

УДК 53.096;535-34;539.1.03

ИЗМЕРЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА

М. Б. Громов¹, О. О. Иващук², В. Ю. Иониди¹, П. В. Каратаев³,
И. А. Кищин^{2,4}, А. С. Кубанкин^{2,4}, А. Н. Олейник²,
А. С. Чепурнов¹, А. В. Щагин^{2,5}

Разработана и апробирована методика измерения пространственного распределения рентгеновского излучения, генерируемого пироэлектрическим источником. Обнаружен анизотропный характер пространственного распределения рентгеновского излучения с поверхности, перпендикулярной пироэлектрической оси кристалла ниобата лития в зависимости от ориентации пьезоэлектрической оси кристалла. Полученный результат показывает необходимость учитывать влияние пьезоэлектрических свойств пироэлектрических кристаллов на процессы генерации рентгеновского излучения.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, пироэлектрический эффект, ниобат лития, пироэлектрический ускоритель.

Введение. Пироэлектрический эффект в кристаллах в условиях вакуума приводит к генерации высокого электростатического потенциала, который может достигать величины 350 кВ [1]. Этот эффект может быть использован для генерации ионизирующих излучений – пучков ускоренных электронов, ионов [2], быстрых нейтронов [3] и

¹ НИИЯФ имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова, 119234 Россия, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2; e-mail: gromov@physics.msu.ru.

² НИУ “Белгородский государственный университет”, 308015 Россия, Белгород, ул. Победы, д. 85.

³ Институт Джона Адамса при Колледже Роял Холлоуэй Лондонского университета, Великобритания, Эггхэм, Суррей, TW20 0EX; e-mail: pavel.karataev@rhul.ac.uk.

⁴ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kubankin@bsu.edu.ru.

⁵ Харьковский физико-технический институт, 61108 Украина, Харьков, ул. Академическая, 1; e-mail: shchagin@kipt.kharkov.ua.

рентгеновского излучения [4], в том числе для создания промышленных источников рентгеновского излучения [5].

К материалам, проявляющим пироэлектрический эффект, относятся пироэлектрические керамики [6] и кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) и танталата лития (LiTaO_3), обладающие максимальной эффективностью. Кроме пироэлектрических свойств, указанные кристаллы обладают пьезоэлектрическими свойствами, при этом пространственная анизотропия свойств данных кристаллов задаётся тремя осями – пьезоэлектрической X -осью, механической Y -осью, также обладающей пьезоэлектрическими свойствами, и оптической Z -осью, одновременно являющейся и пироэлектрической.

Полярность заряда, возникающего на Z -поверхности (перпендикулярна Z -оси) определяется направлением Z -оси и знаком градиента температуры вдоль Z -оси. Отдельные аспекты физических эффектов, сопровождающих генерацию ионизирующих излучений за счет пироэлектрического эффекта, достаточно широко обсуждаются [7–10], включая изучение распределения заряда на Z -поверхности пироэлектрического кристалла [7]. Основным подходом к изучению распределения заряда является регистрация излучения в оптической области, образующегося в результате взаимодействия ускоренных за счет пироэлектрического эффекта электронов с люминофором, которым покрыт установленный вблизи кристалла экран [8] или сама Z -поверхность кристалла [9].

В настоящей работе представлен новый подход к исследованию свойств пироэлектрических источников, в отличие от [7–9] позволяющий измерить динамику формирования заряда и динамику изменения максимальной величины потенциала на поверхности.

Эксперимент. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Пироэлектрический кристалл ниобата лития (2) в форме параллелепипеда с рёбрами, параллельными осям X , Y и Z (длины рёбер 8, 10.5 и 10 мм соответственно), закреплялся проводящим эпоксидным клеем на радиаторе (1), изготовленном из дюралюминия. Пироэлектрическая ось Z расположена перпендикулярно плоскости поверхности радиатора с точностью 0.5° . Элемент Пельтье (8) использовался для изменения температуры кристалла, нагревая или охлаждая радиатор, температура кристалла контролировалась с точностью 0.1°C . Пироэлектрический кристалл, радиатор и элемент Пельтье далее рассматриваются как единая сборка – пироэлектрический высоковольтный генератор (ПВГ). ПВГ находился в вакуумной камере, остаточное давление в которой поддерживалось на уровне 0.75–1.5 мТорр, Положение ПВГ в вакуумной камере контролировалось манипуляторами в двух ортогональных направлениях вдоль пьезоэлектрических

