

На правах рукописи



Олейник Андрей Николаевич

**ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ В МОНОКРИСТАЛЛАХ
ТАНТАЛАТА И НИОБАТА ЛИТИЯ**

01.04.07 — Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Белгород – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Кубанкин Александр Сергеевич

Официальные
оппоненты: **Балдин Антон Александрович,**
доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник, Международная
межправительственная научно-
исследовательская организация Объединенный
институт ядерных исследований, начальник
сектора Лаборатория физики высоких энергий
Объединенного института ядерных
исследований

Стучебров Сергей Геннадьевич
кандидат физико-математических наук, ФГАОУ
ВО Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, доцент
Исследовательской школы физики
высокоэнергетических процессов

Защита диссертации состоится «__» декабря 2019 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета БелГУ.01.02 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85 и на сайте <https://www.bsu.edu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета БелГУ.01.02
к.ф.-м.н.



М.С. Тихонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Актуальность проведения исследований, связанных с созданием сравнительно недорогих, компактных и управляемых источников рентгеновского излучения для решения фундаментальных и прикладных задач подтверждается огромным количеством работ, посвященных различным путям разработки подобных источников [1]. В настоящее время можно выделить несколько направлений разработки рентгеновских источников нового поколения, которые по сути являются модификациями классических рентгеновских трубок. Например, рентгеновские трубки с автоэмиссионным катодом, состоящим из углеродных наноструктур или рентгеновские трубки с анодом из жидкого металла. Одним из оригинальных и относительно малоизученных способов генерации рентгеновского излучения является возможность применения пирозлектрического эффекта для получения высокого электрического потенциала, необходимого для ускорения заряженных частиц (электронов и положительных ионов) и, соответственно, генерации рентгеновского излучения [2-4].

Для генерации высокого электрического потенциала необходимо обеспечить вокруг пирозлектрика давление остаточного газа на уровне не более чем 10^{-2} Торр. В этом случае заряд, индуцируемый при пирозлектрическом эффекте, не будет мгновенно экранироваться окружающей средой, а станет источником электрического поля, напряженность которого по некоторым оценкам может достигать 10^5 - 10^6 В/см [5,6]. В таком электрическом поле становится возможной реализация сегнетоэлектрической электронной эмиссии [7] и полевой ионизации молекул остаточного газа [8]. Именно благодаря эмиссии электронов с поверхности пирозлектрика, а также образованию электронов и положительных ионов из молекул остаточного газа образуются заряженные частицы. Ускорение заряженных частиц происходит в том же сгенерированном пирозлектриком

электрическом поле. При взаимодействии ускоренных частиц с веществом происходит генерация рентгеновского излучения.

Основными преимуществами использования пирозлектриков для генерации рентгеновского излучения являются малые размеры источников рентгеновского излучения (порядка нескольких сантиметров), отсутствие внешнего источника высоковольтного питания как в рентгеновских трубках, а также простота их изготовления в виду отсутствия необходимости использования корпусов с высоким вакуумом. Перечисленные особенности позволяют открыть новые области применения рентгеновских источников, что подчёркивает актуальность проведения исследований в данной области.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование особенностей процесса генерации рентгеновского излучения, образующегося вследствие реализации пирозлектрического эффекта, в том числе при наличии дополнительных ионизирующих структур. Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- разработать и изготовить экспериментальную установку для исследования процессов генерации рентгеновского излучения и электрического тока при реализации пирозлектрического эффекта;
- провести измерения пространственного распределения эмиссии рентгеновского излучения с различных областей полярной поверхности пирозлектрика, в том числе в зависимости от ориентации полярных осей при индукции положительной полярности заряда на полярной поверхности;
- исследовать зависимость характеристик генерируемого рентгеновского излучения и электрического тока от скорости изменения температуры пирозлектрика;
- экспериментально исследовать влияние пространственной ориентации массива углеродных нанотрубок, расположенных на поверхности пирозлектрика, на характеристики генерируемого рентгеновского излучения.

Научная новизна полученных результатов

- Показано, что центральная часть полярной поверхности пьезоэлектрика-монокристалла вносит преобладающий вклад в эмиссию рентгеновского излучения, генерируемого при пьезоэлектрическом эффекте в случае, если полярная поверхность пьезоэлектрика заряжена положительно.
- Показано, что ориентация механической X-оси и пьезоэлектрической Y-полярной оси пьезоэлектрического монокристалла оказывает влияние на распределение эмиссии рентгеновского излучения, генерируемого при пьезоэлектрическом эффекте, в случае если полярная поверхность пьезоэлектрика заряжена положительно.
- Показано, что существует оптимальный диапазон скоростей изменения температуры монокристалла танталата лития, в котором эффект генерации рентгеновского излучения проявляется наиболее ярко.
- Показано, что размещение массива углеродных нанотрубок на полярной поверхности пьезоэлектрика позволяет увеличить выход рентгеновского излучения при отсутствии преимущественной ориентации у массива.
- Показано, что диапазон давления остаточного газа, при котором проявляется эффект генерации рентгеновского излучения при пьезоэлектрическом эффекте, существенно сужается при размещении массива углеродных нанотрубок на полярной поверхности пьезоэлектрика.

Научная и практическая значимость полученных результатов

Научная значимость работы определяется новыми результатами, которые расширили существовавшие к началу исследований знания о пьезоэлектричестве, в частности, о формировании высокого электрического потенциала и генерации рентгеновского излучения пьезоэлектриками в зависимости от скорости изменения температуры и ориентации осей пьезоэлектрических монокристаллов.

Практическая значимость полученных результатов определяется тем, что полученные результаты указывают на возможность реализации новых, ранее неизвестных подходов к увеличению выхода и повышению управляемости процесса генерации рентгеновского излучения, инициируемого пироэлектрическим эффектом. Тем самым, настоящая работа вносит значительный вклад в разработку компактных, управляемых источников рентгеновского излучения с повышенным уровнем безопасности использования, расширяющих сферу применения рентгеновских источников в самых различных областях человеческой деятельности.

