

# Трехэлектродный импульсный пьезоэлектрический источник рентгеновского излучения

О.О. Ивашук<sup>1,3)</sup> А.В. Щагин<sup>1,2)</sup> А.С. Кубанкин<sup>1,3)</sup> М.Э. Гильц<sup>1)</sup> А.Н. Олейник<sup>1,4)</sup>

1) БелГУ, Белгород, Россия

2) ХФТИ, Харьков, Украина

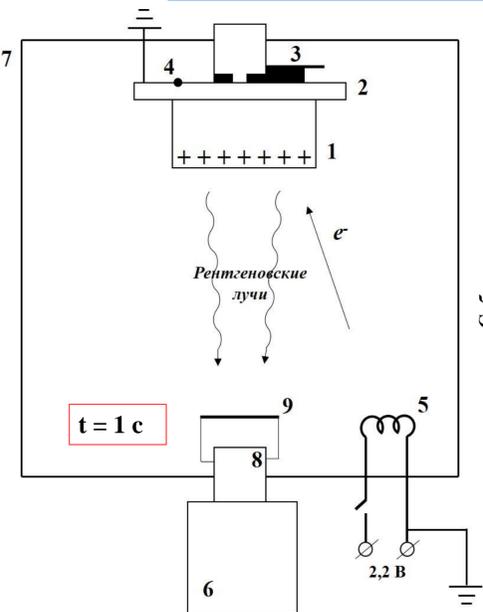
3) ФИАН имени П.Н. Лебедева, РАН, Москва, Россия

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

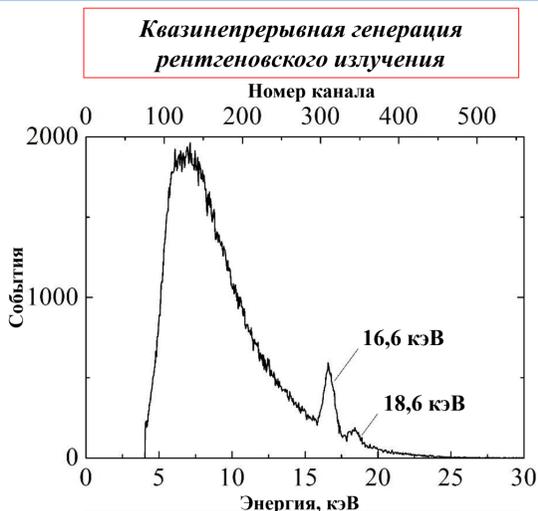
**В работе исследуется возможность управления потоком и продолжительностью генерации рентгеновского излучения при работе пьезоэлектрического импульсного ускорителя в вакууме за счет внедрения в его конструкцию дополнительного сеточного электрода, на котором генерируется переменное напряжение.**

Стандартная конфигурация пьезоэлектрического источника подразумевает наличие в его конструкции единственного пьезоэлектрического кристалла и заземленной мишени, расположенной напротив его рабочей поверхности [1,2]. Такой малогабаритный генератор работает в квазипрерывном режиме, периодически испытывая термическое воздействие в вакууме, которое сопровождается выделением или же поглощением некоторого количества теплоты. Продолжительность одного цикла нагрев-охлаждение в таком приборе составляет около 3 минут. Управление величиной потока рентгеновского излучения и продолжительностью его генерации в таком источнике возможно в крайне ограниченном диапазоне. В работе [3] представлены результаты экспериментальных исследований импульсной генерации рентгеновского излучения при работе пьезоэлектрического ускорителя, дополнительно оснащенного вольфрамовым катодом, в вакууме. Продолжительность генерации составляла около нескольких секунд. Данная величина может варьироваться за счет изменения величины напряжения питания катода от 0 до 6 В. Стоит отметить, что величина пиковой интенсивности рентгеновского излучения, генерирующегося в пьезоэлектрическом ускорителе с дополнительным эмиттером электронов превышает на несколько порядков аналогичную величину рентгеновского излучения, испускаемого стандартным пьезоэлектрическим источником. В настоящей работе предложена трехэлектродная конфигурация исполнения пьезоэлектрического ускорителя с дополнительным сеточным электродом, расположенным между пьезоэлектрическим кристаллом и вольфрамовым катодом. Предполагается наблюдение короткоимпульсной интенсивной генерации рентгеновского излучения вследствие пьезоэлектрического эффекта в вакууме.

