

03;12

## Свойства керамического пироэлектрического генератора рентгеновского излучения в зависимости от давления остаточного газа

© А.В. Щагин<sup>1,2</sup>, В.И. Волков<sup>2</sup>, В.С. Мирошник<sup>2</sup>, А.С. Кубанкин<sup>1</sup>,  
А.Н. Олейник<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

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

<sup>3</sup> John Adams Institute at Royal Holloway, University of London, Egham, UK  
E-mail: av.shchagin@gmail.com

Поступило в Редакцию 19 июля 2017 г.

Приведены результаты экспериментального исследования зависимости свойств рентгеновского излучения, которое генерируется с помощью пироэлектрического ускорителя на основе пироэлектрической керамики, от давления остаточного газа. Измерены максимальная энергия рентгеновского излучения и число производимых ускоренными электронами квантов рентгеновского излучения при различных давлениях остаточного газа в камере генератора. Показано, что максимальный выход рентгеновского излучения и максимальная энергия рентгеновского излучения и ускоренных электронов наблюдаются при давлении остаточного газа в камере генератора порядка нескольких мТорр.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.02.45460.16978

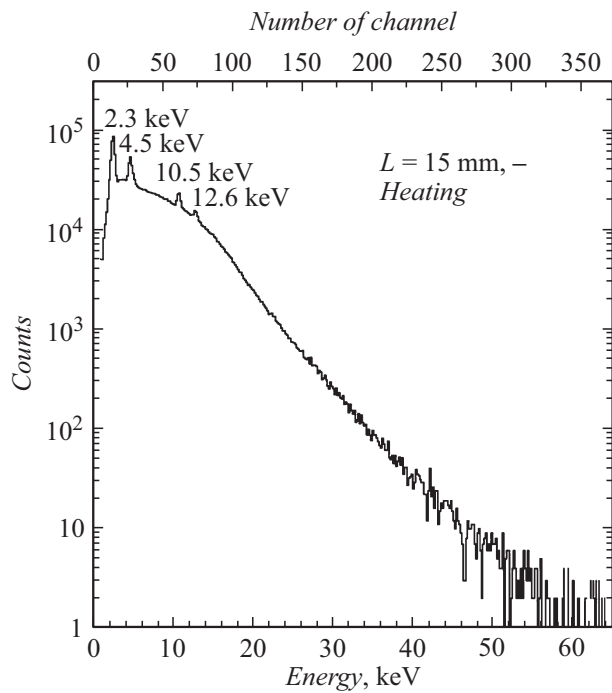
Малогобаритный пироэлектрический ускоритель был предложен в [1], его свойства исследовались несколькими группами (см., например, работы [2,3] и ссылки в них). В этих работах использовались пироэлектрические кристаллы, такие как ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) или танталат лития ( $\text{LiTaO}_3$ ). При нагреве или охлаждении такого кристалла в вакууме на его поверхности вырабатывается потенциал до порядка 100 кВ, который используется для ускорения электронов или ионов. Недавно в [4] мы впервые предложили использовать пироэлектрическую керамику в пироэлектрическом ускорителе, а также продемонстри-

ровали экспериментально работу пироэлектрического ускорителя и генератора рентгеновского излучения на основе пироэлектрической керамики вместо пироэлектрического кристалла. В настоящей работе приводятся результаты измерений максимальной энергии фотонов, а также электронов, которые ускоряются в керамическом ускорителе, в зависимости от давления остаточного газа. Кроме того, приведены результаты измерений числа квантов рентгеновского излучения, которые производятся ускоренными электронами, при различных давлениях остаточного газа. Обсуждаются перспективы применения керамического пироэлектрического генератора.

Пироэлектрический генератор рентгеновского излучения собран в цилиндрической вакуумной камере. Камера откачивается с помощью форвакуумного насоса через азотную ловушку. Давление остаточного газа (воздух) в камере устанавливается с помощью клапана с плавной регулировкой. Цилиндр из пироэлектрической керамики приклеен проводящим эпоксидным клеем к наконечнику цилиндрического медного теплопровода, установленного на оси камеры. Противоположный конец теплопровода помещен в жидкий азот вне камеры. Свободное основание керамического цилиндра расположено в вакууме напротив бериллиевого окна рентгеновского детектора. Керамический цилиндр можно нагревать при пропускании тока от внешнего источника через резистор, который установлен на теплопроводе. Температура измеряется с помощью термопары, размещенной на теплопроводе вблизи керамики. Спектры рентгеновского излучения измерялись с помощью рентгеновского спектрометра, состоящего из рентгеновского детектора Amptek XR-100T-CdTe ( $5 \times 5 \times 1$  mm) и цифрового процессора импульсов PX4, соединенного с компьютером. Бериллиевое входное окно детектора толщиной  $100 \mu\text{m}$  было введено в вакуумную камеру. Расстояние между бериллиевым окном и свободным основанием керамики было  $20$  mm. Схема установки показана и более подробно описана в [4].