Методы исследования

Исследование спектров рентгеновского излучения проводилось на основе апробированных методов экспериментальной ядерной физики. В частности, использовались сертифицированные и калиброванные полупроводниковые рентгеновские спектрометры для измерения спектров рентгеновского излучения, пикоамперметр для измерения электрического тока генерируемых пироэлектриком заряженных частиц, термопары для контроля температуры пироэлектриков, а также высоковакуумная техника для обеспечения и контроля вакуума в экспериментальной установке.

Достоверность полученных результатов

Достоверность экспериментально полученных результатов подтверждают малая величина статистической ошибки полученных данных, воспроизводимость результатов, использование откалиброванного сертифицированного оборудования, а также воспроизведение известных опубликованных результатов, полученных другими авторами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Центральная часть полярной поверхности монокристалла ниобата лития вносит преобладающий вклад в эмиссию рентгеновского излучения, генерируемого при пироэлектрическом эффекте, в случае если полярная поверхность пироэлектрика заряжена положительно.

2. Существует оптимальный диапазон скоростей изменения температуры монокристалла танталата лития, в котором интенсивность генерации рентгеновского излучения имеет максимум.

3. Наличие массива углеродных нанотрубок на полярной поверхности монокристалла танталата лития позволяет увеличить выход рентгеновского излучения.

Апробация полученных результатов

Материалы диссертации докладывались на 11 международных конференциях.

- Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Россия, г. Москва, МГУ), 2014, 2015, 2016, 2017.
- Курчатовская молодежная научная школа (Россия, г. Москва, НИЦ «Курчатовский институт»), 2014.
- XIX международная конференция молодых ученых и специалистов (Россия, г. Дубна), 2015.
- Международная школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния (Россия, г. Санкт-Петербург), 2015, 2017.
- International Symposium “Radiation from relativistic electrons in periodic structures” (RREPS), (Россия, г. Санкт-Петербург, 2015), (Германия, г. Гамбург, 2017).
- 8th International conference on “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena — Channeling 2018”, 2018 (Италия, о. Искья).

Соискателем опубликовано 13 статей [A1-A13] в журналах, рекомендованных ВАК для представления результатов диссертационных исследований.

Личный вклад автора

Соискатель внёс основной вклад во все этапы работы: разработка экспериментальных установок, на которых были получены экспериментальные результаты диссертационного исследования, постановка и проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных. Оформлению публикаций предшествовали коллективные обсуждения, тексты публикаций написаны в основном соискателем.

Связь работы с научными программами

Соискатель являлся исполнителем следующих проектов по тематике диссертационного исследования:

1. федеральная целевая программа, проект № 14.578.21.0192;
2. государственное задание № 3.2009.2014/К и № 3.1631.2017/ПЧ;
3. грант Российского Научного Фонда, проект № 16-19-10535.
4. грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук МД-5748.2018.2

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и используемых сокращений. Объем диссертации – 108 страниц, включая 49 рисунков и 4 таблицы. Список литературы состоит из 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований генерации рентгеновского излучения и электрического тока при реализации пирозлектрического эффекта в монокристаллах ниобата лития и танталата лития.

Во введении обоснована актуальность решаемой задачи; приводится краткий обзор научной литературы по изучаемой проблеме; сформулирована цель и задачи исследований, обоснована научная новизна и практическая

значимость полученных в работе результатов; приведены основные положения, выносимые на защиту; даны сведения о публикациях.

В первой главе диссертации представлены результаты исследования пространственного распределения эмиссии рентгеновского излучения с полярной поверхности ниобата лития при положительной полярности заряда, индуцируемого на поверхности при пирозлектрическом эффекте. В работе проводятся измерения спектров рентгеновского излучения с различных областей поверхности монокристалла при заданном режиме изменения температуры пирозлектрика. Перемещение пирозлектрика в параллельной мишени плоскости позволило сканировать поверхность пирозлектрического образца с регистрацией сопутствующей эмиссии рентгеновского излучения и изменения температуры. Общая схема эксперимента представлена на Рисунке1.

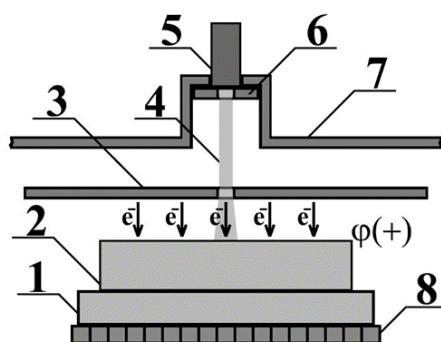


Рисунок 1 – Общая схема эксперимента. 1 – радиатор, 2 – пирозлектрик (ниобат лития), 3 – мишень-коллиматор, 4 – поток рентгеновских фотонов, 5 – детектор рентгеновского излучения, 6 – дополнительный коллиматор, 7 – стенка вакуумной камеры, 8 – элемент Пельтье.

Исследования выполнены при давлении остаточного газа 1 ± 0.2 мТорр, циклическое изменение температуры пирозлектрического образца проводилось в диапазоне 25–50 °С. Измерения проводились с монокристаллами ниобата лития, имеющими форму параллелепипеда с размерами 11(х)×8(у)×10(з) мм и форму цилиндра диаметром 10 мм при высоте 11 мм. В процессе измерений с использованием образца с формой

параллелепипеда учитывалась ориентация пьезоэлектрической и механической полярных осей.

