

## ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ

*В.И. Нагайченко, В.С. Мирошник, А.М. Егоров, А.В. Щагин*  
*Национальный научный Центр “Харьковский физико-технический институт”,*  
*Харьков, Украина*  
*E-mail: valnag@kipt.kharkov.ua*

Представлены результаты экспериментального исследования спектральных свойств пучков частиц, которые ускоряются в пироэлектрическом ускорителе. Описана методика измерений спектров пучка электронов и ионов с помощью поверхностно-барьерного детектора заряженных частиц. Обнаружено, что измеренный спектр электронов в одном интервале температур пироэлектрика имеет многопиковую структуру, а в другом интервале ускоренные электроны почти моноэнергетичны. Максимальная энергия в измеренном спектре ускоренных электронов достигает 360 кэВ, а ускоренных ионов 100 кэВ. Обсуждаются физические причины возникновения многопиковой и однопиковой структуры в спектре электронов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

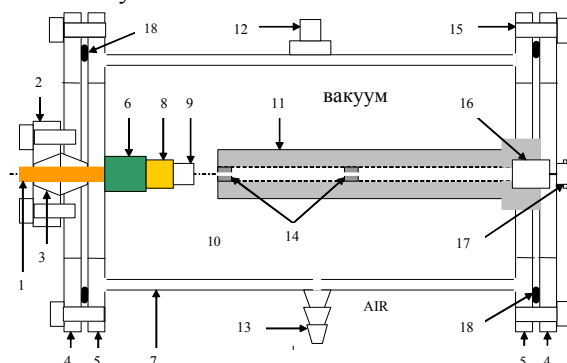
В работе [1] было обнаружено, что ток и энергия ускоренных электронов при изменении температуры пироэлектрика в вакууме существенно возрастают при давлении остаточного газа порядка нескольких мТорр и продемонстрирована генерация рентгеновского излучения такими электронами. Эта работа стимулировала исследования по применению пироэлектрических кристаллов в компактных пироэлектрических ускорителях электронов и ионов. Такие ускорители уже используются для генерации рентгеновского излучения [1-8, 11-14] с энергией до 100 кэВ и более, нейтронов с энергией  $E=2.45$  МэВ в D+D-реакции [9,10], а также для облучения материалов пучком электронов в воздухе [18]. Спектры пучков частиц в таких ускорителях сильно различаются в зависимости от условий эксперимента [3, 7, 8, 15-17]. В настоящей работе мы сообщаем об экспериментальных измерениях спектров пучков ионов и электронов, ускоренных в пироэлектрическом ускорителе, построенном на монокристалле  $\text{LiNbO}_3$ . Исследования выполнены на пироэлектрическом ускорителе в ИПЭНМУ ХФТИ, г. Харьков, Украина.

### 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из пироэлектрического ускорителя, коллимирующей системы и детектора частиц. Схема установки показана на Рис. 1.

Установка содержит следующие элементы: 1 – хладопровод, свободный конец которого помещен в жидкий азот; 2 – фланец, прижимающий вакуумно-плотную тefлоновую втулку 3; 4 – внешний фланец; 6 – нагревательный элемент; 7 – корпус камеры с приваренными фланцами 5; 8 – цилиндрическое медное основание, к которому приклеен пироэлектрический кристалл  $\text{LiNbO}_3$ ; 9; 10 – внутренний объём камеры; 11 – корпус системы коллиматоров; 12 – вакуумно-плотный разъём для питания нагревательного элемента 6 и вывода сигнала датчика температуры кристалла; 13 – штуцер для откачки внутреннего объёма камеры 10; 14 – передвижные коллима-

торы; 15 – крепёжные болты; 16 – поверхностно-барьерный полупроводниковый детектор, установленный в корпус коллиматоров; 17 – вакуумно-плотный разъём для вывода сигнала детектора; 18 – резиновые уплотнители.