В эксперименте мы наблюдали рентгеновское излучение при изменении температуры керамики цирконат-титанат-борат свинца (ЦТБС-3М). Обычно этот материал применяется как пьезоэлектрик, но в настоящей работе мы использовали его пироэлектрические свойства. Керамика производилась в виде цилиндров длиной  $15$  mm и диаметром  $6.4$  mm и была поляризована вдоль оси цилиндра. Эксперименты проводились с цилиндрами длиной  $15$  и  $30$  mm. Последний склеивался из двух последовательно соединенных цилиндров длиной  $15$  mm с помощью

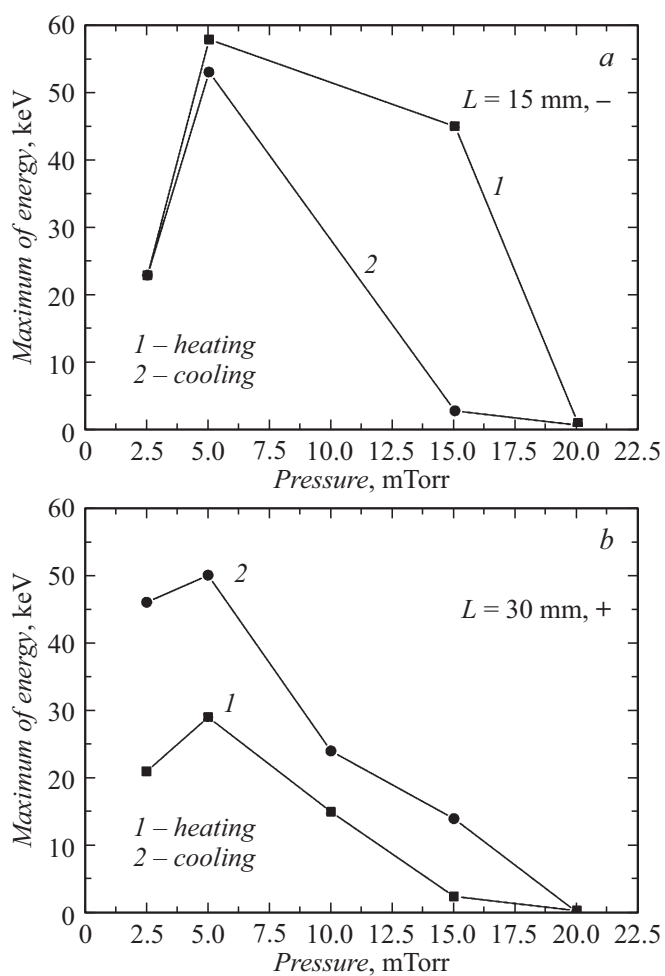
2\* Письма в ЖТФ, 2018, том 44, вып. 2



**Рис. 1.** Спектр рентгеновского излучения, измеренный в течение одного цикла нагрева керамики длиной  $L = 15$  mm в ориентации „-“ при давлении остаточного газа 5 mTorr.

эпоксидного проводящего клея. Цилиндры устанавливались в камеру в двух противоположных ориентациях (направлениях вектора поляризации керамики), чтобы обеспечить появление положительного заряда на свободном основании цилиндра при нагреве и отрицательного при охлаждении (ориентация „-“), а также чтобы обеспечить появление отрицательного заряда на свободном основании цилиндра при нагреве и положительного при охлаждении (ориентация „+“). Ориентации указаны знаками на рис. 1–3.

