность зародышеобразования определяется локальной величиной суммы внешнего, деполяризующего и экранирующих полей. При таком рассмотрении выявлена существенная роль запаздывания объемного экранирования изменения деполяризующих полей при переключении поляризации в сегнетоэлектрическом конденсаторе с поверхностным диэлектрическим слоем. Показано, что возникающий при неэффективном экранировании шлейф остаточного деполяризующего поля, замедляет традиционный боковой рост доменов и стимулирует переход к дискретному переключению за счет образования изолированных нанодоменов с заряженными доменными стенками впереди движущейся доменной стенки.

При неэффективном экранировании реализуются сильнонеравновесные условия переключения поляризации, которые приводят к качественному изменению формы изолированных доменов, а также к проявлению эффектов самоорганизации при росте самоподобных микро- и нанодоменных структур, состоящих из изолированных доменов.

Экспериментально и теоретически показано, что самоорганизованное формирование нанодоменных структур обусловлено процессом коррелированного зародышеобразования, вызванного особенностями распределения поля вблизи доменной стенки при наличии собственного или искусственного диэлектрического зазора. При этом период полученных квазирегулярных доменных структур определяется толщиной этого слоя.

Для создания сильнонеравновесных условий переключения использовались:   
(1) самопроизвольное обратное переключение после выключения внешнего поля,   
(2) нанесение на полярные грани диэлектрических слоев и модификация поверхности методом протонного обмена, (3) воздействие пироэлектрического поля при охлаждении кристалла после импульсного нагрева излучением инфракрасного лазера.

Экспериментально и методами компьютерного моделирования изучено изменение формы изолированных доменов при неэффективном объемном экранировании. Особое внимание уделено переходу от роста доменов в форме многоугольников к аномальному росту за счет дискретного переключения. Выявлено и систематически исследовано формирование самоподобных доменных структур за счет эффекта ветвления, а также «широких доменных границ» и самоупорядоченных нанодоменных ансамблей.

Впервые обнаружено формирование нанодоменных лучей, обусловленное замедлением встречного движения доменных стенок при самопроизвольном обратном переключении. Выявлена потеря устойчивости формы доменной стенки и формирование пальцеобразной структуры. Исследование образования самоподобных дендритных доменных структур позволило выявить основные механизмы: ветвление, расщепление, образование пальцеобразных доменов и формирование остаточных нанодоменов.

Впервые *in situ* визуализировано формирование структуры доменных лучей под действием пироэлектрического поля при охлаждении после завершения импульсного облучения. Выявлено формирование квазирегулярных нанодоменных ансамблей при многократном импульсном облучении монокристаллов танталата лития.

В танталате лития обнаружено и исследовано самоорганизованное формирование нанодоменных ансамблей при охлаждении после импульсного нагрева выше температуры фазового перехода. Впервые продемонстрировано образование дендритных структур в форме снежинок. Экспериментально исследована кинетика их образования и роста за счет обратного переключения поляризации в приповерхностном слое растущих изолированных доменов.

Для исследования взаимодействия изолированных доменов проведены исследования роста цепей доменов при переключении поляризации с помощью проводящего зонда сканирующего зондового микроскопа. Показано, что при изменении приложенного напряжения, влажности, температуры и расстояния между доменами, можно наряду с цепями одинаковых доменов получать чередование размеров, квазипериодичность и хаос. Наблюдаемые эффекты отнесены за счет рассчитанных особенностей пространственного распределения электрического поля, создаваемого зондом, и деполяризующего поля. Рассмотрена возможность использования эффекта для создания мем-элементов, которые сочетают в себе хранение и обработку информации, и своей функциональностью напоминают работу биологических клеток-нейронов. Создаваемое из них вычислительное устройство по ряду ключевых свойств похожее на мозг.

Сканирующая микроскопия пьезоэлектрических сил впервые использована для исследований роста доменов в полярном направлении с высоким пространственным разрешением. Для этого проводилось локальное переключение на неполярных срезах кристаллов. Продемонстрировано существенное влияние самопроизвольного обратного переключения на форму образующихся доменов.

Все полученные результаты удалось объяснить как формирование самоорганизованных структур при сильнонеравновесных условиях переключения. Справедливость модели подтверждена результатами компьютерного моделирования.

Полученные результаты не только качественно изменили представления о кинетике доменной структуры в сегнетоэлектриках, но и способствовали развитию доменной инженерии - созданию стабильных микронных и субмикронных доменных структур с заданными параметрами. Изготовлены периодически поляризованные кристаллы ниобата лития и танталата лития с прецизионной доменной структурой для генерации второй гармоники и параметрической генерации света, которые позволили создать компактные источники видимого и инфракрасного света с высокой эффективностью.