

Динамика пирозффекта в ниобате лития

Л.Н. Орликов*, С.М. Шандаров, К.М. Мамбетова, А.И. Аксенов, Н.И. Буримов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия
*oln4@yandex.ru

Аннотация: Исследована динамика генерации пирозлектрика из ниобата лития при атмосферном давлении и в вакууме 0.01 Па. Кристаллы диаметром 13 мм и толщиной 7 мм были электрически соединены параллельно или последовательно. Расстояние от кристалла до анода составляло 0.5–4 мм. Анод подключался к осциллографу АКIP 4119/3. Скорость нагрева составляла 8 К/мин. Осциллограмма первого периода, когда кристалл нагревается, представляет собой растущую синусоиду с амплитудой около 400 мА и длительностью около 2.5 нс. При давлении ниже атмосферного (20 кПа – 10 Па) генерация импульсов прекращалась, вероятно, из-за возникновения тлеющего разряда между кристаллом и анодом. Компьютерная обработка показывает, что энергия отдельных импульсов может отличаться более чем на порядок. Подключение медного анода к катоду вакуумного датчика РМ1-2 показывает, что в течение одного цикла нагрева и охлаждения степень потемнения рентгеновской пленки, полученной от стоматологов, совпадает с пленкой, расположенной на датчике.

Ключевые слова: пирозлектрический эффект, ниобат лития, генерация электронов, осциллограмма.

1. Введение

Пирозлектрический эффект успешно используется для генерации потоков заряженных частиц, рентгеновского излучения и нейтронов [1–3]. Однако малая интенсивность излучения сдерживает практическое применение пирозлектрических генераторов. В источнике [4] показана возможность объединения кристаллов для повышения интенсивности генерации излучения. Устройство для регистрации динамики пирозлектрической генерации импульсных электронных пучков в циклах нагрева и охлаждения кристалла ниобата лития предложено в источнике [5].

Целью данной работы является исследование динамики пирозлектрической генерации электронных потоков из кристаллов ниобата лития для выявления условий максимальной пирозлектрической генерации.

2. Экспериментальные исследования

На Рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Кристаллы ниобата лития цилиндрической формы диаметром 13 мм и толщиной 7 мм с ориентацией по полярной оси Z в количестве до семи штук устанавливались на резистивном нагревателе, управляемом программатором РПН-5М.

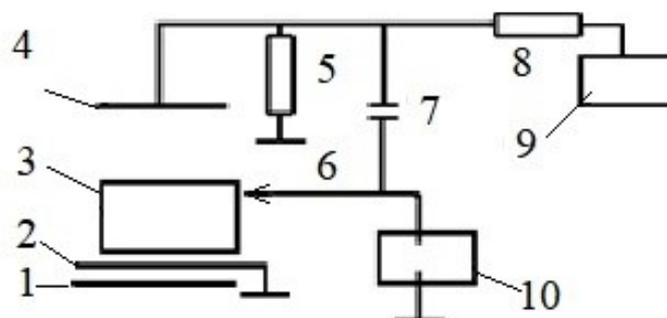


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – нагреватель; 2 – металлокерамическая пластина; 3 – кристалл; 4 – анод; 5, 8 – измерительный и согласующий резисторы; 6 – зонд; 7 – разделительная емкость; 9 – осциллограф, 10 – киловольтметр.

Кристаллы прогревались до 100 °С со скоростью до 8 К/мин. Охлаждение кристаллов осуществлялось естественным образом.

Анод в виде медного диска устанавливался на расстоянии h равном 0,5–4 мм от кристалла и соединялся с осциллографом АКИП 4119/3 через измерительный (1,5 Ом) и согласующий (50 Ом) резисторы. Осциллограф сохраняет осциллограмму в формате BMP и CSV, что позволяет проводить компьютерную оценку относительной энергии импульса по площади под кривой первого полупериода осциллограммы, с помощью специально написанной программы.

С целью выяснения приоритетной области пробоя с кристалла на анод, проводилось зондирование поверхности кристаллов электростатическим киловольтметром С 50-1 с зондом в виде иглы, сканирующей поверхности кристаллов.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Нагрев кристалла

При температуре выше 32 °С наблюдается рост потенциала поверхности кристалла (2,5 кВ при 45 °С). При температурах более 60 °С наблюдаются скачки потенциала на ± 500 В, что объясняется переполяризацией доменов кристалла. Импульсы генерации при температуре нагрева более 100 °С не появляются, что объясняется нарастанием электролитных процессов в кристалле. На Рис. 2 представлена осциллограмма тока разряда при нагреве кристалла при атмосферном давлении со скоростью 8 К/мин для расстояния между анодом и кристаллом $h = 2$ мм.

