

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 537.533.79

ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ,
ИХ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

© 2021 г. О. О. Иващук^{a, b, *}, А. В. Щагин^{a, c}, А. С. Кубанкин^{a, b}, И. А. Кищин^{a, b},
А. Н. Олейник^{a, d}, Ю. В. Григорьев^e, М. Э. Гильц^a, В. И. Алексеев^b, А. Н. Елисеев^b

^aМеждународная научно-образовательная лаборатория радиационной физики НИУ БелГУ, Белгород, 308015 Россия

^bФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

^cНациональный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Харьков, 61000 Украина

^dКолледж Ройял Холлоуэй, Лондонский университет, Эгам, Суррей, TW20 0EX, Великобритания

^eИнститут кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, 119333 Россия

*E-mail: ooleg.ivashuk@gmail.com

Поступила в редакцию 02.06.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В работе представлено описание современных пироэлектрических технологий. Приведены различные схемы генерации рентгеновского излучения. Продемонстрирована возможность управления пучками заряженных частиц с помощью пироэлектрического дефлектора. Обсуждаются перспективы развития пироэлектрических технологий и их применения.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, пироэлектрический источник, пироэлектрический дефлектор

DOI: 10.56304/S2079562920060287

1. СХЕМА РАБОТЫ
ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Впервые возможность генерации рентгеновского излучения с использованием пироэлектрического эффекта в вакууме обнаружил Д. Браунридж в 1992 г. [1]. Основываясь на результатах многочисленных экспериментальных исследований [2–5], фирма Amptek разработала коммерческий пироэлектрический источник рентгеновского излучения [6]. На рис. 1 представлена схема работы такого источника. Пироэлектрический кристалл расположен в миниатюрной вакуумной камере на изолирующей подложке, которая может нагреваться и охлаждаться. Напротив его рабочей поверхности установлена мишень из медной фольги. В случае нагрева подложки пироэлектрического кристалла на его свободной поверхности образуется высокий отрицательный потенциал, порядка -30 кВ, что приводит к возникновению электронной эмиссии. Свободные электроны ускоряются от рабочей поверхности пироэлектрического кристалла к медной мишени. При взаимодействии ускоренных электронов с атомами мишени генерируется рентгеновское излучение. В случае охлаждения пироэлектрический кристалл переполаризовывается, что приводит к возникновению свободных электронов в облаке ионизированного газа во-

круг его рабочей поверхности. В этом случае мишенью становится сам кристалл.

Такой источник работает в квазинепрервном режиме генерации рентгеновского излучения. Продолжительность одного цикла нагрев-охлаждение пироэлектрического кристалла составляет около 3 мин (рис. 2). Контролировать и изменять спектральные характеристики рентгеновского

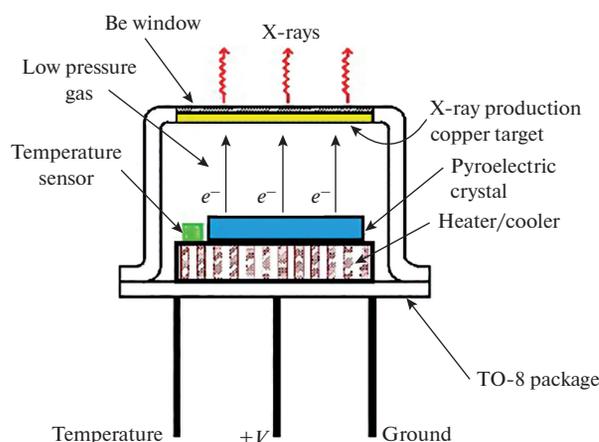


Рис. 1. Схема работы пироэлектрического источника рентгеновского излучения Amptek COOL-X [6].

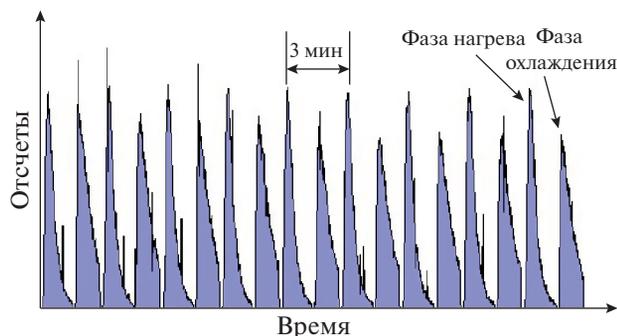


Рис. 2. Зависимость выхода рентгеновского излучения в источнике Amptek COOL-X от времени при циклическом изменении температуры кристалла [6].

излучения в таком источнике не представляется возможным.

