

ОТЗЫВ

на диссертационную работу Озеровой Ксении Евгеньевны « **Особенности зарядки сегнетоэлектриков LiTaO_3 и LiNbO_3 при электронном и ионном облучении**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5.-«Физическая электроника».

Диссертационная работа Озеровой Ксении Евгеньевны « Особенности зарядки сегнетоэлектриков LiTaO_3 и LiNbO_3 при электронном и ионном облучении» посвящена изучению физических механизмов и кинетических особенностей процесса зарядки диэлектриков и сегнетоэлектриков при электронном и ионном облучении их поверхности. Несмотря на то, что явления радиационной зарядки диэлектрических материалов исследуются давно, до сих пор не все аспекты этого сложного процесса объяснены, достоверно доказаны и до конца поняты. Происходящие при радиационной зарядке явления представляют не только большой научный интерес, но и имеют прикладное практическое значение, тк влияние зарядки необходимо учитывать везде, где имеется или используется взаимодействие материалов с различными видами облучения. Понимание происходящих физических процессов стимулируется радиационной безопасностью в космических аппаратах, необходимостью повышения надежности функционирования интегральных схем в разных экстремальных условиях, развитием оптоэлектроники, развитием радиационных методов исследования материалов, совершенствованием плазменных технологических установок и т.д. В связи с этим **актуальность** работы не вызывает сомнений.

Особенностью исследования Озеровой Ксении Евгеньевны является рассмотрение происходящих зарядовых процессов не просто в классическом диэлектрическом материале, а в диэлектриках, обладающих внутренней спонтанной поляризацией, те в сегнетоэлектриках. Влияние спонтанной

электрической поляризации (P_s) и ее направления по отношению к облучаемой поверхности на происходящие зарядовые процессы, влияние экранирующего спонтанную поляризацию поверхностного слоя до сих пор так подробно и детально не изучалось, хотя отдельные признаки такого влияния на зарядку и ее релаксацию обнаруживались в сегнетоэлектриках и ранее. На мой взгляд, именно эти исследования Озеровой Ксении Евгеньевны представляют наиболее значительный научный интерес.

В качестве облучаемых сегнетоэлектриков в исследовании использовались монокристаллы ниобата лития ($LiNbO_3$) и танталата лития ($LiTaO_3$). $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$ являются одноосными сегнетоэлектриками 3m-симметрии с низкой темновой проводимостью и уникальными нелинейно-оптическими и электрооптическими характеристиками. Эти сегнетоэлектрические кристаллы также являются пиро- и пьезоэлектриками. Все эти уникальные качества способствуют их широкому применению в разнообразных практических устройствах. В сочетании с развитием современных технологий, направленных на управляемое создание в сегнетоэлектрических пленках и кристаллах областей с периодически разнонаправленной электрической поляризацией (P_s), практическая значимость $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$ особенно возросла. Так называемые 1D и 2D регулярные доменные структуры (РДС) особенно актуальны для нелинейного преобразования частоты лазерного излучения в режиме фазового квазисинхронизма, который основан на нелинейной зависимости оптической восприимчивости от направления P_s . Успехи развития данной области привели к созданию устройств управления спектральными, временными и поляризационными параметрами оптического излучения. Одной из перспективных и постоянно развиваемых технологий бесконтактного создания РДС является доменная инженерия с использованием облучений электронными или ионными пучками поверхности фотонных кристаллов и пленок. В связи с этим, выполненная исследовательская работа является **практически значимой** и может

способствовать развитию и улучшению эффективности бесконтактной доменной инженерии в сегнетоэлектриках вообще, и, особенно, в $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$, с помощью электронного и ионного облучения.

Диссертация Озеровой Ксении Евгеньевны состоит из введения и трех глав. Объем диссертации составляет 113 страниц и 52 рисунка, список публикаций автора имеет 11 наименований, а список цитируемой литературы 118 наименований.

Во **введении** представлена цель работы, обосновывается ее актуальность, научная и практическая значимость, формулируются цель и задачи исследования, отмечен личный вклад автора, сформулированы положения, выносимые на защиту, и представлен список апробации работы.

В **первой главе** описываются характерные особенности сегнетоэлектриков, подчеркивается их практическая значимость, представлен подробный аналитический обзор публикаций по явлениям зарядки диэлектриков и сегнетоэлектриков под воздействием облучения заряженными частицами. Там же критически рассматриваются и обсуждаются механизмы и модели зарядки диэлектриков и сегнетоэлектриков электронными и ионными пучками известные к настоящему времени. На основании этого определены цели и задачи работы.