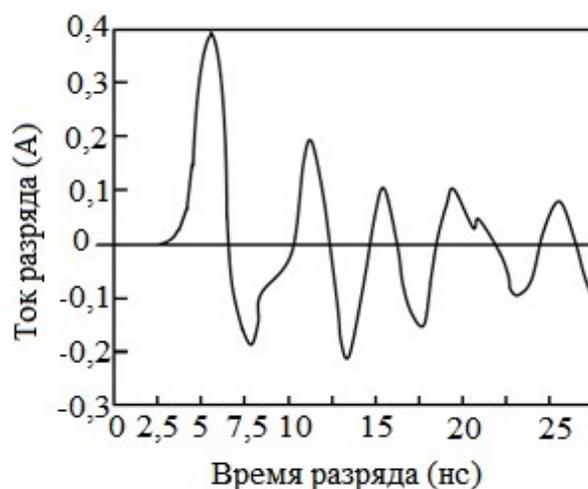


Рис. 2. Осциллограмма тока разряда с одиночного кристалла при атмосферном давлении.

Ток разряда регистрируется не сразу. В отличие от металлов, ток по диэлектрику течет дискретно, по мере накопления заряда. Зондирование поверхности кристалла с помощью осциллографа показало, что пробой всегда возникает с ребра торцевой поверхности кристалла, где наибольшая напряженность электрического поля.

3.2. Предпробойные явления

Электрическое поле между кристаллом и анодом вызывает ионизацию молекул остаточного газа и газа, выделяющегося при нагреве кристалла. Отдельные молекулы ионизируются в электрическом поле. Возникает размножающийся поток электронов (стример). Начинается развитие электронной лавины. Голова лавины начинает играть роль виртуального электрода. Вследствие движения лавины расстояние от анода до виртуального

электрода уменьшается. Это ведет к усилению напряженности электрического поля между головной лавины и анодом. Скорость электронов в головной части лавины становится выше рассчитанной из кинетической энергии. Высокоскоростные (убегающие электроны) покидают область стримера, что создает область положительного пространственного заряда плазмы между кристаллом и анодом.

Форма импульса тока с анода несет в себе информацию о характере формирования и протекании процесса. Крутизна фронта нарастания импульса определяется скоростью электронов и зависит от коэффициента ударной ионизации α , который больше единицы. Фронт нарастания может быть затянутым из-за разброса начальных скоростей частиц. Разные времена начала роста осциллограмм обусловлены разным расположением места зоны эмиссии. Явления, предшествующие пробоя, наиболее эффективны для генерации рентгеновского излучения. В этом случае ускоряющее напряжение и количество электронов в лавине достигают максимальных значений при отсутствии полного замыкания ускоряющего промежутка плазмой.

3.3. Процессы на аноде

После пробоя запас частиц будет исчерпан. Ток разряда начнет спадать и прерываться. Задний фронт спада импульса может быть более пологий, чем передний и обусловлен наличием остаточной плазмы в разрядном промежутке.

Процессы после прилета стримера на анод следующие: а) часть электронов попадает на анод и через резисторы замыкается на заземленную часть кристалла; б) возникает рентгеновское излучение; в) часть электронов отражается от анода, причем коэффициент отражения зависит от материала анода (возникает вторичная электронная эмиссия); г) ударная ионизация и отраженные электроны создают плазму (электроны и ионы) [6]. В итоге с анода в направлении области положительного пространственного заряда плазмы, образованного убегающими электронами, формируется «обратный» стример в направлении кристалла, и ток начинает течь в обратном направлении, т.е. от анода к кристаллу. Электронное облучение кристалла способствует дополнительной приповерхностной десорбции газа и стимулирует формирование нового стримера. По мере потерь энергии на ионизационные процессы формируется несколько циклов колебаний тока разряда.

3.4. Охлаждение кристалла

При охлаждении кристалла изменение температуры более интенсивное, чем при нагреве и возрастает вероятность генерации более интенсивного сигнала, чем при нагреве.

При охлаждении возникают внутренние напряжения в кристалле и сильное электрическое поле. Наличие электрического поля в материале вызывает появление, так называемых, «возбужденных электронов» в зоне проводимости и их ускоренное хаотичное движение с резким изменением направления движения [6]. Электронная температура таких электронов выше температуры кристаллической решетки, и они могут преодолевать потенциальный барьер и приводить к заряду поверхности кристалла.

При уменьшении температуры атомы газа начинают сорбироваться на поверхности, частично ионизоваться и способствовать формированию электронной лавины.

Направление тока разряда при остывании кристалла, как показывают осциллограммы, меняется на противоположное, по сравнению с нагревом. Это объясняется характером движения возбужденных электронов при переходе системы из нагретого состояния в холодное.