Измерения спектров рентгеновского излучения выполнялись в течение времени однократного нагрева или охлаждения керамики. Длительность нагрева керамики от  $-50$  до  $+85^\circ\text{C}$  составляла около



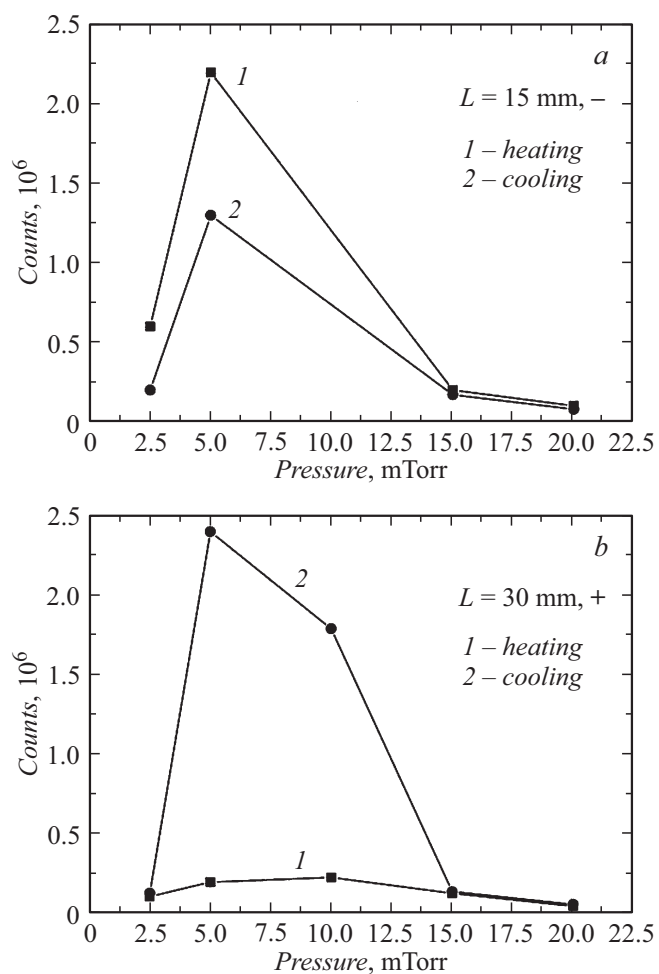
**Рис. 2.** Максимальная энергия рентгеновского тормозного излучения и ускоренных электронов, измеренная при нагреве и охлаждении керамического цилиндра длиной 15 mm (ориентация „-“) (a) и 30 mm (ориентация „+“) (b) в зависимости от давления остаточного газа в камере.

15 min, а длительность охлаждения от +85 до  $-50^{\circ}\text{C}$  около 30 min. Спектры измерялись при нескольких давлениях остаточного газа с использованием керамики длиной 15 mm в ориентации „–“ и длиной 30 mm в ориентации „+“. Типичный спектр, измеренный при нагреве керамики длиной 15 mm, показан на рис. 1.

Рассмотрим рентгеновское излучение при положительном заряде на свободном основании цилиндра. Такой заряд возникает при нагревании керамики в ориентации „–“ и охлаждении в ориентации „+“. Электроны из остаточного газа ускоряются в электрическом поле заряда и попадают на поверхность керамики. При этом они производят тормозное излучение и возбуждают характеристическое рентгеновское излучение атомов керамики. В типичном спектре, показанном на рис. 1, видны пики характеристического излучения на плавном фоне тормозного излучения. Спектральный пик с энергией 2.3 keV соответствует *L*-линиям Zr и *M*-линиям Pb, пик с энергией 4.5 keV отвечает *K*-линиям Ti и *L*-линиям Ba, пики с энергиями 10.5, 12.6 keV возникают благодаря *L*-линиям Pb. Спектральные пики *K*-излучения Zr, Ba, Pb не видны из-за ограниченной энергии ускоренных электронов и значительного фона тормозного излучения. Максимальная энергия тормозного излучения достигает около 60 keV.

Рассмотрим рентгеновское излучение при отрицательном заряде на свободном основании цилиндра. Такой заряд возникает при охлаждении керамики в ориентации „–“ и при нагревании в ориентации „+“. Электроны с поверхности керамики ускоряются в электрическом поле этого заряда и попадают в бериллиевое окно детектора и в стенки камеры, изготовленной из нержавеющей стали. При этом они производят тормозное излучение и возбуждают характеристическое излучение атомов нержавеющей стали. В спектрах наблюдаются слабые пики характеристического излучения на плавном фоне тормозного излучения. Пики с энергиями 5.4, 6.4, 7.5 keV возникают благодаря *K*-излучению элементов Cr, Fe, Ni, входящих в состав нержавеющей стали. Более подробно измеренные спектры представлены в [4].