Распределение эмиссии рентгеновского излучения с Z^+ -поверхности для образца цилиндрической формы при его нагреве представлена на Рисунке 2. Аналогичная картина для Z^- -поверхности для образца формы параллелепипеда при его охлаждении представлена на Рисунке 3. Показано, что независимо от геометрической формы образца и ориентации полярной Z -оси образца, максимум эмиссии рентгеновского излучения (до 45% от общего количества зарегистрированных квантов) приходится на центральную часть поверхности образца диаметром не более 3 мм. Также можно отметить, что в первые 45 секунд эмиссия с центра образца (область 4 на Рисунке 2 и область на пересечении двух осей на Рисунке 3) не является столь превалирующей. С продолжением термического воздействия центральная область становится основным источником рентгеновского излучения.

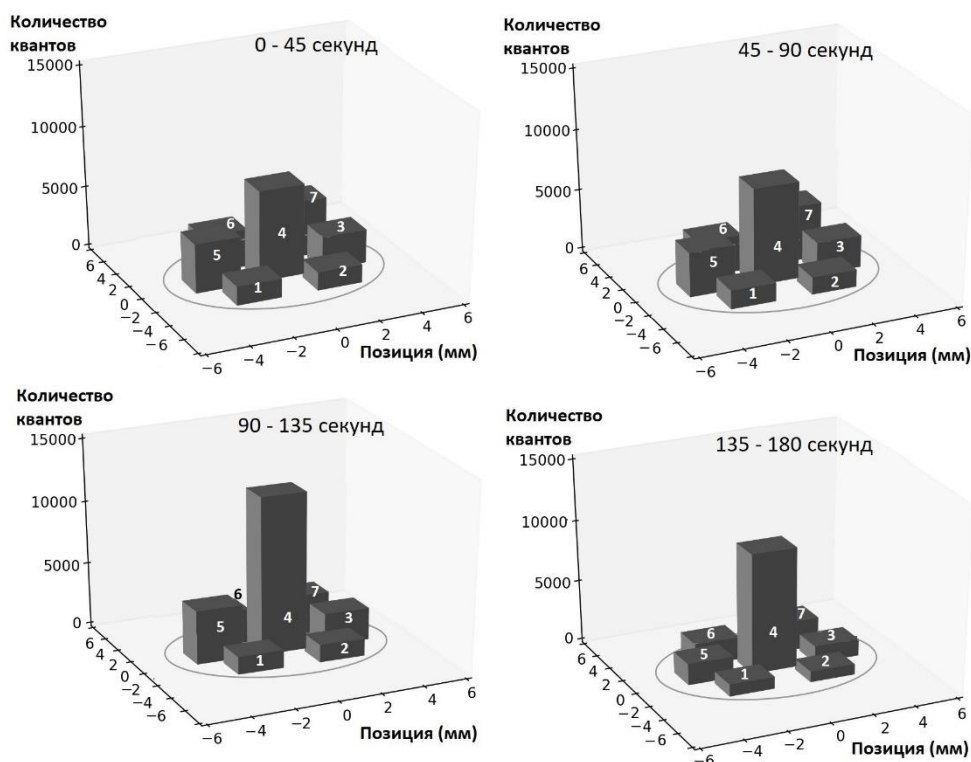


Рисунок 2 – Динамика распределения эмиссии рентгеновского излучения с Z^+ поверхности ниобата лития цилиндрической формы. Номерами указаны области на полярной поверхности пьезоэлектрика, с

которых измерялся сигнал. Положение (0,0) соответствует центру поверхности. Линия (окружность) соответствует границе поверхности пьезоэлектрика.

На периферии поверхности кристалла интенсивность излучения значительно меньше, при этом проявляется анизотропия эмиссии излучения, которая коррелирует с ориентацией полярных осей в случае использования пьезоэлектрика формы параллелепипеда, как показано на Рисунке 3. Отрицательные стороны (относительно центра поверхности) механической и пьезоэлектрической осей вносят определяющий вклад в эмиссию рентгеновских фотонов по сравнению с положительными сторонами в среднем на 70-75%.

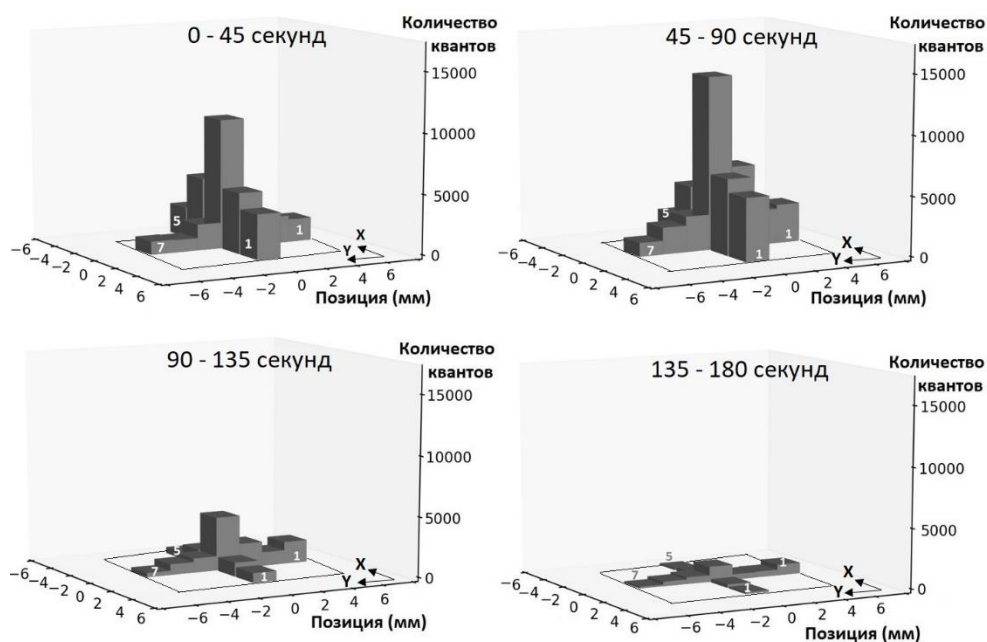


Рисунок 3 – Динамика пространственного распределения эмиссии рентгеновского излучения с Z-поверхности образца ниобата лития формы параллелепипеда при его нагреве. Стрелками указаны направления механической (X) и пьезоэлектрической (Y) осей. Контуром на основании показана граница поверхности пьезоэлектрика.

