

УДК 537.533.79

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ГРАНИЧНОЙ ЭНЕРГИИ ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА ПРИ РАБОТЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА В ВАКУУМЕ

О. О. Иващук^{1,3}, А. В. Щагин^{1,2}, А. С. Кубанкин^{1,3}, И. А. Кищин^{1,3},
А. Н. Олейник^{1,4}, Ю. В. Григорьев⁵, М. Э. Гильц¹, В. И. Алексеев³,
А. Н. Елисеев³

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению величины граничной энергии тормозного рентгеновского излучения в пироэлектрическом источнике при различном давлении остаточного газа в вакууме. Определен диапазон рабочих давлений остаточного газа.

Ключевые слова: пироэлектрический дефлектор, рентгеновское излучение.

Схему работы пироэлектрического источника рентгеновского излучения на двух кристаллах впервые предложил Данон [1]. При проведении первых тестовых экспериментов Данон обнаружил генерацию рентгеновских лучей с рекордным на тот момент значением граничной энергии порядка 160 кэВ. Проникающая способность рентгеновского излучения напрямую зависит от величины его граничной энергии. Ранее в работе [2] исследовалась зависимость максимальной энергии рентгеновского излучения, генерирующегося при работе пироэлектрического источника в вакууме от величины предварительного изменения температуры пироэлектрического источника. В работе [3]

¹ Международная научно-образовательная лаборатория радиационной физики НИУ БелГУ, Россия, г. Белгород.

² Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Украина, г. Харьков.

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ooleg.ivashuk@gmail.com, ivashchuk@bsu.edu.ru.

⁴ Колледж Ройял Холлоуэй, Лондонский университет, Эгам, Великобритания, г. Лондон.

⁵ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 59, стр. 1.

демонстрируется зависимость выхода рентгеновского излучения от скорости изменения температуры монокристалльного источника. Также проводились исследования влияния формы мишени в пироэлектрическом источнике, основанного на единственном кристалле, на спектральные характеристики рентгеновского излучения [4]. Настоящая работа посвящена определению оптимального давления, при котором граничная энергия тормозного рентгеновского излучения, генерирующегося при работе двухкристалльного пироэлектрического источника, достигает максимального значения. Стоит отметить, что двухкристалльный источник рентгеновского излучения, являющийся объектом исследования в данной работе, в отличие от монокристалльного источника [2], способен генерировать рентгеновское излучение с удвоенной граничной энергией.

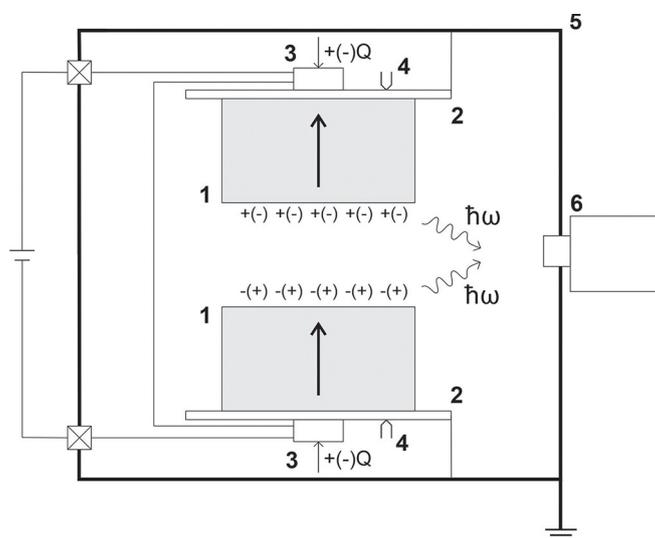


Рис. 1: *Схема экспериментальной установки: 1 – пироэлектрические кристаллы ниобата лития, 2 – теплопроводник, 3 – кремниевые полупроводниковые диоды, 4 – термомонона К-типа, 5 – вакуумная камера, 6 – детектор рентгеновского излучения.*

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для проведения исследований зависимости граничной энергии тормозного рентгеновского излучения от давления остаточного газа в вакууме при работе пироэлектрического источника.