осей X и Y с точностью ± 0.5 мм. В качестве мишени-коллиматора (3) использовалась свинцовая пластина 50×50 мм толщиной 1 мм с отверстием диаметром 1.5 мм в центре. Пластина была заземлена и установлена на расстоянии 9 мм от Z -поверхности кристалла. Спектр рентгеновского излучения (4) измерялся дрейфовым полупроводниковым детектором-спектрометром XR-100 SDD (5), закрепленным на фланце вакуумной камеры (7). Дополнительный свинцовый коллиматор (6) с апертурой 2.5 мм, установленный на расстоянии 60 мм от мишени-коллиматора (3), обеспечивает площадь обзора поверхности около 2 мм^2 .

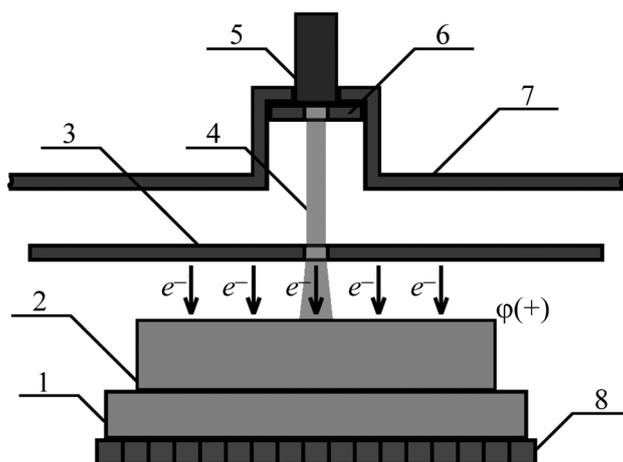


Рис. 1: Схема эксперимента (пояснения в тексте).

Таким образом, установка позволяет измерять спектр рентгеновского излучения, возникающего при взаимодействии ускоренных электронов с положительно заряженной Z -поверхностью кристалла, в режиме сканирования Z -поверхности коллимированным детектором путем перемещения ПВГ вдоль X - и Y -осей.

Измерение спектров рентгеновского излучения при разных положениях ПВГ относительно центра мишени-коллиматора проводилось из начального положения, соответствующего максимально приближенной к краю кристалла области наблюдения поверхности детектором. Все спектры измерялись при одинаковой скорости нагрева кристалла в диапазоне температур $21...46 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ (длительность нагрева 180 с). Для каждого положения ПВГ кристалл нагревался трижды, и спектр рентгеновского излучения измерялся в процессе каждого процесса нагрева отдельно. После каждого цикла нагрева в установку напускалась атмосфера и выжидалось время возвращения температуры кристалла к исходной, что позволило избежать ошибок, связанных с наличием остаточного заряда на поверхности кристалла между циклами. Далее ПВГ перемещался

вдоль сканируемой оси и вся процедура измерения повторялась. Сканирование спектров рентгеновского излучения вдоль X - и Y -осей проводилось с шагом 0.75 мм.

Результаты и обсуждение. Результаты измерений числа фотонов с энергией больше 1 кэВ при сканировании вдоль X - и Y -осей и типичные измеренные спектры представлены на рис. 2. В представленных спектрах можно отметить интенсивные L- и K-линии характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) ниобия (2.16 и 16.62 кэВ), расположенные на плавной подложке тормозного излучения, при этом уровень фона тормозного излучения не превышает 5% от амплитуды пика ХРИ. Данная особенность позволяет дискриминировать излучение, генерирующееся только на поверхности кристалла.

Результаты демонстрируют различные формы пространственного распределения выхода рентгеновского излучения для разных осей с ярко выраженным максимумом распределения, который находится вблизи центра Z -поверхности. При этом ширина пространственного распределения для X -оси существенно больше в сравнении с распределением для Y -оси. При использовании несимметричного по X - и Y -осям кристалла можно было бы ожидать, что ширина распределения вдоль длинной стороны кристалла будет больше. Однако из полученных данных на рис. 2 можно видеть, что ширина распределения выхода вдоль короткой грани (X -ось) составляет около 3.5 мм, что существенно больше ширины распределения вдоль длинной грани, около 1.5 мм. Этот неожиданный результат свидетельствует о резко асимметричном, по-видимому, эллипсоидном распределении выхода на поверхности кристалла. При этом большая ось эллипса направлена вдоль короткой стороны кристалла.