## Первые эксперименты в направлении создания импульсных пьезоэлектрических источников



**Рисунок 1 – Схема эксперимента по исследованию импульсной генерации рентгеновского излучения при пьезоэлектрическом эффекте в вакууме** (1 – пьезоэлектрический кристалл  $\text{LiNbO}_3$ , 2 – алюминиевый тепловой проводник, 3 – кремниевый диод MUR 1560, 4 – термопара типа, 5 – нить накала, 6 – полупроводниковый детектор рентгеновского излучения, 7 – вакуумная камера, 8 – входное бериллиевое окно детектора рентгеновского излучения, 9 – майларовая фольга, установленная напротив входного окна детектора).

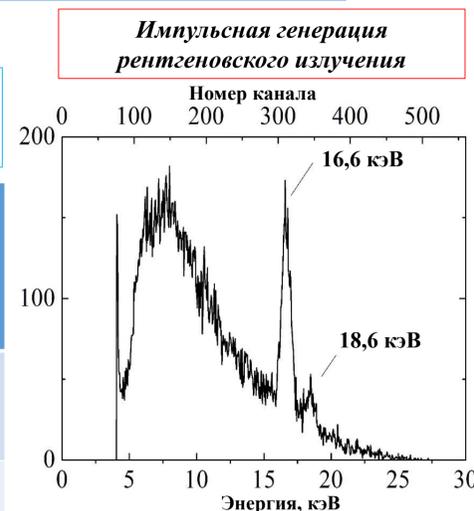


**Квазипрерывная генерация рентгеновского излучения**

**Рисунок 2 – Спектр рентгеновского излучения, измеренный в течение нагрева пьезоэлектрического кристалла перед включением катода**

**Сравнение характеристик рентгеновского, генерирующегося при различных режимах работы пьезоисточника**

Режимы работы	Интенсивность, N	max энергия, кэВ	Время измерений t, с	N/t
Квазипрерывный (а)	$3 \cdot 10^4$	30	300	$10^2$
Импульсный (б)	$3 \cdot 10^5$	30	5	$6 \cdot 10^4$



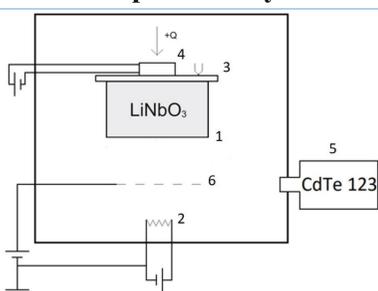
**Импульсная генерация рентгеновского излучения**

**Рисунок 3 – Спектр рентгеновского излучения, измеренный в процессе нагрева пьезоэлектрического кристалла после включения катода**

**Эксперимент.** Схема проведения экспериментальных исследований представлена на рисунке 1. Первоначально, пьезоэлектрический кристалл (1) претерпевал положительное изменение температуры посредством пропускания тока через кремниевый полупроводниковый диод (3) от 25 °С до 75 °С в течение 300 секунд, что приводило к образованию положительного заряда на свободной поверхности пьезоэлектрического кристалла. Свободные электроны, образованные в облаке ионизированных атомов остаточного газа в вакуумной камере вблизи рабочей поверхности пьезоэлектрического кристалла, испытывали ускорение в направлении положительно заряженной поверхности пьезоэлектрического кристалла. После чего на нить накала было подано напряжение. Возрастающий поток электронов от нити накала разряжал кристалл в течение 1 секунды и производил гораздо более интенсивный поток рентгеновского излучения.

**Результаты.** Спектр рентгеновского излучения, генерирующегося при торможении ускоренных электронов на атомах ниобия, представлен на рисунке 2. Такой режим генерации рентгеновского излучения назовем квазипрерывным. Спектр рентгеновского излучения, измеренный в течение 5 секунд разрядки пьезоэлектрического кристалла в вакууме показан на рисунке 3. Такой режим работы назовем импульсным. Проанализировав результаты экспериментальных исследований, можно заключить, что пиковая интенсивность рентгеновского излучения в импульсном режиме, превышает аналогичную характеристику излучения, генерирующегося в квазипрерывном режиме, в 600 раз.