Статистика показывает, что при естественном охлаждении частота генераций меньше, чем при нагреве, но интенсивность отдельных сигналов может быть больше в 1.5–2 раза.

3.5. Механизм разряда между кристаллом и анодом при нагреве и охлаждении кристаллов

Основными характеристиками разряда являются напряженность электрического поля E и плотность тока J [6]. Автоэлектронной эмиссии соответствует $E > 10^5$ В/см, $J > 10^8$ А/см²

Нормальному тлеющему разряду соответствует плотность тока $J < 200$ мА/см².

При $J > 200$ мА/см² тлеющий разряд переходит в дуговой с характерным катодным пятном. Барьерный разряд – это разряд, при котором хотя бы один электрод покрыт изолятором.

В нестационарном случае тлеющий разряд переходит в искровой разряд, для которого свойственны большие напряжения и малые токи. Искровой разряд – это нестационарная форма электрического разряда, происходящая в газах, при которой мощность источника энергии недостаточна для поддержания стационарных ионизационных процессов в разряде.

Из анализа видов разряда можно предположить, что при пироэффекте реализуется искровой барьерный разряд.

3.6. Пироэффект при пониженном давлении

Пониженное давление способствует увеличению пробега и энергии электронов, что может сопровождаться повышением эффективности генерации рентгеновского излучения. На Рис. 3 представлена зависимость числа пробоев от давления в форвакуумном диапазоне давлений для различных расстояний h (мм) от анода до кристалла.

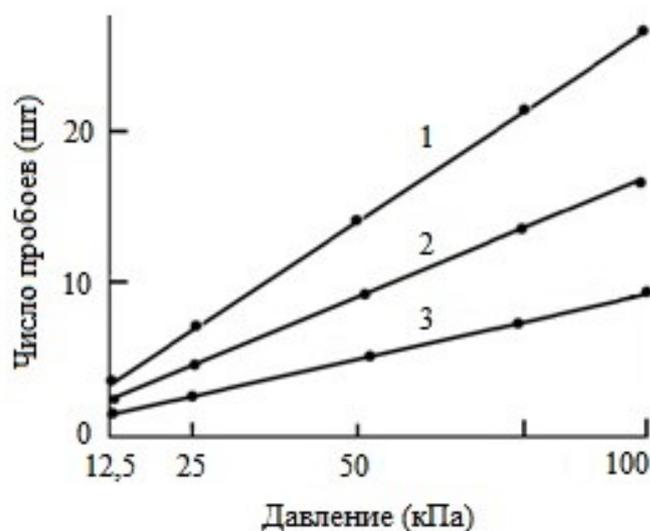


Рис. 3. Зависимость числа пробоев от расстояния между катодом и анодом; h : 1 – 0,5 мм; 2 – 2 мм; 3 – 4 мм.

В области давлений 10 кПа – 133 Па импульсная генерация не наблюдается. Вероятно, это связано с возникновением тлеющего разряда, который шунтирует напряжение между кристаллом и анодом. Сигналы неустойчивой генерации начинают появляться в области давлений менее 133 Па. Устойчивая генерация начинается с давления 1 Па и продолжают вплоть до высокого вакуума (0,01 Па). Однако, число генераций в высоком вакууме меньше и их интенсивность примерно в два раза меньше. Такое поведение пироэлектрической генерации объясняется зависимостью напряжения зажигания разряда от произведения давления на расстояние между электродами (закон Пашена). Можно предположить, что при уменьшении давления менее 1 Па, согласно закону Пашена, прекращаются условия существования тлеющего разряда и уменьшается вклад тлеющего разряда в пироэффект. Импульсный напуск газа подтверждает это предположение.

3.7. Повышение энергоклада при соединении кристаллов

В нашем случае под энергокладом понимается произведение относительного напряжения, тока, времени и числа генераций импульсов.

Идея повысить энергоклад заключается в параллельном или последовательном соединении кристаллов. Идеология параллельного соединения кристаллов основана на том, что сигналы появляются случайно, но включены в одну точку на аноде. Это позволяет увеличить число сигналов за цикл нагрева и охлаждения кристаллов. При параллельном соединении брались три кристалла, и над каждым кристаллом помещался свой анод. Сигнал со всех анодов объединялся в один и соединялся с осциллографом.

На Рис. 4 представлена схема параллельного соединения сигналов от кристаллов 1, 2, 3 во времени.

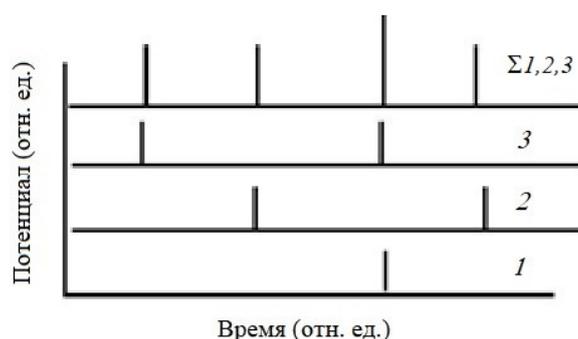


Рис. 4. Схема сложения сигналов при параллельном соединении кристаллов.

