

05.2;12.1;12.2

Оптимизация периодического варьирования температуры монокристалла танталата лития в пироэлектрическом ускорителе для стабильной генерации рентгеновского излучения

© А.Н. Олейник¹, М.Э. Гильц¹, П.Н. Жукова², В.С. Сотникова^{1,3}, Ю.С. Шаблов¹, П.Г. Шаповалов^{1,4}¹ Лаборатория радиационной физики, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия² Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России им. Е.Н. Зиничева, Санкт-Петербург, Россия³ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия⁴ Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

E-mail: oleynik_a@bsu.edu.ru

Поступило в Редакцию 23 октября 2023 г.

В окончательной редакции 1 декабря 2023 г.

Принято к публикации 1 декабря 2023 г.

Анализ спектров рентгеновского излучения и кривых периодического варьирования температуры монокристалла танталата лития показывает, что смещение осцилляции температуры является негативным фактором, который ведет к нестабильной работе пироэлектрического ускорителя. При этом есть область допустимых смещений, при которых генерация частиц остается стабильной. Поэтому необходим мониторинг выполнения закона изменения температуры для эффективной работы пироэлектрического ускорителя. Анализируется также влияние давления остаточного газа и амплитуды осцилляции температуры на действие обсуждаемого фактора.

Ключевые слова: пироэлектрический эффект, генераторы рентгеновского излучения, пироэлектрический ускоритель, танталат лития.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.06.57297.19774

Возможность эмиссии и ускорения электронов при пироэлектрическом эффекте в монокристаллах типа ниобата и танталата лития позволяет использовать данные материалы как драйверы генерации различных частиц: рентгеновских фотонов, ионов и нейтронов [1–4]. Концепция пироэлектрического ускорителя весьма привлекательна ввиду возможности изготовления компактных, дешевых и простых в эксплуатации источников ионизирующего излучения. Первые коммерческие источники [5] выявили несколько существенных недостатков, которые пока мешают пироэлектрическим ускорителям найти полноценное применение. Можно выделить два наиболее важных недостатка: наличие „мертвого“ времени без генерации частиц и нестабильный характер генерации частиц, который может нарушаться как электрическими пробоями, так и без явных видимых причин.

В Лаборатории радиационной физики НИУ БелГУ исследуются возможности стабилизации потока генерируемых частиц в пироэлектрическом ускорителе. Основной стратегией является подбор закона изменения температуры, позволяющей осуществлять плавный переход из одной полярности ускорителя в другую. Периодическое варьирование (осцилляции) температуры по синусоидальному закону [6,7] позволяет существенно стабилизировать поток частиц, дает возможность предсказать предстоящий электрический пробой [8] и установить механизм стабилизации электрического потенциала

в пироэлектрическом ускорителе [9]. Непосредственно периодический закон изменения температуры можно представить как

$$T(t) = T_0 + T_1 \sin 2\pi\nu t, \quad (1)$$

где T_0 — начальная температура пироэлектрического образца; T_1 , ν — амплитуда и частота периодического варьирования температуры.

Несмотря на явное улучшение качества работы пироэлектрического ускорителя в экспериментальных условиях, нарушение характера генерации частиц и деградация потока генерируемого излучения все равно наблюдались, хотя и с меньшей частотой. Данное обстоятельство привело к поиску возможных причин происходящего. В настоящей работе представлены результаты анализа большого массива спектров рентгеновского излучения и соответствующих кривых изменения температуры монокристалла танталата лития, который позволяет сделать вывод о наличии дополнительного фактора, ведущего к нестабильности генерируемого потока частиц.