2. ИМПУЛЬСНЫЙ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В лаборатории радиационной физики НИУ «БелГУ» был разработан импульсный пироэлектрический источник рентгеновского излучения [7]. На рис. 3 представлена схема работы такого источника (рис. 3а) и спектры рентгеновского излучения в квазинепрерывном режиме генерации по

схеме рис. 1 (рис. 3б) и импульсном режиме генерации по схеме рис. 3а (рис. 3в).

Импульсный пироэлектрический источник рентгеновского излучения содержит дополнительный эмиттер электронов — вольфрамовая нить накаливания (5). В условиях высокого вакуума пироэлектрический кристалл (1) предварительно нагревался с помощью полупроводникового [8] диода (3), что приводило к образованию высокого положительного электрического потенциала на его свободной поверхности. Затем, через нить накаливания (5) пропусклся ток около 0.3 А, что провоцировало процесс электронной эмиссии. Свободные электроны, ускоренные в электрическом поле, достигнув рабочей поверхности пироэлектрического кристалла (1), компенсируют положительный заряд. Данный процесс сопровождался интенсивной генерацией рентгеновского излучения в течение 1 с.

На рис. 3б и 3в продемонстрированы спектры рентгеновского излучения, измеренные в процессе предварительного нагрева кристалла, и при его последующей разрядки. Количество зарегистрированных квантов рентгеновского излучения за 1 с в случае работы источника в импульсном режиме превышает значение аналогичной характеристики излучения, генерирующегося при квазинепрерывном режиме работы более чем на два порядка.

Стоит отметить, также, что импульсный пироэлектрический источник потенциально обладает

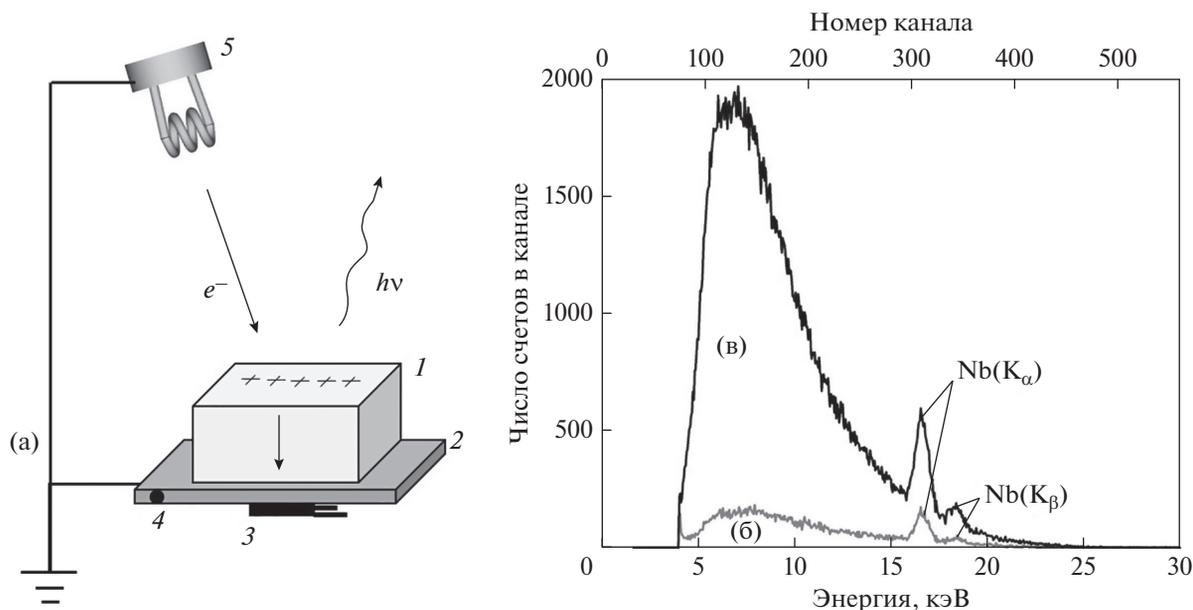


Рис. 3. Импульсный пироэлектрический источник рентгеновского излучения: (а) схема работы источника (1 — пироэлектрический кристалл, 2 — алюминиевый теплопроводник, 3 — кремниевый диод, 4 — термопара, 5 — эмиттер электронов); (б) спектр рентгеновского излучения, генерирующегося при квазинепрерывном режиме работы пироэлектрического источника по схеме рис. 1; (в) спектр рентгеновского излучения, генерирующегося в импульсном режиме работы источника.