Максимальную энергию тормозного излучения, наблюдаемого в спектрах, можно использовать для прямой оценки максимальной энергии ускоренных электронов, потому что она не может превышать энергию ускоренных электронов. В измеренных спектрах максимальная энергия тормозного излучения и суммарное число счетов в спектрах существенно зависят от давления остаточного газа в камере ускорителя.



**Рис. 3.** Суммарное число счетов в спектрах рентгеновского излучения, измеренных в течение одного цикла нагрева и охлаждения керамического цилиндра длиной 15 мм (ориентация „-“) (a) и 30 мм (ориентация „+“) (b) в зависимости от давления остаточного газа в камере.

Результаты измерений максимальной энергии тормозного излучения и ускоренных электронов показаны на рис. 2 для обоих образцов керамики. Результаты измерений суммарного числа квантов, зарегистрированных спектрометром, приведены на рис. 3 для обоих образцов керамики.

Из рис. 2,3 видно, что максимальная энергия и суммарное число квантов немонотонно зависят от давления остаточного газа. Обе зависимости имеют максимумы в области около 5 mTorr. Эти максимумы аналогичны наблюдаемым в экспериментах с пироэлектрическими ускорителями на основе пироэлектрических кристаллов, (см., например, [2,3]).

Наши эксперименты показывают, что пироэлектрическую керамику можно успешно использовать для генерации рентгеновского излучения. Для оптимизации применения пироэлектрической керамики в пироэлектрическом генераторе рентгеновского излучения следует провести экспериментальные исследования его свойств с различными типами керамики и определить наилучший для генерации тип керамики. Недавно такие эксперименты были начаты с керамикой цирконата-титаната свинца (ЦТС-19) в пироэлектрическом генераторе [5]. Однако эта керамика показала худшие результаты по сравнению с ЦТБС-3М. По-видимому, в пироэлектрическом ускорителе следует применять керамику с наибольшим отношением пироэлектрического коэффициента к диэлектрической проницаемости.

Обсудим некоторые перспективы применения керамики в пироэлектрическом генераторе. Керамика в отличие от кристаллов может быть произведена в произвольной форме и поляризована в произвольном направлении. Поэтому керамические элементы различной формы могут быть использованы в конструкции пироэлектрического генератора. Например, сферические или цилиндрические слои радиально поляризованной керамики можно использовать для построения сферического или цилиндрического генератора. По-видимому, сферический или цилиндрический генератор может обеспечить более высокую энергию и ток ускоренных электронов, а также повышенный выход рентгеновского излучения. Возможно также применение пироэлектрической керамики в недавно предложенном пироэлектрическом ондуляторе [6] и дефлекторе пучка заряженных частиц [6,7].

Работа соавторов из НИУ БелГУ выполнена при поддержке проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (грант № 3.1631.2017/ПЧ).

## Список литературы

- [1] *Brownridge J.D.* // Nature. 1992. V. 358. P. 287–288.
- [2] *Brownridge J.D., Shafrath S.M.* // Trends in lasers and electro-optics research / Ed. W.T. Arkin. N.Y.: Nova Science Publ., 2004. P. 57.
- [3] *Нагайченко В.И., Сотников В.В., Иванов Б.И., Егоров А.М., Щагин А.В.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. № 3. С. 81–89.
- [4] *Shchagin A.V., Miroshnik V.S., Volkov V.I., Oleinik A.N.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 107. P. 233505.
- [5] *Вохмянина К.А., Иващук О.О., Иониди В.Ю., Каплий А.А., Кицин И.А., Ключев А.С., Кубанкин А.С., Мишунин М.В., Назмудинов Р.М., Никулин И.С., Олейник А.Н., Сотников А.В., Чепурнов А.С., Щагин А.В.* // Стекло и керамика. 2016. № 11. С. 27–31.
- [6] *Oleinik A.N., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M., Vokhtyanina K.A., Shchagin A.V., Karataev P.V.* // JINST. 2016. V. 11. P. P08007.
- [7] *Кубанкин А.С., Олейник А.Н., Щагин А.В.* Пироэлектрический дефлектор пучка заряженных частиц. Патент RU 156716 U1. Зарегистрировано: 19.10.2015;  
[http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet?DB=RUPM&DocNumber=156716](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=156716)