Таким фактором является смещение осцилляции температуры из-за дополнительного разогрева пироэлектрика вследствие слабого теплообмена с окружающей средой, омического нагрева элемента Пельтье и внешних климатических условий. С учетом смещения осцилляции реальный закон изменения температуры выглядит

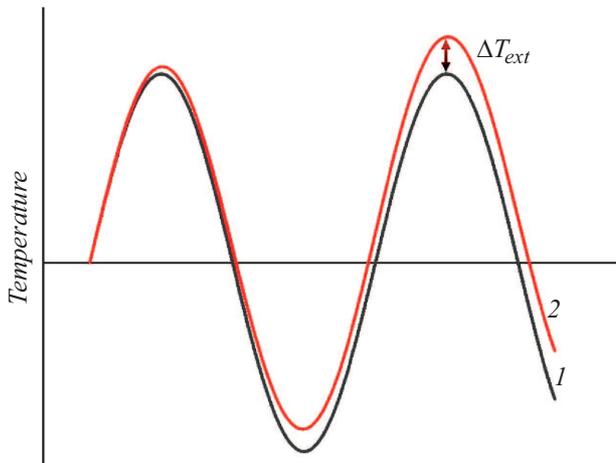


Рис. 1. Примеры кривых периодического варьирования температуры со скоростью смещения осцилляции $\alpha = 0$ (1) и $0.05^\circ\text{C}/\text{min}$ (2).

следующим образом:

$$T(t) = T_0 + T_1 \sin 2\pi vt + \alpha t, \quad (2)$$

где α — величина, характеризующая скорость смещения осцилляций температуры. Наглядно влияние смещения осцилляции температуры представлено на рис. 1.

Отсутствие смещения осцилляции означает изменение температуры пирозлектрического материала без смещения экстремумов и, что очень важно для работы пирозлектрического ускорителя, идентичность фазы нагрева и фазы охлаждения. Это условие обеспечивает равенство общего количества заряда, генерируемого при положительной и отрицательной полярности. В случае наличия смещения осцилляции экстремумы смещаются в одну сторону ΔT_{ext} , что приводит к тому, что одна из термических фаз (в данном случае нагрев) будет иметь

преимущество в амплитуде и длительности, что ведет к отсутствию баланса заряда при термоциклировании.

Основу тестируемой схемы пирозлектрического ускорителя составляла сборка из радиатора, элемента Пельтье, монокристалла танталата лития (LiTaO_3) и мишени (латунная пластина). При помощи генератора сигналов на элемент Пельтье подавался сигнал с заданной частотой и амплитудой, который вызывал изменение температуры по синусоидальному закону. Радиатор охлаждался при помощи внутренней водяной рубашки с заданной мощностью водного потока, что позволяло регулировать теплообмен элемента Пельтье с окружающей средой и тем самым регулировать скорость смещения осцилляции температуры. В эксперименте удалось получить разброс скоростей смещения температуры от 0.004 до $0.118^\circ\text{C}/\text{min}$. Температура измерялась дистанционно при помощи инфракрасной камеры FLIR-E8XT. Спектр рентгеновского излучения регистрировался при помощи спектрометра Amptek Cd–Te X-123, расположенного примерно на одинаковом расстоянии от монокристалла и мишени для корректной оценки вклада фаз отрицательной и положительной полярности в общий поток рентгеновских фотонов. Экспериментальная установка для изучения генерации частиц в пирозлектрическом ускорителе подробнее описана в [8,9].

Эволюция спектра рентгеновского излучения за четыре полноценных тепловых цикла при двух различных скоростях смещения осцилляции температуры показана на рис. 2. При скорости смещения осцилляции температуры $0.006^\circ\text{C}/\text{min}$ (рис. 2, *a*) спектр практически не претерпевает изменений, интенсивность и граничная энергия остаются примерно на одном и том же уровне. Увеличение скорости смещения температуры в 4 раза (рис. 2, *b*) приводит к деградации спектра рентгеновского излучения: пропадает хвост тормозного излучения с относительно высокой энергией, сама интенсивность спектра падает на 10–20% с каждым циклом.