Динамика эмиссии рентгеновского излучения с полярной поверхности монокристалла ниобата лития представляет собой достаточно сложную

картину. Максимумы эмиссии наблюдается в определенной пространственной последовательности. Для образца формы параллелепипеда, максимум эмиссии последовательно наблюдается сначала для точек, находящихся на положительных сторонах осей, затем для центра, а затем на отрицательных сторонах осей (см. Рисунок 4).

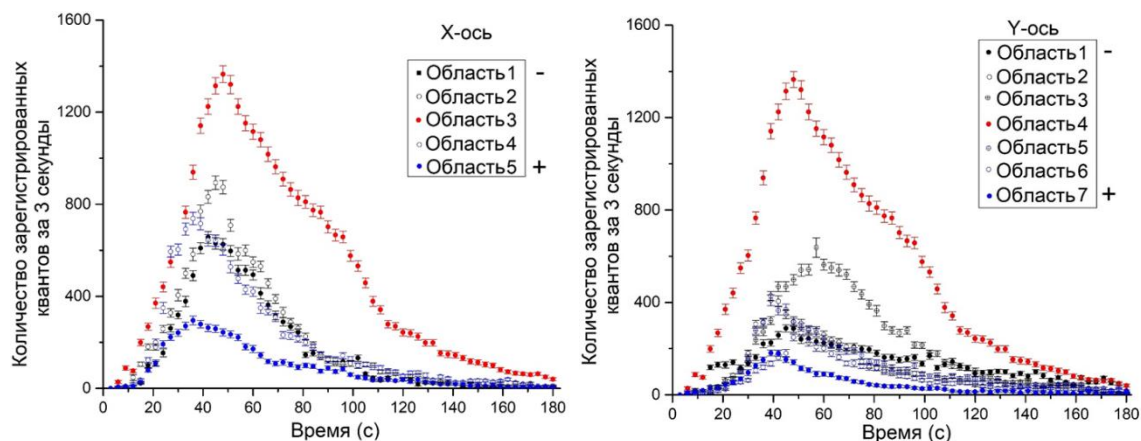


Рисунок 4. Динамика эмиссии рентгеновского излучения с измеряемых областей вдоль механической оси (слева) и пьезоэлектрической оси (справа) на Z^+ -поверхности ниобата лития. Знаками «+» и «-» указаны положительные и отрицательные ветви осей на крайних точках.

Подобные постоянные последовательности являются свидетельством неравномерной пространственно-временной структуры индукции заряда на поверхности при пьезоэлектрическом эффекте или миграции заряда по полярной поверхности.

Во второй главе диссертации представлены результаты экспериментального исследования зависимостей свойств генерируемого рентгеновского излучения и электрического тока на полярной поверхности образцов танталата лития от скорости изменения температуры пьезоэлектрика. Измерение электрического тока и выхода рентгеновского излучения проводилось в отдельных экспериментах, но при одинаковых внешних условиях (размеры пьезоэлектрического образца, тип используемого элемента Пельтье), что позволяет сделать сопоставление полученных результатов при измерении тока и спектра рентгеновского излучения. Схемы измерения

спектра рентгеновского излучения и электрического тока представлены на Рисунке 5.

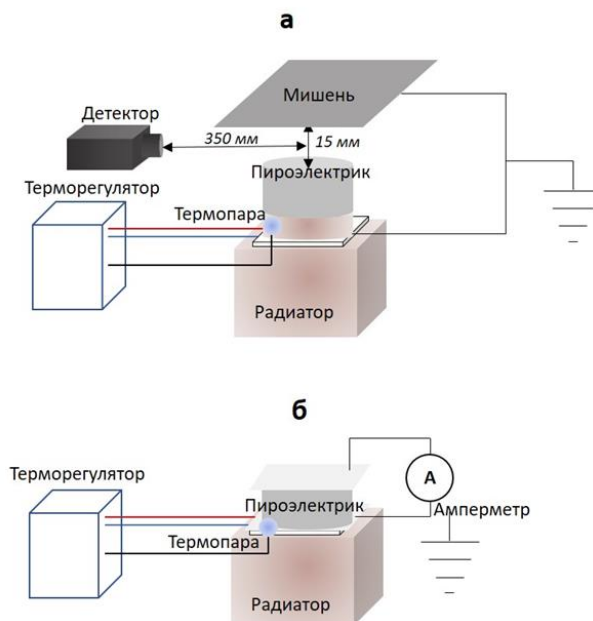


Рисунок 5 – Схемы измерения спектра рентгеновского излучения (а) и электрического тока (б).

Диапазоны скоростей изменения температуры пирозлектрика были 2 – 22 °С/мин и 2 – 10 °С/мин при нагреве и охлаждении соответственно. Изменение скорости в различных экспериментах происходило с шагом 2 °С/мин. На Рисунке 6 представлены основные типы полученных зависимостей электрического тока, генерируемого пирозлектрическими образцами цилиндрической формы и формы параллелепипеда. На представленных зависимостях можно отметить следующие интересные особенности:

- рост тока до $t \approx 50-60$ с, при этом, величина генерируемого тока коррелирует со значением скорости изменения температуры;
- падение величины тока при $t > 50-60$ с, сопровождающееся осцилляциями величины тока при скорости изменения температуры 2 °С/мин и замедление падения уровня генерируемого тока при более высоких значениях скорости изменения температуры;
- учитывая, что диапазон изменения температуры был приблизительно одинаковым (отклонение не более 10%), можно отметить сохранение

суммарного заряда, сгенерированного пироэлектрическим образцом, т.е. временной интеграл тока сохраняется и незначительно зависит от скорости изменения температуры в рассматриваемом диапазоне изменений температуры пироэлектрика.

