

УДК 539.12.04

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ С КОНУСООБРАЗНЫМИ МИШЕНЯМИ

© 2016 г. О. О. Иващук<sup>1</sup>, А. С. Кубанкин<sup>1</sup>, А. Н. Олейник<sup>1,\*</sup>, А. В. Щагин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный университет,  
308015 Белгород, Россия

<sup>2</sup>Харьковский физико-технический институт,  
61108 Харьков, Украина

\*E-mail: andreyoleynik92@mail.ru

Поступила в редакцию 20.01.2016 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований спектрального состава и выхода рентгеновского излучения от пироэлектрических источников с конусообразными мишенями. В однокристалльном пироэлектрическом источнике с мишенью в виде усеченного конуса обнаружен ярко выраженный максимум в зависимости выхода излучения от расстояния между пироэлектрическим кристаллом и мишенью. В эксперименте с источником с двумя пироэлектрическими кристаллами и конусообразной мишенью показано, что параметры рентгеновского излучения практически не зависят от направления изменения температуры кристаллов.

**Ключевые слова:** пироэлектрический ускоритель, рентгеновское излучение, конусообразные мишени.

**DOI:** 10.7868/S0207352816080102

### ВВЕДЕНИЕ

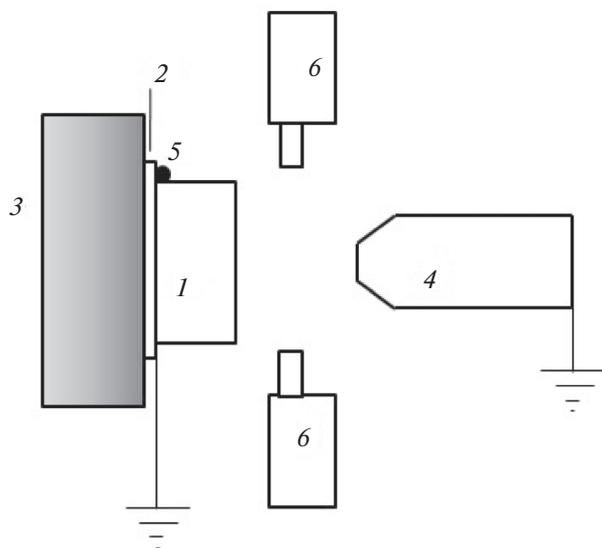
Пироэлектрические кристаллы при их нагреве и охлаждении в вакууме могут создавать электрическое поле напряженностью до 100 кВ/см и более [1]. В таких полях можно ускорять электроны и ионы до энергии порядка 100 кэВ и более. Впервые генерация рентгеновского излучения электронами, ускоренными в пироэлектрическом ускорителе, наблюдалась в эксперименте [2]. В исследованиях по генерации рентгеновского излучения с помощью пироэлектрического ускорителя [3, 4] обычно применяют пироэлектрический кристалл прямоугольной или цилиндрической формы, напротив которого устанавливают плоскую тонкую мишень, а за мишенью на оси источника размещают детектор рентгеновского излучения. При нагревании или охлаждении кристалла ускоренные электроны возбуждают рентгеновское излучение в мишени или кристалле. Рентгеновское излучение, пройдя через тонкую мишень, попадает в детектор. При этом мягкое рентгеновское излучение поглощается в мишени и не достигает детектора, а для работы такого источника требуется тонкая мишень. Кроме того, применяют также двухкристалльный источник излучения [5], в котором рентгеновское излучение возбуждается ускоренными электронами на по-

верхности кристаллов. Также были предложены пироэлектрические источники излучения, работающие за счет лазерного освещения поверхности пироэлектрического кристалла с примесями [6, 7]. В настоящей работе мы описываем эксперименты с конусообразной толстой мишенью и детектором, установленным под прямым углом к оси однокристалльного и двукристалльного источника. Использование толстой мишени в такой геометрии может позволить избежать применения тонкой мишени и наблюдать рентгеновское излучение малой энергии.

### ОДНОКРИСТАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОНУСООБРАЗНОЙ МИШЕНЬЮ

Исследования выхода рентгеновского излучения выполнялись с использованием мишени в виде усеченного конуса в вакуумной камере при давлении остаточного газа около 1 мТорр. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

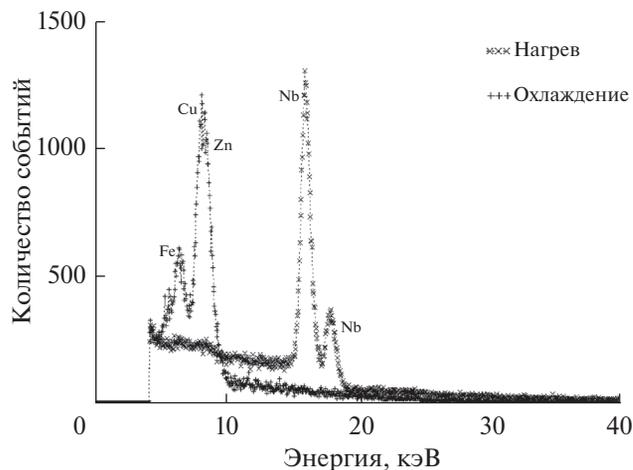
Использовался пироэлектрический кристалл  $\text{LiNbO}_3$ , имевший форму цилиндра диаметром 10 мм и высотой 10 мм. Мишень представляла собой усеченный конус из латуни диаметром 11 мм, (диаметр усеченной части 5 мм) и углом раство-



**Рис. 1.** Схема эксперимента с однокристалльным источником: 1 – пироэлектрический кристалл, 2 – элемент Пельтье, 3 – радиатор, 4 – мишень, 5 – цифровой термометр, 6 – детектор рентгеновского излучения.

ра  $60^\circ$ . Нагрев и охлаждение кристалла осуществлялся с использованием элемента Пельтье, к которому с помощью проводящего эпоксидного клея крепился кристалл. Между кристаллом и элементом Пельтье, также с помощью эпоксидного клея, устанавливалась заземленная фольга из алюминия, покрывавшая всю площадь элемента Пельтье. Для отвода и подвода тепла с противоположной стороны элемента Пельтье использовался радиатор, представлявший собой массивный кронштейн из дюралюминия. Расстояние между кристаллом и мишенью варьировалось путем смещения мишени с помощью вакуумно-совместимых манипуляторов. Мониторинг температуры осуществлялся цифровым датчиком DS18B20, закрепленным у основания кристалла на элементе Пельтье.

Спектры рентгеновского излучения измерялись с помощью полупроводникового детектора рентгеновского излучения Amptek CdTe XR-100T с площадью кристалла  $25 \text{ мм}^2$  и толщиной бериллиевого входного окна  $100 \text{ мкм}$ . Детектор располагался под углом  $90^\circ$  к оси источника, которая показана на рис. 1 пунктирной линией, с двух противоположных сторон, на одинаковом расстоянии от оси источника. Спектры измеряли как при нагреве пироэлектрического кристалла, так и при его охлаждении, при этом температура кристалла изменялась на  $25^\circ\text{C}$  вблизи комнатной температуры. Длительность цикла нагрев–охлаждение составляла около  $300 \text{ с}$ . Типичные спек-



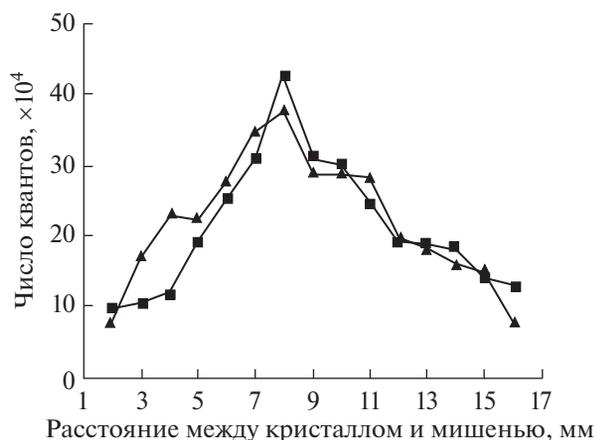
**Рис. 2.** Спектры рентгеновского излучения, измеренные при нагреве и охлаждении пироэлектрического кристалла. Расстояние между кристаллом и мишенью  $8 \text{ мм}$ .