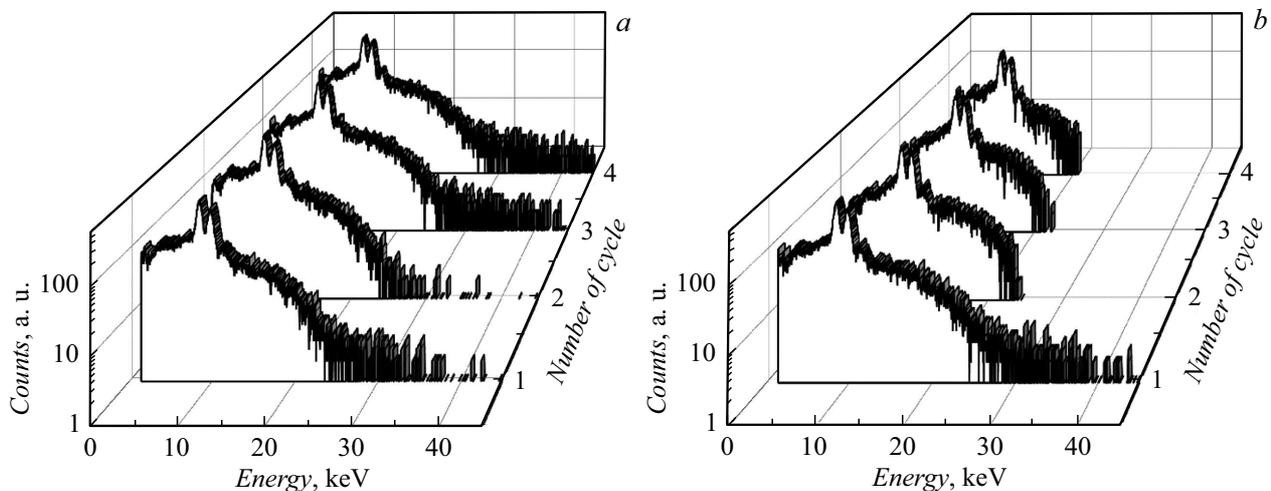


Рис. 2. Эволюция спектра рентгеновского излучения за четыре тепловых цикла при скорости смещения осцилляции температуры 0.006 (*a*) и $0.024^\circ\text{C}/\text{min}$ (*b*). Частота варьирования температуры 0.5 мГц, амплитуда варьирования 20°C , давление остаточного газа $2.5\text{--}5$ мТорр.

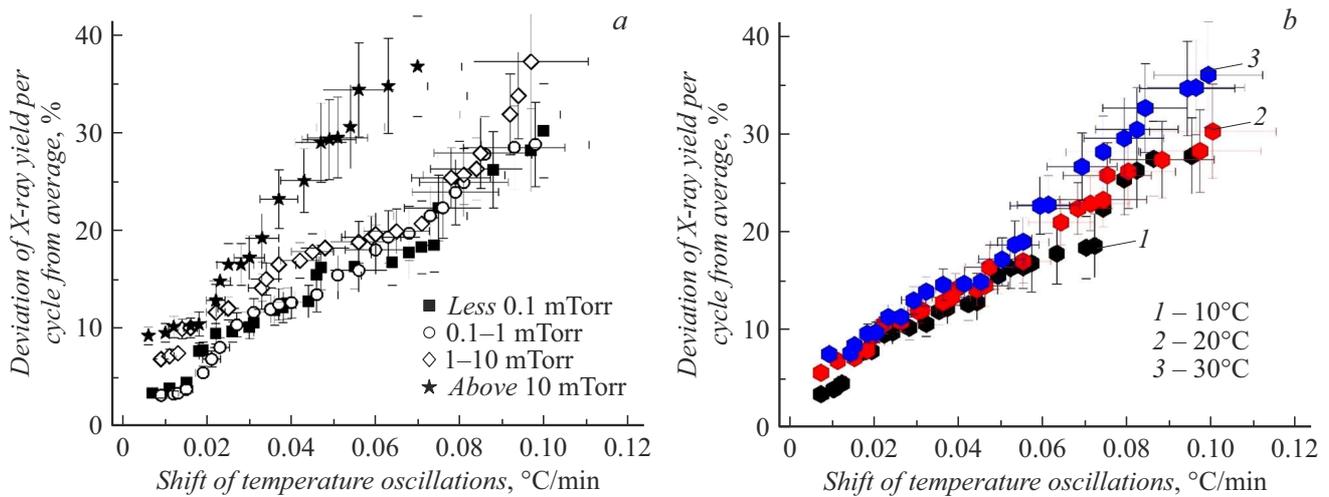


Рис. 3. Зависимость скорости смещения осцилляции температуры от отношения среднеквадратичного отклонения к среднему значению выхода рентгеновского излучения за четыре цикла. *a* — при различных значениях давления остаточного газа, амплитуде осцилляции 10°C и частоте осцилляции 0.5 mHz ; *b* — при различных амплитудах осцилляции, давлении остаточного газа менее 0.1 mTorr и частоте осцилляции 0.5 mHz .

