

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Ядвиги Викторовны БОДНАРЧУК «Особенности формирования сегнетоэлектрических доменов в условиях пространственно неоднородных полей атомно-силового микроскопа и электронного облучения»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Актуальность темы диссертации

Сегнетоэлектрические материалы уже давно притягивают интерес исследователей. Большинству неспециалистов они известны благодаря своим активным свойствам, а именно прямому и обратному пьезоэффекту. Пьезоэлектрические свойства материалов, действительно, удивительны. Существует мнение, что пьезоэлектричество сильно эксплуатируется и в живой природе. Например, пьезоэффекты на макроскопическом уровне проявляются в костных, мышечных и хрящевых тканях. С такой, «пьезоэлектрической» точки зрения утренняя физкультура приобретает особенный смысл: движения заряжают нас не только фигурально, но и буквально.

Появление и развитие современных зондовых техник исследования, атомно-силовой и электронная микроскопия, очевидно, способствуют движению к более глубокому пониманию устройства сегнетоэлектрических материалов, а также формированию новых перспектив для их применений. Это сопровождается экспоненциальным за последние два десятилетия ростом числа зондовых исследований сегнетоэлектрических материалов.

В диссертационной работе Я. В. Боднарчук изучались особенности формирования поляризационных доменов в сегнетоэлектрических материалах, при использовании в качестве средства производства таких доменов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Работа была сфокусирована на выявление специфики СЗМ диагностики всех трех пространственных компонент локального вектора поляризации в релаксорах, на примере кристаллических материалов твердых растворов $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN); и применении полученных знаний для изготовления и исследований структур в поляризационных доменах в оптических волноводах, полученных методом имплантации ионов He^+ в сегнетоэлектрические кристаллы SBN и LiNbO_3 .

Исходя из вышесказанного, тему диссертации Я. В. Боднарчук и развиваемые направления работы можно считать в достаточной степени актуальными.

Структура и содержание работы

В диссертации есть введение, 4 главы, разделы с выводами и благодарностями, список аббревиатур, список публикаций автора по теме диссертации и список цитируемой литературы из 129 наименований. Общий объем диссертации составляет 125 страниц, включая 59 рисунков и 5 таблиц.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы направления и задачи исследования. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы основные научные положения, вынесенные на защиту. Есть информация об апробации работы на конференциях и публикациях по теме диссертации, охарактеризован личный вклад автора.

Затем идет достаточно исчерпывающий литературный обзор состояния дел в области исследования. Вторая, очень краткая методическая глава главным образом описывает СЗМ методику микроскопии пьезоотклика. Важно, однако, что в ней обсуждается необходимость детектировать латеральный сигнал пьезоотклика для реализации информативных СЗМ исследований доменов поляризации на неполярных поверхностях пьезоэлектриков.

Глава три, с оригинальными результатами, посвящена продолжению исследований особенностей формирования доменов поляризации под воздействием сильно неоднородного поля СЗМ зонда в кристалле релаксорного сегнетоэлектрика SBN, на его неполярных поверхностях. В четвертой главе развитый методический подход применен для изучения локальных пьезоэффектов в оптических волноводных структурах, полученных имплантацией высокоэнергетических ионов He^+ в кристаллы SBN и $LiNbO_3$. Структуры поляризационных доменов в этих образцах создавались автором как с помощью СЗМ, так и используя электронный пучок РЭМ. В завершающем разделе диссертации, выводах, резюмированы основные результаты работы.

К достоинствам диссертационной работы можно отнести выбор объектов исследования, а также комплексность и завершенность исследований. Также производит хорошее впечатление комбинация СЗМ и РЭМ методов с оптической микроскопией сигнала второй гармоники, использованная для приготовления и последующего изучения сегнетоэлектрических образцов с упорядоченными структурами поляризационных доменов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Методом СЗМ на неполярных поверхностях сегнетоэлектрических кристаллов SBN записаны и исследованы структуры встречных доменов

поляризации. Предложен механизм фронтального роста таких доменов, выявлена специфика переключения состояний поляризации, связанная с релаксорной природой SBN.

2. С помощью СЗМ изготовлены поляризационные микродомены в оптическом волноводном слое, сформированном в кристаллах SBN имплантацией He^+ . Обнаружены асимметрия в полярности сформированных доменов поляризации и особенности кинетики распада доменных структур, которые объяснены пиннингом на нарушениях структуры волноводного слоя.