Используемый метод дает возможность измерения максимального потенциала сканируемых областей Z -поверхности по максимальной энергии фотонов. Дополнительной особенностью метода является возможность наблюдать динамику изменения величины потенциала на сканируемой области во времени, что достигается последовательным измерением спектров в течение термического цикла. На рис. 3 представлены зависимости усреднённых значений максимальной величины формируемого на Z -поверхности потенциала вдоль X - и Y -осей от времени измерений. Измерение величин максимального потенциала при сканировании Z -поверхности вдоль X - и Y -осей показало отклонение данных величин в пределах 10%.

Таким образом, полученные результаты показывают наличие максимального выхода рентгеновского излучения вблизи центра Z -поверхности кристалла, при этом величина максимального потенциала на Z -поверхности меняется незначительно и для

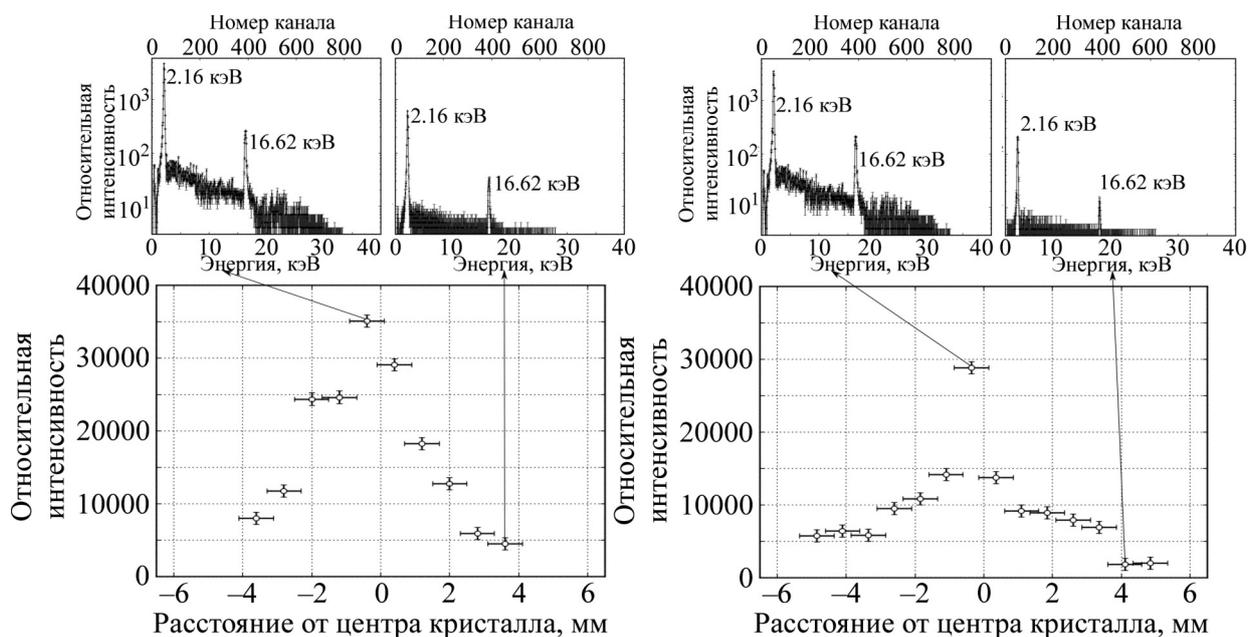


Рис. 2: Пространственное распределение выхода рентгеновского излучения с поверхности пьезоэлектрического кристалла LiNbO_3 , когда поверхность заряжена положительно, вдоль X-оси (слева) и Y-оси (справа). Сверху представлены спектры, измеренные для указанных стрелками областей пространства.