Исследования проводились в вакуумной камере (5) объемом 45 л. Давление остаточного газа в вакуумной камере контролируется с помощью вакуумметра ERSTVAK MTM9D-KF25, а изменение величины давления осуществляется вакуумным запорным клапаном ручного привода MDC E-GV-4000M. Внутри вакуумной камеры (5) установлены два пироэлектрических кристалла ниобата лития LiNbO_3 (1) с размерами

$10 \times 20 \times 20$ мм³. Кристаллы (1) расположены на расстоянии 11 мм соосно и параллельно друг другу. Вектора спонтанной поляризации каждого пироэлектрика сонаправлены. Нагревание кристаллов (1) осуществляется посредством передачи тепла от кремниевых полупроводниковых диодов MUR 1660 (3) через теплопроводники (2), выполненные из алюминия диаметром 40 мм и толщиной 5 мм. Рабочий ток питания полупроводниковых кремниевых диодов (3) составлял 4.5 А. Температура пироэлектрических кристаллов (1) контролировалась термопарой К-типа (4), установленной на задней поверхности теплопроводников (2). Каждая сборка, состоящая из пироэлектрического кристалла (1), теплопроводника (2), полупроводникового кремниевого диода (3) и термопары К-типа (4), была зафиксирована на противоположных стенках вакуумной камеры (5). Охлаждение пироэлектрических кристаллов (1) происходило естественным образом за счет рассеивания тепла на теплопроводниках (2) и стенках вакуумной камеры (5). Для измерения спектра рентгеновского излучения использовался полупроводниковый детектор рентгеновского излучения Amptek CdTe 123 (6) с площадью рабочей зоны 25 мм² и толщиной 1 мм. Входное окно полупроводникового детектора выполнено из бериллиевой фольги толщиной 100 мкм. Калибровка детектора производилась по спектральным линиям изотопа кобальта ⁵⁷Co. Энергетическое разрешение детектора составляло 530 эВ в спектральном пике ⁵⁷Co с энергией 14.4 кэВ, а его время формирования 1 мкс.

В вакуумной камере (5) с помощью системы вакуумных насосов обеспечивается давление $1.3 \cdot 10^{-6}$ Торр. Пироэлектрические кристаллы (1) нагреваются от комнатной температуры 25 °С до температуры 71.2 °С в течение 900 секунд. При значении тока питания каждого полупроводникового диода (3), равном 4.5 А, среднее значение скорости изменения температуры кристаллов (1) составляет 3 °С/мин. Далее следует естественное охлаждение пироэлектрических кристаллов (1) за счет теплового рассеивания на теплопроводниках (2) и стенках вакуумной камеры (5) до момента, пока температура каждого кристалла не достигала 30 °С. Процесс естественного охлаждения кристаллов в вакууме до комнатной температуры требует значительных временных затрат (несколько часов), в связи с чем диапазон изменения температуры пироэлектрических кристаллов был изменен на 30–71.2 °С.

Спектры рентгеновского излучения измерялись в течение нагрева и охлаждения пироэлектрического дефлектора при различном давлении остаточного газа от $1.3 \cdot 10^{-6}$ до $1.5 \cdot 10^{-2}$ Торр с шагом, величина которого зависела от точности ручной регулировки вакуумного запорного клапана. На рис. 2(а) представлен спектр рентгеновского излучения, измеренный при нагреве пироэлектрического дефлектора в вакууме при