Таким образом, характер поведения генерируемого тока зависит от величины скорости изменения температуры, что делает важным исследование зависимостей характеристик генерируемого рентгеновского излучения от скорости изменения температуры кристалла. Также остаются открытыми вопросы механизмов резкого увеличения продолжительности стадии насыщения генерируемого тока и зависимости динамики генерации тока при более широком диапазоне изменения температуры пироэлектрика.

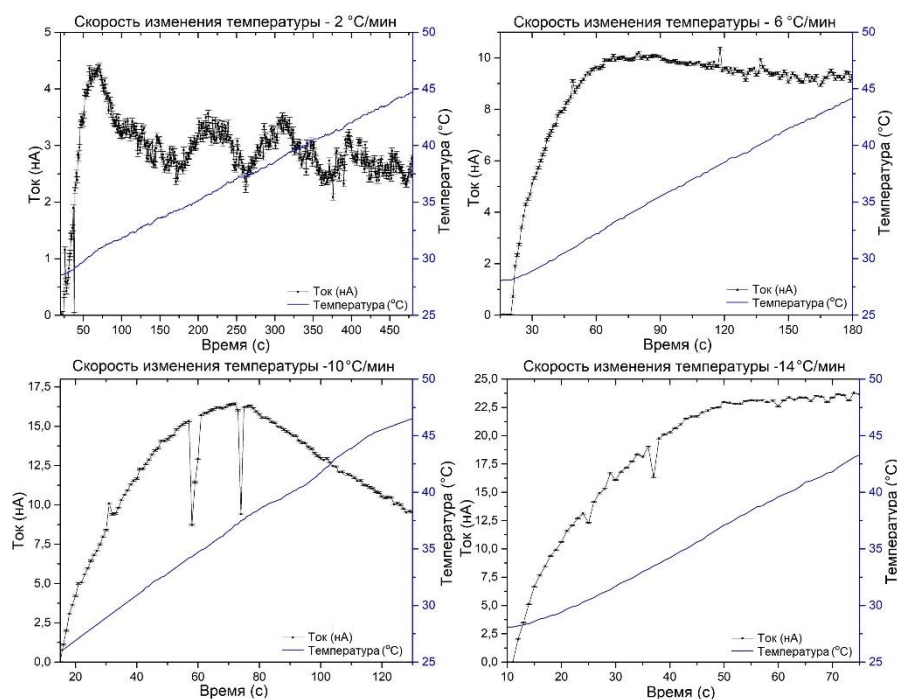


Рисунок 6. – Кривые электрического тока и показания термопары, полученные при нагреве образца танталата лития с различной скоростью.

Значение скорости указано над каждым графиком.

Результаты измерения количества зарегистрированных фотонов рентгеновского излучения при нагреве и охлаждении образца танталата лития цилиндрической формы представлены на Рисунке 7. Представленные результаты демонстрируют наличие максимумов выхода рентгеновского

излучения как при нагреве (положительная полярность заряда), так и при охлаждении (отрицательная полярность заряда) пирозлектрического образца, причем эти максимумы близки по величине и положению (около 7 °С/мин).

При сопоставлении с результатами измерения тока, представленными на Рисунке 6, можно отметить, что максимумы соответствуют режиму изменения температуры, при котором наблюдается продолжительная генерация тока с насыщением. Таким образом показано, что существует оптимальный диапазон скоростей изменения температуры монокристалла танталата лития, в котором эффект генерации рентгеновского излучения проявляется наиболее ярко.

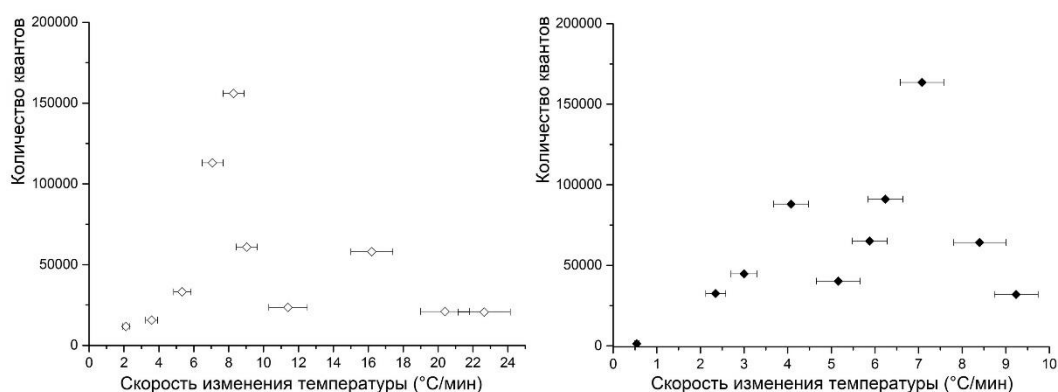


Рисунок 7. – Зависимость количества квантов, зарегистрированных за время измерения от скорости изменения температуры образца. Слева представлен случай нагрева образца, справа охлаждения.

В третьей главе диссертации представлены результаты исследования выхода рентгеновского излучения при размещении массива углеродных нанотрубок (УНТ) на полярной поверхности образца танталата лития. Массив углеродных нанотрубок был выращен на подложке из кремния, покрытого тонким слоем алюминия. Образцы были изготовлены в Институте нанотехнологий и микроэлектроники РАН. Были исследованы влияние ориентации массива УНТ на эффект генерации рентгеновского излучения, зависимость выхода излучения от давления остаточного газа в выбранной конфигурации источника, а также динамика выхода рентгеновского излучения и тока эмиссии в ходе термического цикла пирозлектрика.