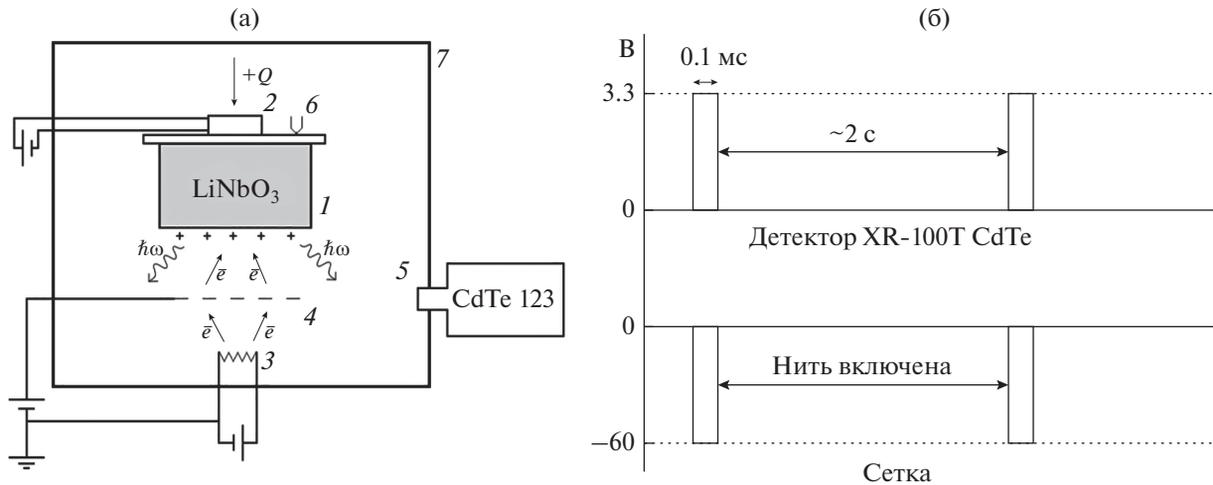


Рис. 4. Импульсный пироэлектрический источник рентгеновского излучения с регулируемой продолжительностью генерации: (а) схема работы источника (1 – пироэлектрический кристалл, 2 – кремниевый диод, 3 – дополнительный эмиттер электронов, 4 – сеточный электрод, 5 – полупроводниковый детектор рентгеновского излучения, 6 – термопара, 7 – вакуумная камера); (б) режим работы детектора рентгеновского излучения и сеточного электрода по схеме совпадений.

возможностью изменения величины интенсивности генерируемого им излучения за счет варьирования напряжения питания дополнительного эмиттера электронов. Однако, увеличение граничной энергии рентгеновского излучения, генерирующегося при работе пироэлектрического источника в импульсном режиме, не наблюдается.

3. ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Существенным недостатком, предложенной в главе 2, конфигурации пироэлектрического источника является отсутствие возможности контролируемого изменения продолжительности генерации рентгеновского излучения. Данная проблема может быть решена путем внедрения в конструкцию импульсного источника дополнительного сеточного электрода [9]. На рис. 4а представлена схема работы такого источника. Сеточный электрод (4), расположен между эмиттером электронов (3) и свободной поверхностью пироэлектрического кристалла (1). Сеточный электрод в такой конфигурации источника является неким подобием “крана”, который в открытом состоянии (пропускающее напряжение) пропускает поток электронов, ускоренных от нити накаливания к пироэлектрическому кристаллу, а в закрытом (запирающее напряжение) полностью его блокирует. Принцип работы такого устройства сравним с принципом работы триодной вакуумной лампы. Таким образом, периодическое изменение полярности напряже-

ния на сеточном электроде (рис. 4б) позволит наблюдать рентгеновское излучение, продолжительность генерации которого зависит от ширины импульса пропускающего напряжения.

Другой интересной возможностью касательно генерации коротких импульсов рентгеновского излучения является использование наносекундного лазера. В этом случае конструкция пироэлектрического источника претерпит значительные изменения: вместо системы контроля продолжительности генерации излучения (нить накаливания и сеточный электрод) планируется использовать заземленный фотокатод и короткоимпульсный лазер. В такой конфигурации источник будет способен генерировать сверхкороткие импульсы рентгеновского излучения длительностью несколько наносекунд.

4. ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДВУХ КРИСТАЛЛАХ

Схему работы пироэлектрического источника рентгеновского излучения на двух кристаллах впервые предложил Данон [10]. При проведении первых тестовых экспериментов он обнаружил генерацию рентгеновских лучей с рекордным на тот момент значением граничной энергии порядка 160 кэВ. Отметим, что от величины граничной энергии рентгеновского излучения напрямую зависит его проникающая способность.