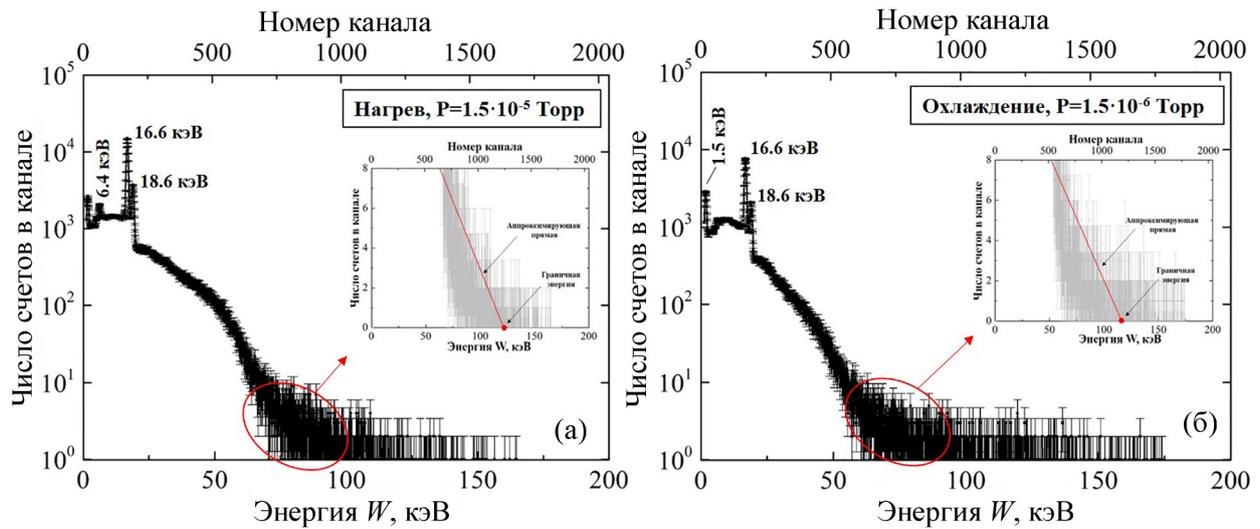


Рис. 2: Спектры рентгеновского излучения, генерирующегося в течение (а) нагрева и (б) охлаждения пироэлектрического источника при давлении остаточного газа 1.5×10^{-5} Торр.

давлении остаточного газа $1.5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Спектр рентгеновского излучения, измеренный при охлаждении пироэлектрического источника при давлении остаточного газа $1.5 \cdot 10^{-5}$ Торр представлен на рис. 2(б). Оба спектра представлены в логарифмическом масштабе.

На обоих рисунках мы наблюдаем пики характеристического рентгеновского излучения с энергиями 16.6 кэВ, 18.6 кэВ и 6.4 кэВ, соответствующие K_{α} - и K_{β} -линиям ниобия, атомы которого входят в состав пироэлектрических кристаллов, и K_{α} железа, из которого изготовлена вакуумная камера. Слева от K_{α} -линии железа виден пик с энергией около 1.5 кэВ, соответствующий K_{α} -линии алюминия. Наличие данного пика на измеренных спектрах рентгеновского излучения подтверждает возможность процесса ускорения эмиттированных с поверхности пироэлектрического кристалла электронов к заземленным алюминиевым теплопроводникам. Поверх основных спектров рентгеновского излучения в правом верхнем углу отображены те же спектры в линейном масштабе. На каждом из дополнительных спектров на рис. 2 представлена аппроксимирующая прямая. Величина граничной энергии тормозного рентгеновского излучения определяется абсциссой точки пересечения аппроксимирующей прямой и горизонтальной оси. Фитирование проводилось в высокоэнергетической области спектра [5]. С помощью данного метода была определена величина граничной энергии тормозного рентгеновского

излучения на всех спектрах, измеренных в данном эксперименте. Результаты обработки полученных экспериментальных данных приведены в табл. 1.