Кремниевые подложки с массивом УНТ располагались по центру полярной поверхности пироэлектрика и крепились с помощью электропроводящего эпоксидного клея, предназначенного для использования в глубоком вакууме. В исследованиях использовались два типа массивов углеродных нанотрубок, которые отличались друг от друга ориентацией жгутов в отдельном массиве: случайно ориентированные УНТ и вертикально ориентированные УНТ. У случайно ориентированных УНТ концы отдельных жгутов в массиве распределены во все стороны достаточно равномерно, при этом высота жгутов не превышает 2 мкм. В вертикально ориентированных УНТ концы всех жгутов сонаправлены, отклонение ориентации от вертикали не превышает 30° , высота жгутов 4-5 мкм.

Было проведено сравнение трех конфигураций сборок: пироэлектрик с массивом случайно ориентированных УНТ, пироэлектрик с массивом вертикально ориентированных УНТ и пироэлектрик без каких-либо дополнительных структур. Все три случая испытывались при максимально идентичных условиях. Давление остаточного газа составляло 1 ± 0.2 мТорр. Пироэлектрик (монокристалл танталата лития цилиндрической формы) нагревался и охлаждался в диапазоне от 20°C до 55°C со скоростью около $10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Испытания проводились при размещении подложек и индукции заряда на Z^- -поверхности и заземлении Z^+ -поверхности пироэлектрика. В качестве мишени использовалась пластина из нержавеющей стали с размерами поверхности 30×50 мм при толщине 800 мкм, мишень располагалась на расстоянии 15 мм от полярной поверхности пироэлектрика. Схема измерения спектров рентгеновского излучения представлена на Рисунке 8.

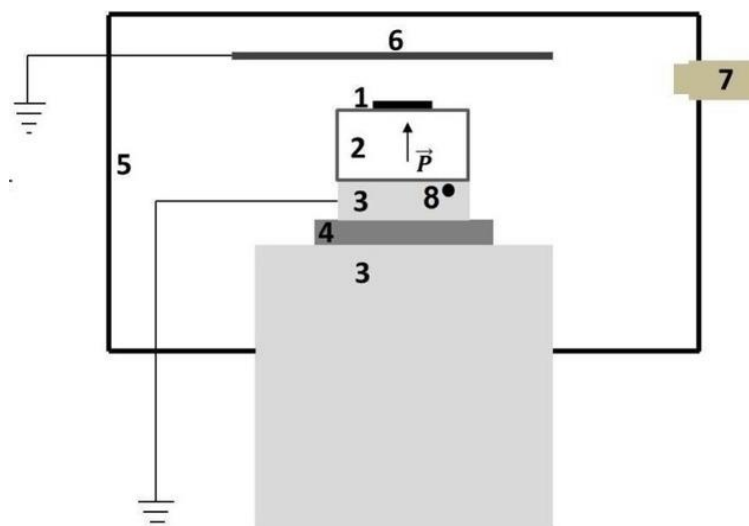


Рисунок 8 - Схема измерения спектров рентгеновского излучения. 1 - кремниевая подложка с массивом УНТ, 2 – монокристалл танталата лития, 3 - радиатор, 4 - элемент Пельтье, 5 - стенка вакуумной камеры, 6 - мишень, 7 - детектор рентгеновского излучения, 8 - термопара К-типа. Направление вектора поляризации пироэлектрика показано стрелкой.

В таблице 1 представлено среднее значение количества зарегистрированных фотонов для каждой конфигурации в зависимости от полярности индуцируемого заряда. В таблице 2 представлены результаты для граничной энергии спектра излучения.

Таблица 1. Количество зарегистрированных квантов при различных конфигурациях пироэлектрического источника

	Пироэлектрик без УНТ	Пироэлектрик с массивом случайно ориентированных УНТ	Пироэлектрик с массивом вертикально ориентированных УНТ
Положительная полярность (нагрев)	$1.43 \times 10^5 \pm 0.2 \times 10^5$	$3.79 \times 10^5 \pm 0.76 \times 10^5$	$1.8 \times 10^5 \pm 0.48 \times 10^5$
Отрицательная полярность (охлаждение)	$1.12 \times 10^5 \pm 0.2 \times 10^5$	$2.05 \times 10^5 \pm 0.61 \times 10^5$	$1.5 \times 10^4 \pm 0.3 \times 10^4$

Таблица 2. Граничная энергия спектра (в кэВ) рентгеновского излучения при различных конфигурациях пироэлектрического источника

	Пироэлектрик без УНТ	Пироэлектрик с массивом случайно ориентированных УНТ	Пироэлектрик с массивом вертикально ориентированных УНТ
Положительная полярность (нагрев)	50±0.7	62±2.3	35±1.3
Отрицательная полярность (охлаждение)	51±0.9	67±1.0	22±0.5

Из приведенных результатов можно отметить, что применение массива со случайно ориентированными УНТ приводит к увеличению выхода рентгеновского излучения как в случае положительной полярности (в 2,6 раза), так и в случае отрицательной полярности (в 1,8 раза) по сравнению со случаем стандартной конфигурации. Граничная энергия спектра рентгеновского излучения также увеличивается (на 24% и 31% соответственно). В то же время применение массива с вертикально ориентированными УНТ приводит к ослаблению эффекта генерации рентгеновского излучения, хотя выход излучения увеличивается на 25% по сравнению со случаем стандартной конфигурации без нанотрубок (но только в случае положительной полярности заряда). Также, при вертикальной ориентации нанотрубок граничная энергия спектра уменьшается в 1.5–2 раза, а выход рентгеновского излучения в случае отрицательной полярности уменьшается почти в 10 раз.