Рассмотрим принцип работы источника (рис. 5). Два пироэлектрических кристалла (1), распо-

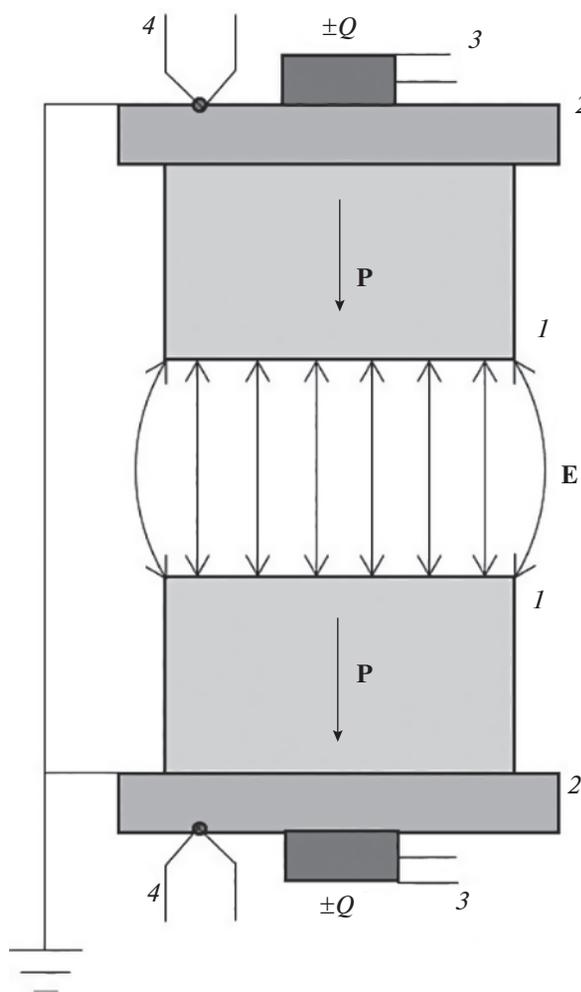


Рис. 5. Схема работы пироэлектрического источника рентгеновского излучения на двух кристаллах (1 – пироэлектрический кристалл ниобата лития, 2 – металлическая подложка, 3 – нагревательный элемент, 4 – термопара).

жены на одной оси параллельно друг другу. Вектора спонтанной поляризации каждого пироэлектрика сонаправлены и коллинеарны. Одновременный нагрев обоих кристаллов приводит к образованию противоположного заряда на свободных поверхностях каждого из них. Охлаждение сопровождается переполаризацией каждого кристалла. В такой схеме разность потенциалов между кристаллами в два раза превышает аналогичную характеристику поля между кристаллом и мишенью в однокристалльном пироэлектрическом источнике. Генерация рентгеновского излучения происходит вследствие бомбардировки, ускоренными свободными электронами от отрицательной поверхности одного кристалла, положительно заряженной поверхности другого кристалла.

5. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ОТКЛОНЯЮЩИЕ И ФОКУСИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Данон, предложивший в 2005 г. схему пироэлектрического источника рентгеновского излучения на двух кристаллах, даже не подозревал, что своим техническим решением, он породил новое научное направление – электростатические отклоняющие и фокусирующие системы на основе пироэлектрического эффекта. Сотрудниками лаборатории радиационной физики НИУ “БелГУ” в 2015 г. было положено начало развития данного направления.

5.1. Пироэлектрический дефлектор пучка нерелятивистских электронов

В лаборатории радиационной физики НИУ “БелГУ” был разработан пироэлектрический генератор сильного электрического поля. В 2016 году запатентована идея создания пироэлектрического дефлектора пучка заряженных частиц [11]. В работе [12] исследовалась возможность отклонения пучка нерелятивистских электронов с помощью пироэлектрического дефлектора. Для исследования была разработана экспериментальная установка, представленная на рис. 6а. Пучок электронов (1) проходил через диафрагму (2) и между пироэлектрическими кристаллами ниобата лития (3), которые предварительно были нагреты элементами Пельтье (4). На люминофорном экране (5) с помощью веб-камеры (6) было зафиксировано отклонение пучка электронов с энергией 30 кэВ в поперечном электрическом поле пироэлектрического дефлектора на угол 10.6° относительно его первоначального направления (рис. 6б) при изменении температуры пироэлектрических кристаллов в вакууме на 1.5°C .

Предложенный вариант исполнения пироэлектрического дефлектора заряженных частиц имеет такие конструктивные несовершенства как: слабые нагреватели, малые размеры пироэлектрика от которых напрямую зависит величина электрического заряда, образующегося на их поверхности. Для реализации отклонения пучка релятивистских электронов требуется существенная модернизация пироэлектрического дефлектора первого поколения.