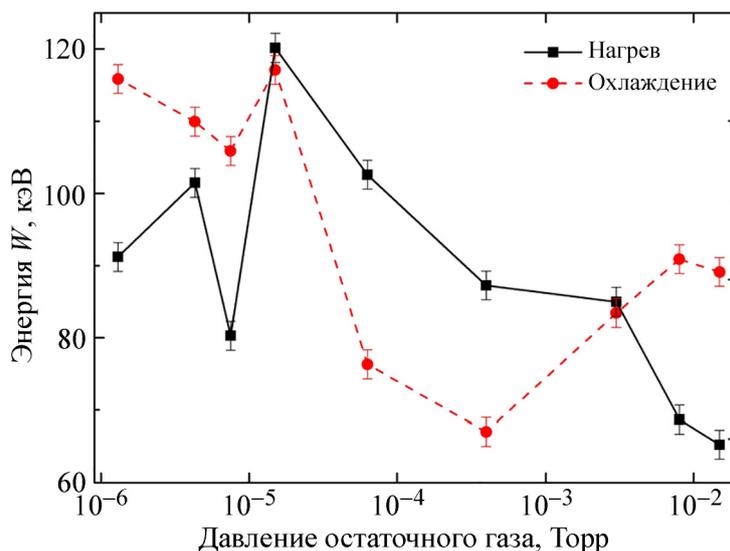


Рис. 3: Графики зависимости граничной энергии тормозного рентгеновского излучения от давления остаточного газа.

Т а б л и ц а 1

Результаты обработки полученных экспериментальных данных

P , Торр	W , кэВ (нагрев)	W , кэВ (охлаждение)
$1.3 \cdot 10^{-6}$	91.2	115.9
$4.3 \cdot 10^{-6}$	101.5	109.9
$7.5 \cdot 10^{-6}$	80.3	105.9
$1.5 \cdot 10^{-5}$	120.2	117.1
$6.3 \cdot 10^{-5}$	102.6	76.3
$4 \cdot 10^{-4}$	87.2	67
$3 \cdot 10^{-3}$	85	83.4
$8 \cdot 10^{-3}$	68.7	90.9
$1.5 \cdot 10^{-2}$	65.3	89.1

На рис. 3 представлены графики зависимости граничной энергии (W , кэВ) тормозного рентгеновского излучения, генерирующегося при нагреве и охлаждении пиро-

электрического источника при различном давлении остаточного газа в диапазоне от $1.3 \cdot 10^{-6}$ Торр до $1.5 \cdot 10^{-2}$ Торр.

Граничная энергия рентгеновского излучения, зарегистрированного в экспериментах, достигает своего максимального значения 120.2 кэВ в случае нагрева (рис. 2(а)) и 117.1 кэВ в случае охлаждения (рис. 2(б)) пироэлектрического источника при давлении остаточного газа, равном $1.5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Отсутствие единой формы у графиков, представленных на рис. 3, предположительно связано с различием скоростных режимов изменения температуры [6] при нагреве (средняя величина достигает 3 °С/мин) и охлаждении (средняя величина достигает 0.7 °С/мин) пироэлектрического источника.

В спектрах, представленных на рис. 2, наблюдаются фотоны с энергией до 150–175 кэВ. Энергии этих фотонов намного превышают граничную энергию. Причина появления таких фотонов требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части госзадания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020-0032 (2019-1569) и с использованием оборудования ЦКП ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” при поддержке Минобрнауки РФ (проект RFMEFI62119X0035).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] J. A. Geuther, Y. Danon. *J. Appl. Phys.* **97**, 104916 (2005). DOI: 10.1063/1.1915536.
- [2] А. Н. Олейник, Е. В. Болотов, М. Э. Гильц и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **48**(5), 3 (2021). DOI: 10.3103/S1068335621050079.
- [3] A. S. Kubankin, A. S. Cherpurnov, O. O. Ivashchuk, et al., *AIP Advances*. **8**, 035207 (2018). DOI: 10.1063/1.5006486.
- [4] О. О. Иващук, А. С. Кубанкин, А. Н. Олейник, А. В. Шагин. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 8, 70 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1027451016040297>.
- [5] M. C. Silva, S. B. Herdade, P. Lammoglia, et al., *Med. Phys.* **27**, 2617 (2000). DOI: 10.1118/1.1318222.
- [6] A. S. Kubankin, A. S. Cherpurnov, O. O. Ivashchuk, et al., *AIP Advances* **8**, 035207 (2018). DOI: 10.1063/1.5006486.

Поступила в редакцию 7 июля 2021 г.

После доработки 30 октября 2021 г.

Принята к публикации 31 октября 2021 г.