3. Методами СЗМ исследованы особенности поляризационных доменных структур, сформированных под действием электронного облучения в оптических волноводах на базе имплантированных ионами He^+ кристаллов LiNbO_3 .

Теоретическая значимость.

Для анализа фронтального роста планарных доменов поляризации на неполярной поверхности SBN применен механизм ползучести.

Практическая значимость.

На основе проведенных исследований выработаны рекомендации по оптимальной амплитуде ускоряющего напряжения РЭМ для изготовления с помощью электронного луча решеток доменов поляризации в волноводах на основе LiNbO_3 с заданной глубиной имплантации ионов He^+ .

Достоверность результатов подтверждена многократно воспроизводимыми экспериментами, их согласием с разработанными аналитическими моделями и литературными данными.

Замечания и вопросы.

По диссертации:

Введение.

Стр 6, 1 абзац.

... сделан акцент на исследовании сегнетоэлектрического аспекта проблемы – специфике процессов переключения и динамики доменов в этих условиях пространственно неоднородных полей.

1. По-видимому, слово «этих» здесь лишнее?

Литературный обзор.

Стр.12-13.

2. В чем отличие скорости нуклеации от скорости зарождения?

3. Зачем в формуле (1.5) введен коэффициент k ?

4. Если в формуле (1.6) на стр.12 устремить поле в бесконечность, то время переключения t_s совпадет с t_0 – временем нуклеации. А на следующей странице отмечается, что в высоких полях переключение контролируется скоростью фронтального движения домена.

5. Почему для скорости нуклеации в бесконечном поле, v_∞ , выбран индекс бесконечность, а соответствующее время переключения обозначено как t_0 ?

Стр. 21.

В работах [34] была исследована доменная структура на свежих сколах кристалла SBN-0,61 и 0,75 на (001) и (110) поверхностях рисунка 8, исследования проводилось с помощью

6. Члены предложения плохо согласованы.

Стр.29, Рис. 14.

7. Что такое $u(z)$?

8. Каков смысл пунктирной линии на рисунке?

Стр.30.

9. Подходит ли формула (1.10) для механизма ползучести также и для модели Миллера-Вайнраха?

Стр. 32, третий абзац.

Хотя для QPM величина $I_{2\omega}$ при равных d_{eff} в $\pi/4$ ниже...

10. Фактор $\pi/4$ в действительности равен $\pi/2$?

11. Использовано обозначение ($oo \rightarrow ee$), которое нигде в тексте не расшифровано.

12. Единицы измерений идут то на русском, то на английском.

Стр. 32, после формулы (1.17).

и для QPM 1-го порядка ($m=1$) согласно (11) интенсивность ВГ возрастает в 15 раз.

13. Что такое (11)? Предположив, что это номер литературной ссылки, все равно, сложно понять, почему интенсивность возрастает в 15 раз.

Стр. 34-35.

высокими коэрцитивными полями... 60-220кВ/см (в зависимости от состава) [3].

Современная аппаратура АСМ не обеспечивает такие высокие поля.

14. С утверждением сложно согласится: Напряжение **1 Вольт** на острие **100 нм** радиуса создает поле **100 кВ/см**. По-видимому, в диссертации речь идет об однородном поле?

Стр.35.

Кроме того, полученные результаты информативны для анализа переключения релаксорных сегнетоэлектриков, пока еще практически не изученного.

15. Члены предложения не согласованы.

Глава 2.

Стр.37.

которые компенсируются при прогибе кантилевера (рисунок 18).

16. На рис. 18 нет кантилевера.

Стр.38.

силой ($\sim 10^{-6}$ - 10^{-8} Н) взаимного притяжения и отталкивания.

17. Сила притяжения заметно меньше и не попадает в указанный диапазон.

Стр.42.

Для исследования переключения методом АСМ могут быть измерены также

18. переключения чего?

19. Последний абзац главы оторван по смыслу от предшествующего сюжета!

Глава 3.

Стр. 43-44.

20. «1. Исследование процессов... и 2. Описание ...сценария» не могут быть причинами проводимых в диссертации исследований.

Стр.47.

Формирование этой структуры объясняется очевидной электростатической причиной (разным знаком потенциалов $U = \int Ez dz$ относительно точки контакта) и возможностью поляризации ZFC кристалла в обоих направлениях.