5.2. Пироэлектрический дефлектор пучка релятивистских электронов

В лаборатории радиационной физики НИУ “БелГУ” был разработан и изготовлен новый тип дефлектора пучка релятивистских электронов второго поколения. В качестве нагревателя пироэлектрического кристалла служил полупроводниковый диод, обеспечивающий изменение температу-

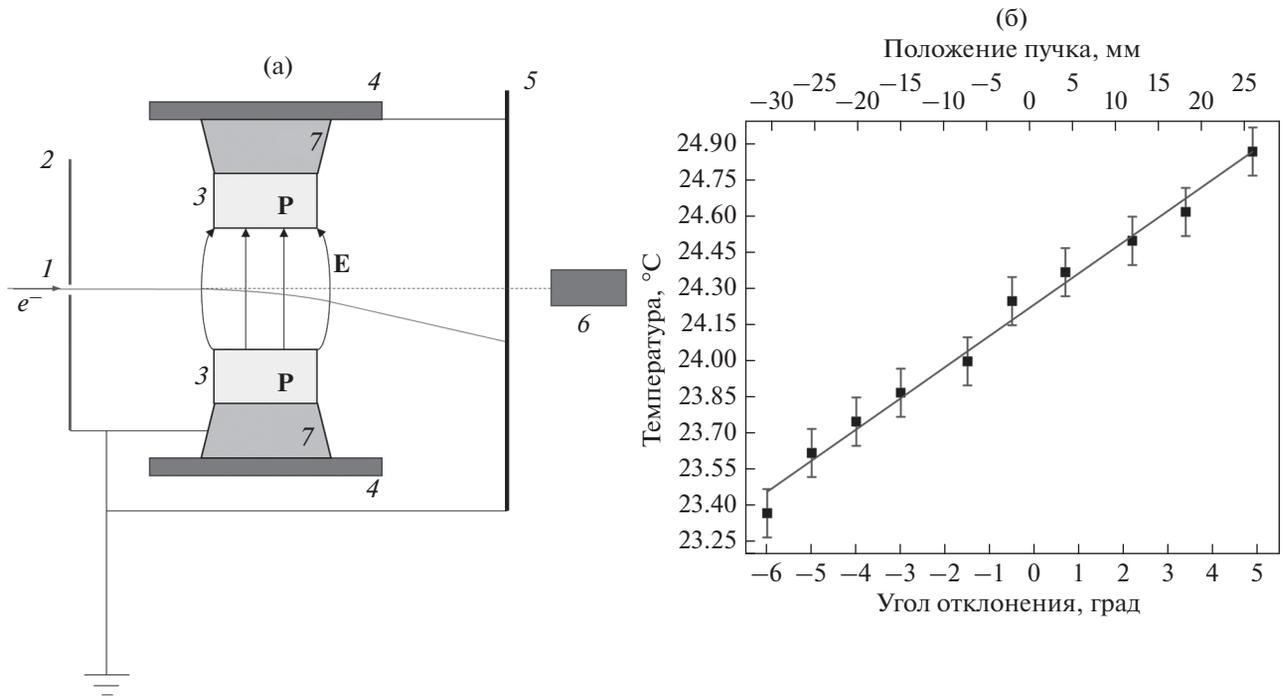


Рис. 6. Исследование возможности отклонения пучка электронов пироэлектрическим дефлектором: (а) схема экспериментальной установки; (б) результаты экспериментальных исследований.

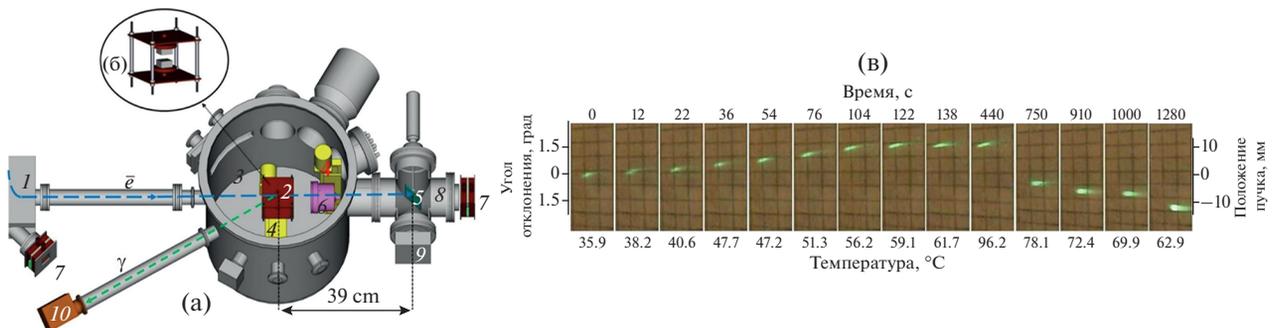


Рис. 7. Испытания пироэлектрического дефлектора пучка релятивистских электронов с энергией 7 МэВ на установке “Рентген 1”: (а) экспериментальная установка; (б) пироэлектрический дефлектор; (в) результаты экспериментальных исследований.