Таким образом, размещение массива углеродных нанотрубок способно привести к усилению эффекта генерации рентгеновского излучения при пироэлектрическом эффекте, однако определяющим фактором является ориентация жгутов в массиве. Несмотря на то, что строго вертикальная ориентация нанотрубок в массиве считается оптимальной для усиления электрического поля [9], по всей видимости, это свойство способствует распространению электрических пробоев и слишком интенсивной эмиссии

электронов в электрическом поле с напряженностью, недостаточной для ускорения электронов до энергии, необходимой для генерации рентгеновского излучения. Отсутствие преимущественной ориентации в свою очередь способствует более изотропному усилению электрического поля с меньшим коэффициентом усиления [9]. По всей видимости, такой путь усиления электрического поля является более подходящим для усиления эффекта генерации рентгеновского усиления.

Для определения границ эффективности использования нанотрубок для увеличения выхода рентгеновского излучения были проведены исследования конфигурации пироэлектрического источника с массивом случайно ориентированных УНТ при различных значениях давления остаточного газа. В каждой измеряемой точке проводилось минимум пять термических циклов в диапазоне от 20 °С до 55 °С со скоростью около 10 °С\мин. Зависимость количества и граничной энергии рентгеновских фотонов от давления остаточного газа при положительной (нагрев) и отрицательной (охлаждение) полярности заряда на поверхности пироэлектрика представлены на Рисунке 9.

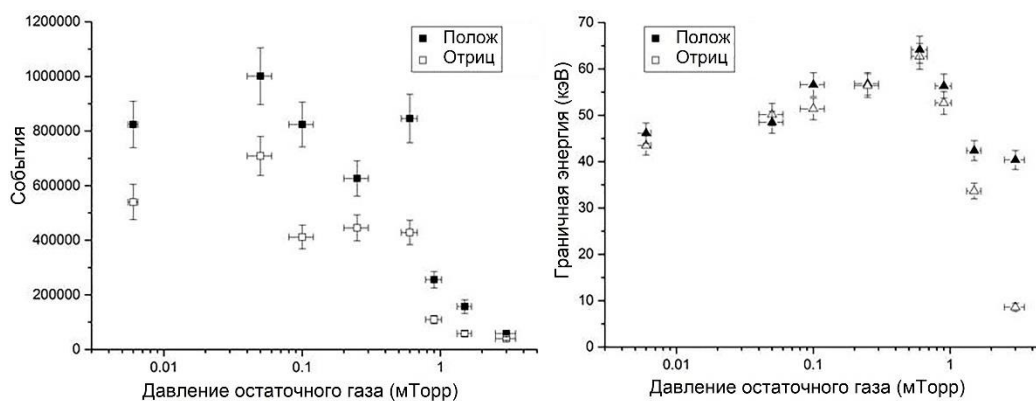


Рисунок 9 – Зависимость количества зарегистрированных квантов (слева) и граничной энергии (справа) спектра рентгеновского излучения в зависимости от давления остаточного газа.

Согласно полученным результатам, усиление эффекта генерации рентгеновского излучения при размещении массива случайно ориентированных УНТ происходит только при давлении менее чем 1 мТорр, а порог давления остаточного газа, при котором наблюдается эффект генерации

уменьшается до уровня 5 мТорр. Такое поведение по всей видимости связано с несколькими причинами. Прежде всего, применение углеродных нанотрубок резко увеличивает общую площадь поверхности, по которой распределяется заряд, генерируемый при пьезоэлектрическом эффекте. При этом величина произведенного заряда при пьезоэлектричестве остается сопоставимой с случаем «чистой» поверхности кристалла. Это приводит к уменьшению плотности заряда, что в свою очередь приводит к снижению величины давления остаточного газа необходимого для экранирования индуцируемого заряда и прекращению эффекта генерации рентгеновского излучения

Другая обнаруженная интересная особенность – снижение граничной энергии излучения с уменьшением давления начиная с 0.75 мТорр. Дело в том, что при давлении начиная с 1 мТорр и ниже более активную роль играет полевая эмиссия с углеродных нанотрубок [10]. С понижением давления, вклад полевой эмиссии становится существеннее, что приводит к увеличению выхода рентгеновского излучения с понижением энергии излучения (так как уменьшается доля заряда, остающегося на поверхности и формирующего электрическое поле).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Можно выделить следующие основные результаты диссертационного исследования:

- Разработана, изготовлена и модернизирована в ходе исследований опытно-экспериментальная установка, позволяющая исследовать процессы генерации рентгеновского излучения и электрического тока при пьезоэлектрическом эффекте с возможностью контроля изменения температуры пьезоэлектрика с заданной скоростью.

- Проведены экспериментальные исследования распределения эмиссии рентгеновского излучения с полярной поверхности пьезоэлектрического монокристалла ниобата лития при индукции на ней положительного заряда. Исследовано распределение эмиссии для образцов формы параллелепипеда и

цилиндра в зависимости от ориентации вектора спонтанной поляризации образца и термического воздействия на образец (нагрев или охлаждение). Показано, что максимум эмиссии рентгеновских фотонов (до 45% от общего количества) приходится на центральную часть поверхности.

- Зафиксированы анизотропия выхода рентгеновского излучения по периферии поверхности и влияние на наблюдаемую анизотропию ориентации полярных пьезоэлектрической и механической осей. Исследована динамика распределения эмиссии рентгеновского излучения на полярной поверхности кристалла. Определена пространственная последовательность проявления максимумов эмиссии рентгеновского излучения с поверхности пьезоэлектрика, на которую также оказывает влияние ориентация полярных пьезоэлектрических и механических осей.

- Показано, что существует оптимальный диапазон скоростей изменения температуры монокристалла танталата лития, в котором эффект генерации рентгеновского излучения проявляется наиболее ярко. Для используемых образцов оптимальный диапазон находится в диапазоне 6–8 °С/мин.