тры, измеренные при нагреве и охлаждении кристалла, представлены на рис. 2.

При нагреве кристалла на его поверхности, обращенной к мишени, вырабатывается положительный заряд. Электроны ускоряются по направлению к кристаллу и возбуждают в кристалле тормозное излучение и характеристическое излучение атомов кристалла. В спектре наблюдаются пики характеристического излучения атомов ниобия, входящих в состав кристалла, на фоне тормозного излучения. При охлаждении кристалла на его поверхности, обращенной к мишени, вырабатывается отрицательный заряд. Электроны ускоряются по направлению от кристалла к мишени и возбуждают в мишени тормозное излучение и характеристическое излучение атомов мишени. В спектре наблюдаются пики характеристического излучения атомов мишени Cu и Zn (из-за близкого расположения пиков Cu –  $8.04 \text{ кэВ}$ , Zn –  $8.64 \text{ кэВ}$ , соответствующие линии слились в единый пик) на фоне тормозного излучения.

Измерения зависимости выхода рентгеновского излучения от расстояния между кристаллом и мишенью выполнялись при передвижениях мишени с помощью вакуумного привода. Результаты измерений суммарного числа квантов, зарегистрированных спектрометром за цикл нагрев–охлаждение, представлены на рис. 3.

В полученных зависимостях наблюдается ярко выраженный максимум при расстоянии между мишенью и кристаллом  $8 \text{ мм}$ . Можно предположить, что этот максимум связан с явлением самофокусировки пучка электронов, который испускается кристаллом, описанным в [3]. Такая само-



**Рис. 3.** Зависимости суммарного числа квантов, зарегистрированных спектрометром за цикл нагрев–охлаждение, от расстояния между кристаллом и мишенью. Измерения проведены при двух симметричных положениях детектора рентгеновского излучения.

фокусировка в нашем случае может наблюдаться при нагреве кристалла, когда электроны ускоряются от кристалла к мишени. Чтобы выяснить возможность этого процесса, мы регистрировали спектры излучения при раздельном нагреве и охлаждении кристалла. Результаты измерений суммарного числа квантов в пиках характеристического излучения представлены в виде диаграмм на рис. 4.

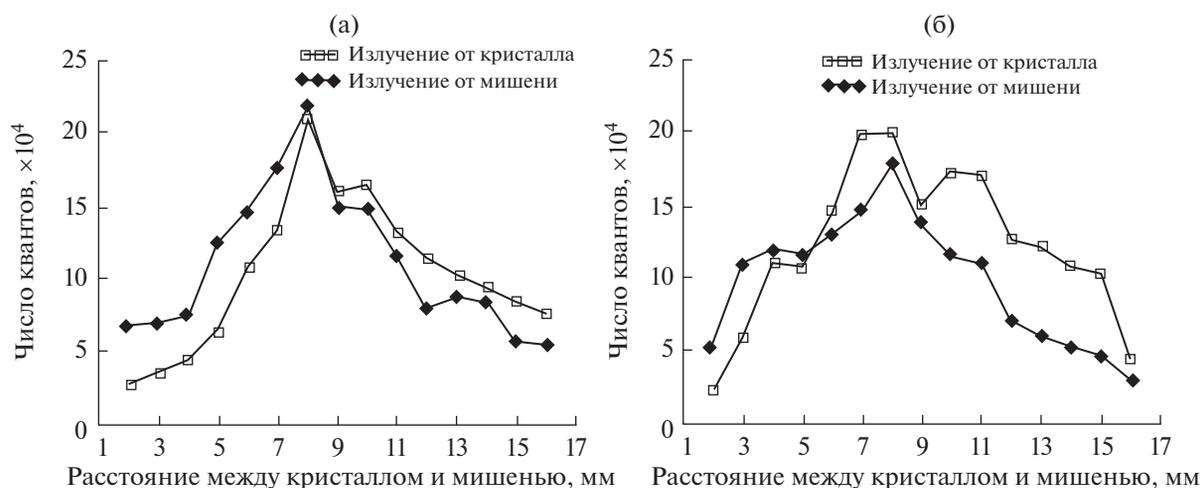
Оказалось, что максимум выхода при расстоянии 8 мм наблюдается как при ускорении электронов в направлении мишени, так и при ускорении электронов во время движения к кристаллу. При увеличении расстояния превалирует излуче-