ры в широком диапазоне температур (несколько десятков °C). Первые экспериментальные исследования возможности отклонения пучка релятивистских электронов с помощью пироэлектрического дефлектора второго поколения были выполнены на установке “Рентген 1” (рис. 7а) [13]. Пучок электронов с энергией 7 МэВ транспортируется по электропроводу в вакуумную камеру (3), на центральной оси которой расположен пироэлектрический дефлектор (рис. 7б) второго поколения (2). При работе пироэлектрического дефлектора пучок релятивистских электронов с энергией 7 МэВ, пройдя через промежуток между пироэлектрическими кристаллами, претерпевал

отклонение относительно направления его начальной траектории. Результаты экспериментальных исследований (рис. 7в), подтверждают возможность отклонения пучка релятивистских электронов с энергией 7 МэВ в электрическом поле пироэлектрического дефлектора напряженностью порядка 100 кВ/см, на угол 1.45° при изменении температуры пироэлектрических кристаллов в вакууме на 20°C [14].

Любопытным экспериментальным фактом в этом эксперименте является длительная стабилизация электрического поля при последующем нагреве пироэлектрических кристаллов после достижения их температуры 56.2°C. Выяснение природы

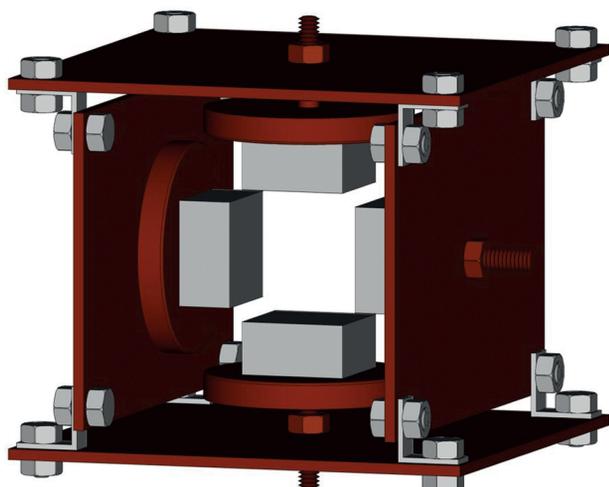


Рис. 8. Квадрупольная пироэлектрическая линза.

данного физического явления требует дальнейших экспериментальных исследований.

5.3. Дальнейшие пути развития пироэлектрического дефлектора

Экспериментально продемонстрированная возможность отклонения пучков заряженных частиц с помощью пироэлектрического дефлектора позволяет говорить о больших перспективах его применения в ускорительной технике.

В современном мире электронная оптика базируется преимущественно на магнитных системах [15–17]. Однако такие системы не лишены недостатков: необходимость в обеспечении системы охлаждения и стабилизации тока для их работы, большие массогабаритные характеристики. В 2017 г. в лаборатории радиационной физики

НИУ “БелГУ” была предложена идея о создании квадрупольной электростатической линзы на основе пироэлектрического дефлектора (рис. 8) [18]. Она представляет собой два расположенных перпендикулярно друг другу пироэлектрических дефлектора. Для полноценной фокусировки пучка электронов требуется пара квадрупольных пироэлектрических линз, развернутых друг относительно друга на 90° вокруг оси, проходящей через их центры.

Пик развития пироэлектрического дефлектора придется на тот момент, когда на его основе будет создан пироэлектрический источник ондуляторного излучения рис. 9 [19]. Пироэлектрический ондулятор представляет собой серию расположенных последовательно пироэлектрических дефлекторов. Направление силовых линий электрических полей в соседних дефлекторах противоположно. Пучок электронов движется по синусоидальной траектории в пироэлектрическом ондуляторе. Потеря энергии электронов при изменении его траектории сопровождается когерентным излучением, распространяющегося в виде узкого конуса вдоль оси пучка. По предварительным теоретическим оценкам в электрическом поле напряженностью около 100 кВ/см ожидается генерация ондуляторного излучения в рентгеновском диапазоне при энергии электронов несколько сотен мегаэлектронвольт.

6. ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ДЛЯ СВЕРХНИЗКОФОНОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

На сегодняшний день существует острая необходимость в экологически чистых, миниатюрных, безопасных и легкоэксплуатируемых источниках быстрых нейтронов для калибровки сверхнизкофоновых детекторов [20].