Основной целью данной диссертационной работы является исследование специфических особенностей радиационной зарядки сегнетоэлектриков $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$ под воздействием электронного и ионного облучения

Следующие две главы связаны с непосредственно выполненной работой. В них описываются используемые экспериментальные установки, детали и подробности проведенных экспериментов, представляются многочисленные экспериментальные результаты. Также в них предлагаются новые модели происходящих радиационных процессов, делаются расчеты распределения зарядов и электрического поля в приповерхностной области облучаемых сегнетоэлектриков. Одна из экспериментальных глав

посвящена исследованиям зарядки $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$ *при электронных облучениях* расфокусированным лучом с использованием низких (до 1 кэВ) и средних (5 и 10 кэВ) энергий облучающих электронов. Для облучений применялся растровый электронный микроскоп (РЭМ), снабженный рядом дополнительных устройств, которые позволяли осуществлять контролируемую зарядку мишени и в то же время проводить измерения всех характеристик зарядки. Следующая экспериментальная глава посвящена исследованиям зарядки $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$ *при ионном облучении*. В экспериментах по ионному облучению используется источник ионов (Ar^+) с энергией в 6 кэВ и измерительная аппаратура, аналогичная применяемой в РЭМ для исследования зарядки электронами.

В *заключении* подведены итоги проведенной работы и сформулированы основные выводы.

Из текста диссертации понятно, что Озеровой Ксенией Евгеньевной проведено **достаточно полное и цельное исследование** происходящих физических явлений. Комплексная экспериментальная установка позволяла определять и измерять сдвиги спектров вторичных электронов в процессе зарядки поверхности, а также регистрировать токи утечки заряда и токи смещения, связанные с величиной заряда захваченного образцом. Расчеты поверхностных потенциалов по измеренным интегральным значениям токов смещения, т.е. величинам аккумулируемых зарядов, дают результаты сравнимые с известными в литературе данными (с погрешностью порядка 5-10 %). Этим подтверждается **достоверность** сведений о комплексных кинетических характеристиках зарядки сегнетоэлектрических кристаллов $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$ под воздействием как электронного, так и ионного облучений.

Тщательный сравнительный анализ и выявление особенностей кинетических характеристик для разных срезов и разных образцов обнаружил **ранее неизвестные** различия в протекании зарядовых процессов, в том числе связанных и с наличием экранирующего спонтанную

поляризацию поверхностного слоя. Обнаружено, что влияние поверхностного слоя наиболее значимо при использовании низких энергий электронного облучения (0,2-1,0 кэВ). А при энергиях электронного облучения ≥ 5 кэВ основные характеристики зарядовых процессов были подобны процессам зарядки классических диэлектриков. Основываясь на экспериментальных результатах, автор диссертации Озерова Ксения Евгеньевна предложила **новые модели**, объясняющие физические причины данных явлений. В отличие от ранее известных моделей, в моделях Озеровой Ксении Евгеньевны были учтены заряды поверхностного слоя экранирования спонтанной поляризации. С учетом новых моделей Ксения Евгеньевна всесторонне рассмотрела распределения зарядов в облучаемых поверхностных слоях и выполнила расчеты электрического поля формирующегося в результате радиационного облучения электронами и ионами Ar^+ . На основе полученных результатов сделан вывод о более высокой эффективности зарядки сегнетоэлектриков при ионном облучении, по сравнению с облучением электронами. Кроме того, было обнаружено, что фактор эффективности зарядки выше у диэлектриков, чем у сегнетоэлектриков. В диссертационной работе также обнаружено и объяснено различие в протекании зарядовых процессов между $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$.

Все это может способствовать более успешному развитию доменной инженерии электронными и ионными пучками. Выдвинутые модели распределений зарядов и соответствующих электрических полей позволяют проводить более корректную интерпретацию получаемых экспериментальных результатов. Также, несомненно, что получены **новые** сведения о своеобразии процессов зарядки сегнетоэлектриков, которые следует учитывать в радиационной физике сегнетоэлектриков и в прикладных исследованиях фотонных кристаллов. В этом заключается **научная и практическая значимость** данной диссертационной работы.

Отмечу, что диссертация вызвала у меня большой интерес, тк она близка к тематике моих исследований, связанной, в том числе с доменной инженерией электронным лучом. **Новизна** данной работы не вызывает сомнения, многие полученные сведения об особенностях и кинетических закономерностях радиационных процессов приводятся и объясняются впервые. Хочется также отметить большой объем проведенных экспериментальных исследований. А также основательность и кропотливость, проявленную Озеровой Ксенией Евгеньевной при анализе и сравнении многочисленных полученных экспериментальных результатов для разных срезов кристаллов $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$ и разных используемых энергий и видов облучений.

Ниже представлены мои небольшие **замечания** к оформлению работы и некоторые возникшие у меня **вопросы**, носящие скорее дискуссионный характер.

1. В тексте диссертации явно не хватает номенклатурного списка использованных сокращений и обозначений, которых достаточно много. Это уменьшило бы и иногда встречающуюся путаницу в обозначениях. Например, сокращенное обозначение растрового электронного микроскопа, время от времени, меняется: или РЭМ, или СЭМ (сканирующий электронный микроскоп). Обозначения экспериментально определяемых токов смещения - I_d и токов утечки зарядов I_L постепенно трансформируются в токи I_1 и I_2 . Дебаевская длина экранирования зарядов - l_d может в некоторых местах обозначаться как L_d (см. стр. 48).