21. Относительно точки контакта потенциал спадает радиально, и всюду имеет полярность, совпадающую со знаком напряжения, приложенного к зонду относительно заземленного образца. По-видимому, автор хотел сказать, что поле слева направлено вдоль, а справа - против полярной оси?

Стр.60, таблица 2.

22. Как определялась энергия активации?

Стр.61.

Как известно, частота дисперсии E_c в модельных сегнетоэлектриках характерна для сегнетоэлектриков в области частот порядка МГц [1, 2].

23. Какой смысл словосочетания **частота дисперсии E_c** ?

Стр.62.

В этом разделе представлены измерения процессов релаксации записанных структур. Основной целью является изучение факторов, определяющих их устойчивость.

24. К чему относится термин устойчивость: к измерениям, к процессам релаксации, к структурам...?

Стр.67, подпись к Рис.39.

(показаны кружками, квадратами, треугольниками и ромбами параметры записи решетки).

25. Фраза не согласована.

Глава 4.

Стр.77.

$$n_1 \ll n_2$$

26. Неверное условие, так как n_1 все же больше единицы.

Стр.84.

Таким образом, различие зависимостей $D(t)$ и $D(U_{DC})$ для разных знаков U_{DC} различны;

27. Зависимости ведут себя по-разному?

28. Нет ли ошибки в предэкспоненциальном факторе в формуле (4.1)?

29. В тексте указан термин **$H\omega(t)$** , а ось ординат графика 49 обозначена с помощью **H**.

Стр.85.

В согласии с данными рисунка 48 начальное значение H_ω для $-U_{DC}$ превышает значение $+U_{DC}$.

30. На рис. 48 речь идет о диаметре домена!

Стр.87.

Петли, записанные в ZFC волновода He-SBN более симметричные и несмещенные (рисунок 50а) по сравнению с петлями, записанными в FC состоянии (рисунок 50б), о чем свидетельствует разное поле смещения E_b .

31. Плохо согласованное предложение.

По автореферату:

Стр.5.

1. Аббревиатура **ГВГ** появляется в тексте единственный раз и не раскрыта.
2. Английская аббревиатура **PFM** не обозначает метод пьезоэлектрического отклика, если воспринимать текст формально и буквально. **PFM** - это пьезоэлектрическая силовая микроскопия.

Стр.7.

3. Введение аббревиатуры **PNR** излишне, так она нигде ни используется; нет особой необходимости и в аббревиатуре **RF**, использованной всего лишь один раз.

Стр.11.

4. Формулу (2), возможно, не стоило приводить в автореферате, так как она получена в работе [17].

Стр.12, обсуждение Рис.5.

Грубые оценки дают величину энергии активации в $U_a = 0.48$ и 0.22 эВ для FC и ZFC кристаллов, соответственно.

5. Наклоны линий, аппроксимирующих данные по **FC** и **ZFC** кристаллам, отличаются примерно в **30 раз**. Почему энергии активации отличаются всего в **2 раза**?

Стр.14.

6. Не расшифрован термин **Ps**.

Стр.16, четвертая строка снизу.

иллюстрирующие изменение доменных решеток

7. О каких параметрах решеток поляризационных доменов идет речь?

Сделанные замечания не касаются основных положений диссертации, вынесенных на защиту, и не портят общего позитивного представления о результатах работы.

Заключение по диссертации Я. В. Боднарчук.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, пункт 1 – «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов, как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления».

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию и отражает полученные результаты.

Диссертация Я. В. Боднарчук «Особенности формирования сегнетоэлектрических доменов в условиях пространственно неоднородных полей атомно-силового микроскопа и электронного облучения» является законченной научно-квалификационной работой. Замеченные недостатки не снижают общей научной значимости.

Работа отвечает критериям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Ядвига Викторовна Боднарчук заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Старший научный сотрудник лаборатории
физико-химических свойств полупроводников
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН,
доктор физико-математических наук

Александр Витальевич Анкудинов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Телефон: (812) 297-2245

Факс: (812) 297-1017

Электронная почта: alexander.ankudinov@mail.ioffe.ru



14.06.2016

Анкудинов
Подпись _____ удс
Зав. канцелярией *AS*
ФТИ РАН 14.06