ние от мишени, а при уменьшении расстояния — излучение от кристалла. Возможно, такое поведение выхода характеристического рентгеновского излучения обусловлено зависимостью числа ускоренных электронов от расстояния между кристаллом и мишенью.

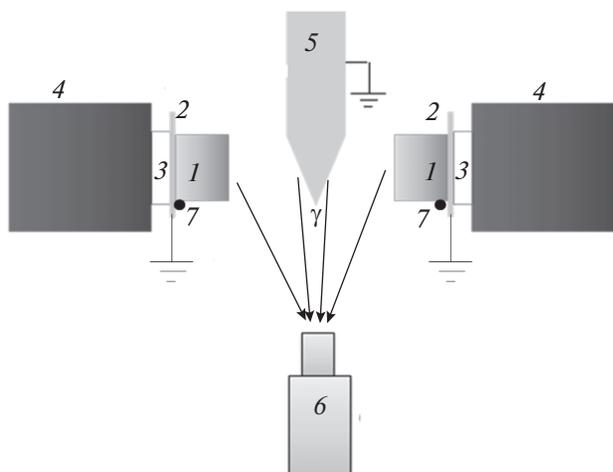
### ДВУХКРИСТАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОНУСООБРАЗНОЙ МИШЕНЬЮ

Двухкристальная схема пироэлектрического ускорителя была предложена в [5]. В таком ускорителе два пироэлектрических кристалла устанавливаются напротив друг друга так, что при изменении температуры на их поверхностях вырабатываются заряды противоположного знака. Поэтому разность потенциалов между кристаллами удваивается по сравнению с однокристалльным вариантом, а электроны ускоряются между кристаллами до удвоенной энергии. Рентгеновское излучение обусловлено движением электронов в кристаллах.

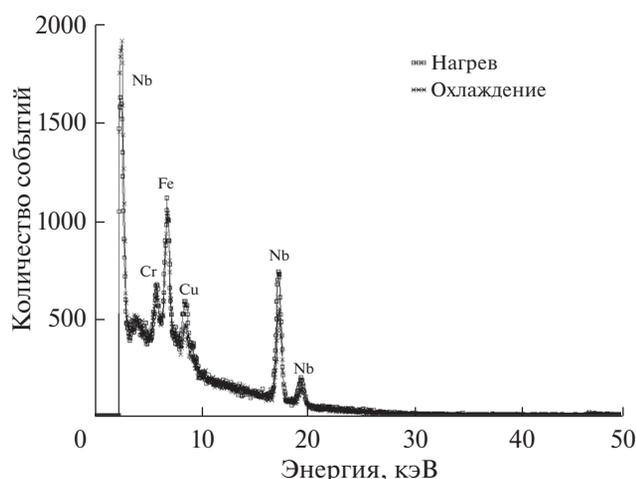
С целью выяснения возможности применения двухкристальной схемы для получения характеристического рентгеновского излучения от сменной толстой мишени было проведено измерение спектров рентгеновского излучения в двухкристальной схеме с установленной между кристаллами конусообразной мишенью. Эксперимент выполнялся в вакуумной камере при давлении остаточного газа в диапазоне от 1 до 5 мТорр. Схема эксперимента показана на рис. 5. Пироэлектрические кристаллы  $\text{LiNbO}_3$  диаметром 11 мм и высотой 10 мм устанавливались на расстоянии



**Рис. 4.** Зависимости выхода характеристического рентгеновского излучения при нагреве и охлаждении кристалла от расстояния между кристаллом и мишенью. На рис. а, б показаны результаты измерений при двух симметричных положениях детектора рентгеновского излучения.