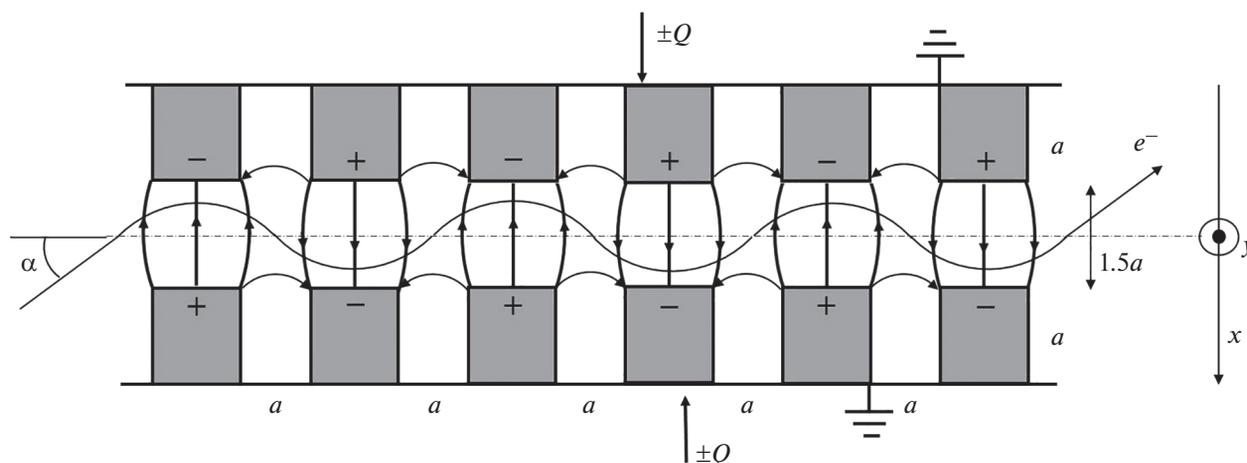


Рис. 9. Пироэлектрический источник ондуляторного излучения.

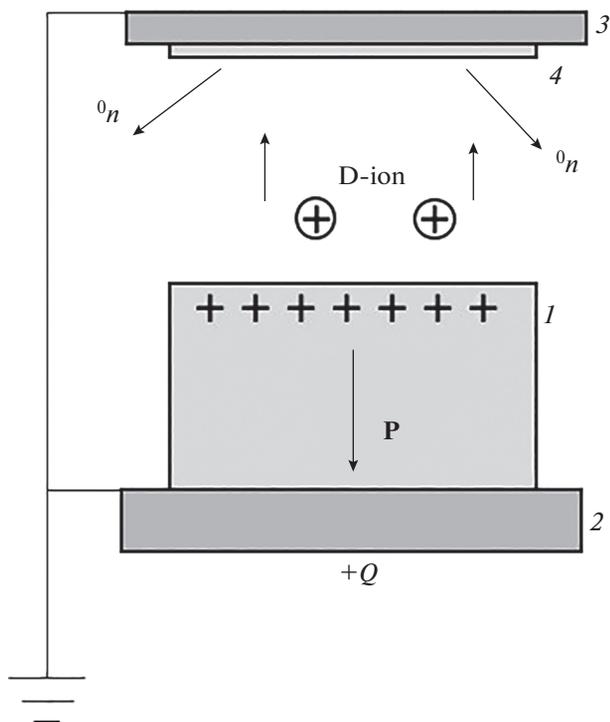


Рис. 10. Пироэлектрический генератор быстрых нейтронов.

В работе [21] исследовалась возможность генерации быстрых нейтронов с энергией 2.5 МэВ при работе двухкристального пироэлектрического источника заряженных частиц. С 2015 г. лаборатория радиационной физики НИУ “БелГУ” активно участвует в развитии направления разработки и создания миниатюрных источников быстрых нейтронов на основе пироэлектрического эффекта. В 2016 г. в работе [22] наблюдалась генерация быстрых нейтронов с энергией 2.45 МэВ и интенсивностью несколько десятков нейтронов в секунду при работе единственного кристалла в вакууме. Пироэлектрический нейтронный генератор, разработанный в лаборатории радиационной физики НИУ “БелГУ”, представлен на рис. 10. Пироэлектрический генератор быстрых нейтронов, включающий пироэлектрический кристалл (1), металлическую подложку (2), заземленную дейтерированную мишень (4) на титаниевой подложке (3), располагается в вакуумной камере. Кристалл ориентирован таким образом, что при его нагреве в вакууме на его свободной поверхности возникает положительный потенциал порядка +50 кВ. В сильном электрическом поле, образованном между поверхностью пирокристалла и дейтерированной мишенью, происходит ионизация атомов остаточного газа, в роли которого выступает дейтерий. Генерация нейтронов происходит вследствие D-D реакции при взаимодействии ускорен-

ных ионов дейтерия до энергий порядка 50 кэВ с дейтерированной заземленной мишенью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный обзор пироэлектрических технологий подтверждает возможность применения кристаллов, обладающих пироэлектрическим эффектом, в качестве основного элемента в конструкции генераторов рентгеновского излучения, ондуляторного излучения и быстрых нейтронов, а также позволяет говорить о больших перспективах развития направления создания и разработки пироэлектрических элементов для электронной и ионной оптики.