Наличие списка используемых обозначений было бы весьма полезным при ознакомлении с диссертацией.

2. Важные и новые результаты были получены при исследовании роли поверхностного слоя экранирования сегнетоэлектрических поверхностей. Облучения образцов проводились при этом при использовании самых низких ускоряющих напряжений РЭМ. Но какого-либо описания предварительной подготовки образцов перед началом их исследования я в

тексте диссертации не обнаружила. Тогда как плохо удаленная «грязь» с поверхности образцов может существенно повлиять на результаты начальной зарядки при ускоряющих напряжениях $U < 1$ кВ и тем самым увеличить статистический разброс в уровне детектируемых отклонений измеряемых величин. Считаю, что было бы целесообразным представить описание подготовки поверхности образцов перед их исследованием.

3. Меня смущают полученные оценки критического размера облучаемой области «*a*»-стороны облучаемого квадрата, влияющего на реализацию возможного процесса переполаризации. Оценки приведены в автореферате на стр. 14, а в диссертации на стр 70. В данных оценках в качестве критической плотности внедряемых зарядов, использованной в расчетах, берутся значения равные величине спонтанной поляризации облучаемых кристаллов. Тогда как этой величины плотности внедряемых при облучении зарядов, по моему мнению, недостаточно. Ведь для инверсии P_s необходимо не только скомпенсировать заряды спонтанной поляризации, но и значительно превысить их величину. Однако приведенные оценки « $a_{кр}$ », как отмечено в диссертации, носят предварительный характер и требуют дополнительной экспериментальной проверки. Поэтому сделанное мной замечание никак не влияет на общую ценность выполненных исследований .

4. По поведению измеряемых токов образца во время облучения $\pm Z$ срезов с энергиями электронов в 5 и 10 кэВ делается вывод о необходимости ввода в токовый баланс дополнительных токов, в том числе тока I_p – тока переполаризации. Этот вывод подтверждается измерениями токов и их инверсией в дополнительном эксперименте с подачей положительного смещения на облучаемую металлическую проволоку. Мне кажется, в работе не хватает еще одной более прямой проверки возможного возникновения доменов в облучаемой зоне сегнетоэлектрика. Это можно было бы сделать при помощи простого селективного травления образцов после эксперимента. Такая проверка однозначно могла бы подтвердить или

опровергнуть возможность инверсии Ps с последующим формированием доменов в условиях расфокусированного облучения.

5. Диссертант обсуждает наличие специфических (состав, электрофизика и , возможно, толщина) особенностей поверхностного слоя экранирования зарядов Ps на разных полярных срезах основываясь на сравнении выявленных аномалий кинетических характеристик зарядки при малых U , (см.стр.64 и 70). Может ли чувствительность данного метода позволить путем еще более тонкого подбора энергии облучения оценить или сопоставить толщины поверхностного слоя экранирования на разных полярных + или – Z срезах?

Несмотря на имеющиеся у меня небольшие замечания, диссертация Озеровой К.Е., в целом, имеет четкую структуру, изложена ясным языком, достаточное количество иллюстративного материала позволяет понять суть исследования и его выводы. Проведенное Озеровой К.Е исследование и его результаты делают значительный вклад в изучение и выявление специфических особенностей радиационной зарядки сегнетоэлектриков $LiNbO_3$ и $LiTaO_3$ под воздействием электронного и ионного облучения. Все научные положения обоснованы в достаточной степени, их **достоверность** не вызывает сомнения. Работа выполнена на высоком научном уровне, отличается актуальностью, новизной, научной и практической значимостью. Поставленные цели и задачи достигнуты и решены.

Автореферат диссертации, статьи и тезисы докладов правильно и полно отражают содержание диссертационной работы. Результаты работы были доложены на 6 конференциях. Основные результаты опубликованы в открытой печати в Российских и зарубежных рецензируемых изданиях - 5 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК и рецензируемых в базах Scopus/WoS или RSCI. Полный список публикаций имеет 11 наименований.

Считаю, что диссертационная работа « Особенности зарядки сегнетоэлектриков $LiTaO_3$ и $LiNbO_3$ при электронном и ионном облучении», соответствует критериям установленным Положением о присуждении

ученых степеней в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, а ее автор Озерова Ксения Евгеньевна, безусловно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. - «Физическая электроника».

Официальный оппонент: Коханчик Людмила Сергеевна,
канд. физ-мат. наук, ведущий научный сотрудник,
+7(496)524-40-06; mlk@iptm.ru

Коханчик Л.С. _____

Научная организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов
Российской академии наук (ИПТМ РАН)

142432, г. Черноголовка, Московская область, ул. Академика Осипьяна, д. 6;
телефон: +7(496)524-40-60, факс: +7(496)524-42-25; general@iptm.ru

Подпись Коханчик Л.С. заверяю

Ученый секретарь ИПТМ РАН

Феклисова Ольга Владимировна