**Рис. 5.** Схема эксперимента: 1 – пироэлектрические кристаллы, 2 – проводящая заземленная прокладка, 3 – элемент Пельтье, 4 – радиатор, 5 – мишень, 6 – детектор рентгеновского излучения, 7 – цифровой термометр.



**Рис. 6.** Спектры рентгеновского излучения двухкристалльного источника с конической мишенью из латуни, измеренные при нагреве и охлаждении кристаллов.

22 мм друг от друга так, что их векторы поляризации были коллинеарны. Между кристаллами устанавливалась латунная мишень в виде конуса диаметром 12 мм и углом раствора конуса 60°.

Измерение спектров рентгеновского излучения проводилось с помощью детектора Amptek CdTe XR-100T при изменении температура кристаллов на 15°С вблизи комнатной температуры. Нагрев и охлаждение кристаллов выполнялись в течение 200 с, по 100 с на каждый процесс. Полученные спектры рентгеновского излучения пред-

ставлены на рис. 6. Видно, что спектр излучения при нагреве кристаллов мало отличается от спектра излучения при его охлаждении. Характеристическое излучения ниобия возникает при взаимодействии ускоренных электронов с кристаллом ниобата лития, а характеристическое излучение меди обусловлено движением электронов в латунной мишени. Присутствие линии железа и хрома связано с влиянием стенок вакуумной камеры. Наличие спектральных пиков характеристического излучения мишени показывает возможность применения мишени, установленной между кристаллами, для элементного анализа образцов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты измерений спектров рентгеновского излучения от однокристалльного и двухкристалльного пироэлектрических источников рентгеновского излучения с конусообразными мишенями. Обнаружен максимум в зависимости выхода рентгеновского излучения однокристалльного источника от расстояния между кристаллом и мишенью. Экспериментально продемонстрирована возможность наблюдения рентгеновского излучения с той стороны мишени, на которую падают ускоренные в пироэлектрическом ускорителе электроны. В дальнейшем это даст возможность наблюдать ХРИ от тонких поверхностных слоев вещества на конусообразной мишени.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (грант № 3.2009.2014/К) и при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа УМНИК, проект № 0002356\2014).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosenman G., Shur D., Krasik Ya. E., Dunaevsky A. // J. Appl. Phys. 2000. V. 88. P. 6109.
2. Brownridge J.D. // Nature. 1992. V. 358. P. 287.
3. Brownridge J.D., Shafroth S.M. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 3364.
4. Нагайченко В.И., Сотников В.В., Иванов Б.И., Егоров А.М., Шагин А.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2007. V. 3. P. 81.
5. Geuther J., Danon Y., Saglime F., Sones B. // Proceedings from the Sixth International Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology. 2003. P. 591.
6. Kukhtarev N., Brownridge J.D., Kukhtareva T., Bayisse M., Wang J. // J. Appl. Phys. 2004. V. 96. P. 6794
7. Kukhtarev N.V., Kukhtareva T.V., Stargell G., Wang J.C. // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. P. 04111.

## **Research of the Yield of X-Ray Radiation from Pyroelectric Sources with Cone-Shaped Targets**

**O. O. Ivashchuk, A. S. Kubankin, A. N. Oleinik, A. V. Shchagin**

Results of the experimental research of the spectral composition and the yield of X-ray radiation from the pyroelectric sources with cone-shaped targets are presented. In the single-crystal pyroelectric source with the target as a truncated cone, the strong maximum of the yield as a function of the distance between the crystal and the target is found. In the two-crystal source, it is shown that the X-ray yield is practically independent of the direction of the pyroelectric crystals temperature variation.