На Рис. 5 представлен фронтальный вид и вид сверху на параллельно-последовательное (смешанное) соединение нескольких каналов кристаллов.

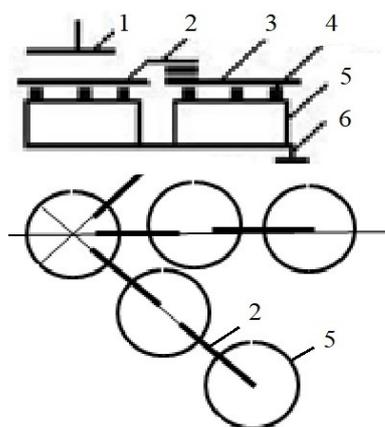


Рис. 5. Схема смешанного соединения кристаллов.
1 — анод; 2 — сцепка; 3 — промежуточный электрод; 4 — диэлектрическая вставка; 5 — кристалл.

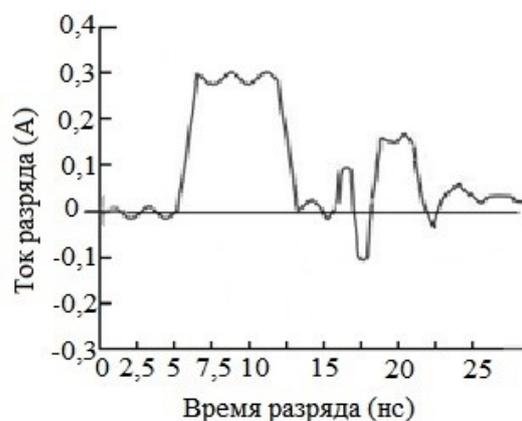


Рис. 6. Осциллограмма смешанного соединения трех каналов.

На Рис. 6 представлена осциллограмма, полученная от смешанного соединения трех каналов. Таким образом, замечено, что при параллельном соединении кристаллов частота импульсов генерации увеличивается. При последовательном соединении в ряде случаев может увеличиваться амплитуда.

На одиночном кристалле максимальное число импульсов генерации составляет 12–17 за цикл нагрева и охлаждения при расстоянии между кристаллом и анодом 2 мм. Смешанное включение нескольких кристаллов (Рис. 5), увеличивает частоту пробоев на анод до

56 импульсов в минуту при атмосферном давлении.

Осциллограмма при таком соединении часто имеет вид трапеции (Рис. 6), что свидетельствует о сложении сигналов от нескольких кристаллов. Соединение анода над кристаллом с катодом вакуумного датчика ПМИ-2 показывает, что за один цикл нагрева и охлаждения происходит совпадение степени потемнения рентгеновской пленки, полученной от стоматологов с пленкой, расположенной на датчике.

4. Заключение

Таким образом, повышение эффективности пироэлектрической генерации достигнуто за счет исследования динамики пироэлектрической генерации электронов, а также анализа поведения системы при соединении кристаллов.

Благодарности

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания FEWM-2023-012 на 2023 год.

5. Список литературы

- [1] G. Rosenman, D. Shur, Y.F. Krasik and A. Dunaevsky, Electron emission from ferroelectrics, *J. Appl. Phys.*, vol. **88**, 6109, 2000, doi: 10.1063/1.1319378
- [2] J.D. Brownridge, Pyroelectric X-ray generator, *Nature*, vol. **358**, 287, 1992, doi: 10.1038/358287b0
- [3] J.A. Geuther, G. Danon, Enhanced neutron production from pyroelectric fusion, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, 174103, 2007, doi: 10.1063/1.2731310
- [4] А.Н. Олейник, П.В. Каратаев, А.С. Кубанкин и др., Пироэлектрический источник рентгеновского излучения, *Патент России*, 184642 Б.И. 31 от 01.11. 2018.
- [5] С.М. Шандаров., К.М. Мамбетова, А.И. Аксенов, Л.Н. Орликов. Устройство для регистрации динамики пироэлектрической генерации импульсных электронных пучков наносекундной длительности в циклах нагрева и охлаждения кристалла ниобата лития при атмосферном давлении. *Патент России*, 2 807 673 МПК G01R 31/26 (2014.01), Бюл. № 33 от 21.11.2023.
- [6] Д.И. Проскуровский, *Эмиссионная электроника, Учеб. пособие для вузов*. Томск: ТГУ, 2010.