БЛАГОДАРНОСТИ

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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Brownridge J.D.* // Nature (London, U.K.). 1992. V. 358. P. 287.
2. *Brownridge J.D., Raboy S.* // J. Appl. Phys. 1999. V. 86. P. 640.
3. *Brownridge J.D., Shafroth S.M.* // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 3364.
4. *Brownridge J.D., Shafroth S.M.* // Appl. Phys. Lett. V. 85. P. 1298.
5. *Shafroth S.M., Kruger W., Brownridge J.D.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 1999. V. 422. P. 1.
6. <https://www.amptek.com/internal-products/obsolete-products/cool-x-pyroelectric-x-ray-generator>.
7. *Ivashchuk O.O., Shchagin A.V., Kubankin A.S., Ionidi V.Y., Chepurnov A.S., Miroshnik V.S., Volkov V.I., Lepeshkoe D.A.* // J. Instrum. 2020. V. 15. P. C02002.
8. *Ivashchuk O.O., Shchagin A.V., Kubankin A.S., Ionidi V.Y., Chepurnov A.S.* // Vopr. At. Nauki Tekh., Ser.: Yad. Issled. 2019. V. 6. P. 81.
9. *Ivashchuk O.O.* Proc. 14th Cherenkov’s Readings. 2021 (in Russian).
10. *Geuther J.A., Danon Y.* // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. P. 104916.
11. *Kubankin A.S., Oleinik A.N., Shchagin A.V.* RF Patent No. RU156716U1. 2015.
12. *Oleinik A.N., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M., Vokhmyanina K.A., Shchagina A.V., Karataev P.V.* // J. Instrum. 2016. V. 11. P. 08007.
13. *Alexeyev V.I., Astapenko V.A., Eliseyev A.N., Irribarra E.F., Karpov V.A., Kishchin I.A., Krotov Yu. A., Kubankin A.S., Nazhmudinov R.M., Al-Omari M., Sakhno S.V.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotr. Neutron Tech. 2017. V. 7. P. 13.

14. *Ivashchuk O.O., Shchagin A.V., Kubankin A.S., Kishin I.A., Alekseev V.I., Oleinik A.N., Eliseev A.N.* // Channeling. 2018. V. 2018. P. 212.
15. *Lim J.K., Frigola P., Travish G., Rosenzweig J.B.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2005. V. 8. P. 072401.
16. *Oku T., Suzuki J., Sasao H., Yamada S., Furusaka M., Adachi T., Shinohara T., Ikeda K., Shimizu H.M.* // Phys. B. (Amsterdam, Neth.). 2005. V. 356. P. 126.
17. *Oku T., Kira H., Shinohara T., Takata S., Arai M., Suzuki J., Shimizu H.M.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. V. 251. P. 012078.
18. *Oleinik A.N., Kubankin A.S., Shchagin A.V., Kaplii A.A.* RF Patent No. RU175484U1. 2017.
19. *Kaplii A.A., Oleinik A.N., Kubankin A.S., Shchagin A.V.* RF Patent No. RU168703U1. 2016.
20. *Bondar A.E.* // Vestn. NGU. Ser.: Fiz. 2013. No. 8. P. 27.
21. *Geuther J.A., Danon Y., Saglime F.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 054803.
22. *Chepurinov A.S., Ionidi V.Y., Gromov M.B., Kirsanov M.A., Klyuyev A.S., Kubankin A.S., Oleinik A.N., Shchagin A.V., Vokhmyanina K.A.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798. P. 012119.

Pyroelectric Technologies, Their Applications and Prospects for the Development

O. O. Ivashchuk^{1, 2, *}, A. V. Shchagin^{1, 3}, A. S. Kubankin^{1, 2}, I. A. Kishin^{1, 2}, A. N. Oleinik^{1, 4}, Yu. V. Grigor'ev⁵, M. E. Gilts¹, V. I. Alekseev², and A. N. Eliseev²

¹Laboratory of Radiation Physics, Belgorod National Research University, Pobedy str. 85, Belgorod, 308015 Russia

²Department of High Energy Physics, Lebedev Physical Institute, Leninskiy ave. 53, Moscow, 119991 Russia

³Institute of Plasma Electronics and New Methods of Acceleration, Kharkov Institute of Physics and Technology, Akademicheskaya str. 1, Kharkov, 61000 Ukraine

⁴John Adams Institute at Royal Holloway, University of London, Egham, Surrey, TW20 0EX United Kingdom

⁵Shubnikov Institute of Crystallography, Federal Scientific Research Centre "Crystallography and Photonics", Russian Academy of Sciences, Leninskiy ave. 59, Moscow, 119333 Russia

*e-mail: ooleg.ivashuk@gmail.com

Received June 2, 2021; revised June 15, 2021; accepted June 16, 2021

Description of modern pyroelectric technologies is presented in this article. Various schemes for generating X-ray radiation are presented. The possibility of controlling charged particle beams by means of a pyroelectric deflector is demonstrated. The prospects for the development of pyroelectric technologies and their application are discussed.

Keywords: X-ray radiation, pyroelectric source, pyroelectric deflector