- Исследован процесс генерации электрического тока при пьезоэлектрическом эффекте при нагреве монокристалла танталата лития по линейному закону. Показано, что в диапазоне 6–8 °С/мин (где наблюдается наиболее высокий выход рентгеновского излучения) наблюдается аномально продолжительная генерация пьезоэлектрического тока на высоком уровне в тех же условиях, что и при измерении выхода рентгеновского излучения.

- Экспериментально показано, что важнейшим фактором, определяющим степень усиления выхода рентгеновского излучения при размещении массива углеродных нанотрубок на полярной поверхности пьезоэлектрика, является пространственная ориентация жгутов нанотрубок. Ее отсутствие позволяет увеличить поток рентгеновского излучения и граничную энергию потока. Наличие вертикальной ориентации нанотрубок ослабляет поток генерируемого излучения.

- Экспериментально показано, что диапазон давления остаточного газа, при котором проявляется эффект генерации рентгеновского излучения при пирозлектрическом эффекте существенно сужается при размещении массива углеродных нанотрубок. Излучение фактически полностью пропадает при давлении остаточного газа выше 5 мТорр.

Список цитируемой литературы

1. Бугаев А.С., Ерошкин П.А., Романько В.А. и др. Маломощные рентгеновские трубки (современное состояние) // УФН 183 (2013) 727-740
2. Brownridge J.D. Pyroelectric x-ray generator // Nature 358 (1992) 277-278
3. Geuther J., Danon Y. Electron and positive ion acceleration with pyroelectric crystals // J. Appl. Phys. 97 (2005) 074109-074117
4. Naranjo B., Gimzewski J., Putterman S. Observation of nuclear fusion driven by a pyroelectric crystal // Nature 434 (2005), 1115-1117
5. Brownridge J.D. Electron and positive ion beams and x-rays produced by heated and cooled pyroelectric crystals such as LiNbO_3 and LiTaO_3 in dilute gases: phenomenology and applications // Trends in Electro-Optics Research. (Edited by W. T. Arkin). Nova Science Publishers, Inc (2005) 57-94
6. Fukao S., Nakanishi Y., Guan Y. and et. al. X-rays source using thermal excitation of pyroelectric crystal for medical application // Progress in Electromagnetics Research: Symposium Proceedings, Moscow, Russia (2009) 807-814
7. Rosenman G., Shur D., Krasik Ya.E. and et. al. Electron emission from ferroelectrics // J. Appl. Phys. 88 (2000) 6109 – 6161
8. Neidholdt E.L., Beauchamp J.L. Ionization mechanism of the ambient pressure pyroelectric ion source (APPIS) and its applications to chemical nerve agent detection // J. Amer. Soc. Mass Spectr. 20 (2009) 2093-2099
9. Бочаров Г.С., Книжник А.А., Елецкий А.В. и др. Влияние электрического поля на ориентацию углеродных нанотрубок в процессе их роста и эмиссии // ЖТФ. 82 (2012) 11-117.
10. Saito, Y. Carbon Nanotube and Related Field Emitters: Fundamentals and Applications // Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. (2010).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Oleinik A.N., Shchagin A.V., Miroshnik V.S. and et. al. Ferroelectric ceramics in a pyroelectric accelerator // Appl. Phys. Lett. 107 (2015) 233505-233509;
- A2. Олейник А.Н., Иващук О.О., Кубанкин А.С. и др. Исследование выхода рентгеновского излучения от пьезоэлектрических источников с конусообразными мишенями // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 8 (2016) 80-84;
- A3. Олейник А.Н., Громов М.Б., Иващук О.О. и др. Измерение анизотропии распределения выхода рентгеновского излучения с поверхности пьезоэлектрического кристалла // Краткие сообщения по физике ФИАН. 11 (2016) 3-7;
- A4. Oleinik A.N., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M. and et. al. Pyroelectric deflector of charged particle beam // JINST. 11 (2016) 08007-08014;
- A5. Олейник А.Н., Вохмянина К.А., Иващук О.О. и др. Возможность применения пьезокерамики ЦТС-19 в пьезоэлектрических источниках рентгеновского излучения // Стекло и Керамика. 11 (2016) 27-31;
- A6. Oleinik A.N., Chepurinov A.S., Ionidi V.Y., and et. al. Pyroelectric neutron generator for calibration of neutrino and dark matter detectors // Journal of Physics: Conference Series. 675 (2016) 032031;
- A7. Oleinik A.N., Chepurinov A.S., Ionidi V.Y., and et. al. Development of pyroelectric neutron source for calibration of neutrino and dark matter detectors // Journal of Physics: Conference Series. 798 (2017) 012119.
- A8. Oleinik A.N., Chepurinov A.S., Ivashchuk O.O. and et. al. Carbon nanotubes in pyroelectric X-ray source // JINST. 12 (2017) 11002-11010;
- A9. Oleinik A.N., Kubankin A.S., Chepurinov A.S. and et. al. Optimal speed of temperature changes of a crystal in a pyroelectric X-ray radiation source // AIP Advances. 8 (2018) 035207-035213;
- A10. Oleinik A.N., Ivashchuk O.O., Klenin A.A. and et. al. Influence of mechanical treatment of the Z-surface of lithium niobate on the properties of X-ray pyroelectric source // Journal of Nano- and Electronic Physics. 10 (2018) 06014;
- A11. Олейник А.Н., Щагин А.В., Волков В.И. и др. Свойства керамического пьезоэлектрического генератора рентгеновского излучения в зависимости от давления остаточного газа // Письма в Журнал технической физики 44 (2018) 18;
- A12. Oleinik A.N., Ivashchuk O.O., Shchagin A.V. and et. al. Piezoelectric Accelerator // Scientific Reports. 8 (2018) 816488;

A13. Олейник А.Н., Громов М.Б., Кубанкин А.С. и др. Численное моделирование анизотропии излучения пьезоэлектрического генератора нейтронов // Вестник Московского университета. 2 (2019) 50.