## Короткоимпульсная генерация рентгеновского излучения при пьезоэлектрическом эффекте в вакууме

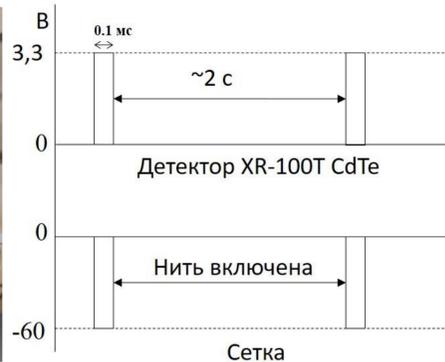


**Рисунок 4 – Схема эксперимента по исследованию короткоимпульсной генерации рентгеновского излучения при пьезоэлектрическом эффекте в вакууме** (1 – пьезоэлектрический кристалл  $\text{LiNbO}_3$ , 2 – вольфрамовый катод, 3 – теплопроводник, 4 – полупроводниковый кремниевый диод, 5 – детектор рентгеновского излучения, 6 – сеточный электрод)

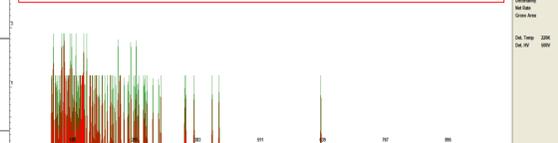
**Пьезоэлектрический вакуумный триод в МНОЛ радиационной физики НИУ «БелГУ»**



**Синхронизация работы детектора и источника питания сеточного электрода**



**Короткоимпульсная генерация рентгеновского излучения. Скорость счетов 63083 превышает в 6 раз предельное значение данной характеристики детектора. Время разрядки кристалла составляет 200 мкс.**



**Рисунок 5 – Спектр рентгеновского излучения, измеренный при работе пьезоэлектрического источника в короткоимпульсном режиме его генерации**

**Эксперимент.** На сеточный электрод подается переменное напряжение прямоугольной формы. Значение напряжения в течение отрицательного полупериода на сеточном электроде соответствует напряжению, при котором поток генерируемого рентгеновского излучения не отличается от фонового при включенной нити накаливания. Амплитуда прямоугольного импульса определяет величину пиковой интенсивности рентгеновского излучения, генерирующегося в течение положительного полупериода переменного напряжения прямоугольной формы. Продолжительность генерации рентгеновского излучения определяется шириной прямоугольного импульса отрицательного полупериода. На рисунке 5 представлены измеренный спектр рентгеновского излучения за время равное нескольким долям секунды в течение отрицательного полупериода переменного напряжения на сеточном катоде после предварительного нагрева пьезоэлектрического кристалла при одновременном включении нити накаливания.

### Заключение

**Обнаружена короткоимпульсная генерация рентгеновского излучения продолжительностью 200 мкс при реализации пьезоэлектрического эффекта в вакууме. Результаты проведенных исследований могут стать основой для создания универсальных, предназначенных для решения широкого спектра прикладных задач, миниатюрных пьезоэлектрических импульсных генераторов рентгеновского излучения с предусмотренной возможностью контролируемого изменения его спектральных характеристик.**

### Благодарность

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).

### Литература

- Brownridge, J.D. Pyroelectric x-ray generator / J.D. Brownridge // Nature. – 1992. – Vol. 358. – P. 277-278.
- <https://www.amptek.com/internal-products/cool-x-pyroelectric-x-ray-generator>
- Ivashchuk, O.O. Pyroelectric accelerator and X-ray source in pulsed mode / O.O. Ivashchuk, A.V. Shchagin, A.S. Kubanin, V.Y. Ionidi, A.S. Chepurnov, V.S. Miroshnik, V.I. Volkov and D. A. Lepeshko // JINST. – 2020. – Vol. 15. – P. C02002.