Таким образом, есть допустимые значения смещения осцилляции температуры, при которых генерация рентгеновского излучения остается стабильной и воспроизводимой. Анализ данных показывает, что между мерой стабильности потока фотонов и скоростью смещения осцилляции температуры наблюдается линейная корреляция, показанная для различных значений амплитуды осцилляции и давления остаточного газа на рис. 3. В качестве меры стабильности потока фотонов взято процентное отношение среднеквадратичного отклонения к средней величине выхода рентгеновского излучения за серию из четырех циклов.

Можно сделать однозначный вывод, что чем больше скорость смещения осцилляции температуры, тем более нестабильной становится генерация рентгеновского излучения. При этом степень наклона линейной зависимости явно зависит от давления остаточного газа и амплитуды температурных осцилляций. Чем больше эти параметры, тем более нестабильной становится генерация рентгеновских фотонов при одной и той же скорости смещения осцилляции. Однако в области менее $0.010\text{--}0.015^\circ\text{C}/\text{min}$ отношение среднеквадратичного отклонения к средней величине выхода излучения остается на уровне менее 10% при разных параметрах, что вполне допустимо для стабильной и эффективной работы пироэлектрического ускорителя.

Следовательно, смещение осцилляции температуры является еще одним негативным фактором, влияющим на стабильность генерации частиц в пироэлектрическом ускорителе. При этом давление остаточного газа и величина амплитуды осцилляции температуры являются параметрами, меняющими степень воздействия обсуждаемого фактора. Наличие области допустимых смещений,

где генерация частиц остается стабильной, позволяет рассчитывать на дальнейшую успешную разработку пироэлектрических ускорителей, но с более высокими требованиями к выполнению закона изменения температуры, системе теплоотвода и внешним климатическим условиям.

Финансирование работы

Работа поддержана внутривузовским грантом НИУ БелГУ „Молодые лидеры в науке-2023“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.D. Brownridge, *Trends in electro-optics research* (Nova Sci. Publ., N.Y., 2005).
- [2] J.A. Geuther, Y. Danon, *J. Appl. Phys.*, **97**, 104916 (2005). DOI: 10.1063/1.1915536
- [3] J.A. Geuther, Y. Danon, F. Saglime, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 054803 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.054803
- [4] E.L. Neidholdt, J.L. Beauchamp, *Am. Soc. Mass Spectrom.*, **20**, 2093 (2009). DOI: 10.1016/j.jasms.2009.07.009
- [5] <https://www.amptek.com/internal-products/obsolete-products/cool-x-pyroelectric-x-ray-generator>
- [6] A. Oleinik, M. Gilts, P. Karataev, A. Klenin, A. Kubankin, *J. Appl. Phys.*, **132**, 204101 (2022). DOI: 10.1063/5.0124599
- [7] А.Н. Олейник, М.Э. Гильц, П.В. Каратаев, А.А. Кленин, А.С. Кубанкин, П.Г. Шаповалов, *Письма в ЖТФ*, **49** (9), 36 (2023). DOI: 10.21883/PJTf.2023.09.55323.19514 [A.N. Oleinik, M.E. Gilts, P.V. Karataev, A.A. Klenin, A.S. Kubankin, P.G. Shapovalov, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (5), 33 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.05.56023.19514].

- [8] P. Karataev, A. Oleinik, K. Fedorov, A. Klenin, A. Kubankin, A. Shchagin, *Appl. Phys. Express*, **15**, 066001 (2022).
DOI: 10.35848/1882-0786/ac6b82
- [9] A. Oleinik, M. Gilts, P. Karataev, A. Kubankin, P. Shapovalov, *Europhys. Lett.*, **142**, 34001 (2023).
DOI: 10.1209/0295-5075/accca6