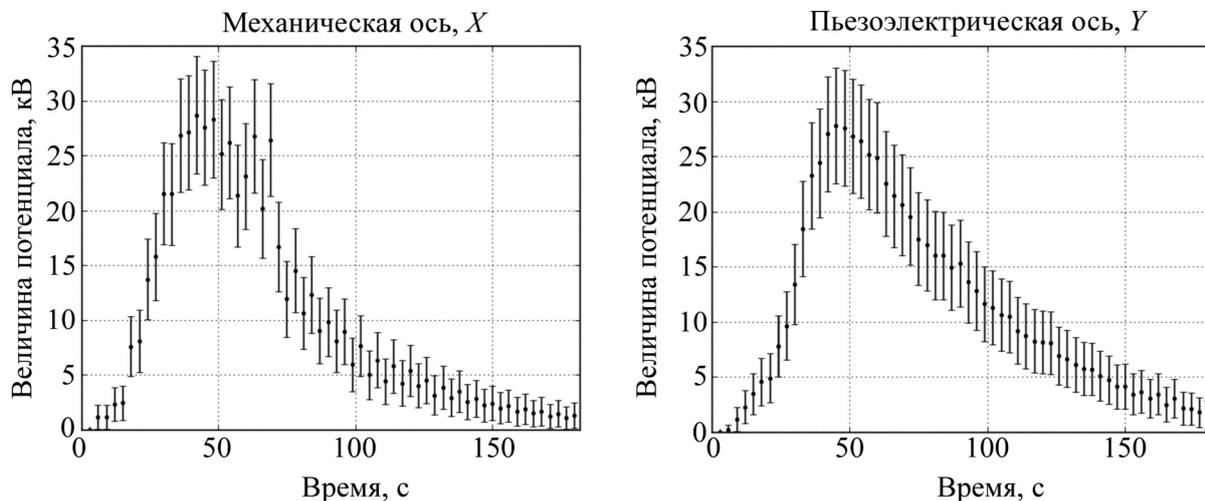


Рис. 3: Усреднённые вдоль X- и Y-осей зависимости максимальной величины формируемого потенциала от времени измерений.

различных областей поверхности временные зависимости формирования потенциала похожи. Наиболее интересным результатом работы является зафиксированная анизо-

тропия распределений выхода излучения вдоль X - и Y -осей (рис. 2). Поскольку Z -поверхность кристалла аксиально-симметрична относительно пьезоэлектрической оси Z , то, по-видимому, наблюдаемая анизотропия объясняется проявлением пьезоэффекта, поскольку пьезоэлектрические свойства кристалла вдоль Z -плоскости анизотропны.

Исходя из имеющихся к настоящему времени экспериментальных результатов по исследованию распределения заряда на положительно заряженной Z -поверхности пьезоэлектрических кристаллов, следует отметить работу [9], в которой показано, что максимум плотности распределения заряда находится в центре Z -поверхности, а форма распределения близка к круглой. Упомянутый результат находится в частичном согласии с результатами настоящей работы, представленными на рис. 2 (в [9] анизотропия формируемого потенциала не наблюдалась). Также стоит отметить, что в [9] возможное влияние X - и Y -осей на выход излучения не обсуждалось, а расположение указано не было.

Результаты работы показывают аномальное анизотропное распределение выхода рентгеновского излучения при проявлении пьезоэлектрического эффекта. Обнаруженный эффект связан с возможным влиянием на процесс пьезоэлектрической генерации потенциала пьезоэлектрического эффекта, который может проявляться в процессе нагрева или охлаждения пьезоэлектрического кристалла за счет тепловой деформации кристалла.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16–19–10535).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] W. Tornow, S. M. Lynam, and S. M. Shafroth, *J. Appl. Phys.* **107**, 063302 (2010).
- [2] J. D. Brownridge and S. M. Shafroth, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 3364 (2001).
- [3] B. Naranjo, J. Gimzewski, and S. Putterman, *Nature* **434**, 1115 (2005).
- [4] J. D. Brownridge, *Nature* **358**, 277 (1992).
- [5] www.amptek.com/coolx.html.
- [6] A. V. Shchagin, V. S. Miroshnik, V. I. Volkov, et al., *Appl. Phys. Lett.* **107**, 233505 (2015).
- [7] N. Kukhtarev, T. Kukhtareva, M. Bayssie, et al., *J. Appl. Phys.* **96**, 6794 (2004).
- [8] J. A. Geuther, *PhD Thesis* (Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 2007).

- [9] J. D. Brownridge and S. M. Shafroth, *New Research on Lasers and Electrooptics*, Ed. by W. T. Arkin (Nova Science Publishers, New York, 2007).
- [10] R. Ghaderi and F. A. Ravani, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 042906 (2015).

По материалам V Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”.

Поступила в редакцию 12 июля 2016 г.