*Рис. 1. Схема установки для проведения экспериментов по измерению спектров ускоренных электронов и ионов*

Основным элементом ускорителя является пироэлектрический кристалл  $\text{LiNbO}_3$  производства фирмы Crystal Technology Inc., высотой  $h=8$  мм и диаметром  $d=8$  мм. Система охлаждения и нагрева кристалла позволяет изменять его температуру в диапазоне  $-50...+100^\circ\text{C}$ . При нагревании на рабочей поверхности цилиндра кристалла вырабатывается положительный потенциал. При этом электроны с поверхности кристалла ускоряются электрическим полем вдоль оси камеры в промежутке между поверхностью кристалла и заземленным корпусом коллиматоров. Часть электронов проходит через систему коллиматоров и попадает в детектор. При охлаждении на рабочей поверхности цилиндра кристалла вырабатывается отрицательный потенциал. При этом положительно заряженные ионы остаточного газа (воздуха) из приповерхностной области кристалла ускоряются электрическим полем вдоль оси камеры в промежутке между поверхностью кристалла и корпусом коллиматоров. Часть ионов проходит через систему коллиматоров и попадает в детектор.

Система коллиматоров предназначена для снижения потока частиц на детекторе во избежание перегрузки спектрометра заряженных частиц. Коллиматоры представляют собой передвижные алюминиевые цилиндры диаметром 6 мм, длиной 4 мм и диаметром внутренних отверстий 1 мм. Расстояние от рабочей поверхности кристалла до поверхностей корпуса коллиматоров и первого коллиматора равно 11 мм. Расстояние между коллиматорами равно 15 мм. Расстояние от рабочей поверхности кристалла до поверхностно-барьерного детектора равно 65 мм. Низковольтное питание нагревательного элемента (6) и датчик для измерения температуры кристалла подключались через разъём (12). Внутренний объём камеры (10) откачивался до давления порядка 10 мТорр через штуцер (13).

Спектрометр заряженных частиц состоит из детектора, предусилителя, усилителя и анализатора. Сигнал с поверхностно-барьерного детектора (16) через вакуумно-плотный разъём (17) подавался на зарядово-чувствительный предусилитель и далее на спектрометрический усилитель-формирователь. Сигнал с выхода усилителя-формирователя поступал на вход многоканального амплитудного анализатора. Измеренный спектр частиц передавался из амплитудного анализатора на компьютер для дальнейшей обработки.

### 3. КАЛИБРОВКА СПЕКТРОМЕТРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В спектрометре заряженных частиц использовался поверхностно-барьерный полупроводниковый кремниевый детектор. Детектор имеет следующие характеристики: диаметр рабочей поверхности 5 мм, толщина чувствительной области до 300 мкм, рабочее напряжение до 500 В. Для получения наилучшего энергетического разрешения спектрометра было подобрано оптимальное рабочее напряжение питания детектора  $U_{\text{опт.}}=100$  В и оптимальные времена дифференцирования и интегрирования сигнала в спектрометрическом усилителе-формирователе  $t_{\text{диф.}}=t_{\text{инт.}}=0,8$  мкс.

Спектрометр калибровался с помощью радиоактивных источников. В качестве  $\alpha$ -источника использовался изотоп Cm-244 с периодом полураспада  $T_{1/2}=17,6$  лет, имеющий две наиболее интенсивные  $\alpha$ -линии:  $E_1=5763$  кэВ (23.6%) и  $E_2=5806$  кэВ (76.4%). При калибровке источник Cm-244 устанавливался на расстоянии 20 мм от детектора в вакуумной камере.

На Рис.2 показан результат измерения спектра  $\alpha$ -частиц от радиоактивного источника Cm-244 и пик от генератора стабильной амплитуды. Ширина на полувысоте пика от  $\alpha$ -частиц  $\Delta E_{\text{Cm-244}}=102$  кэВ в то время как ширина на полувысоте пика от генератора  $\Delta E_{\text{ген.}}=32,6$  кэВ. Такое различие связано с тем, что источник Cm-244 имеет конечную толщину и часть  $\alpha$ -частиц теряет энергию при прохождении слоя вещества до поверхности источника. В такой ситуации две линии с разностью энергий  $\Delta E=E_2-E_1=43$  кэВ дают один спектральный пик. Таким образом, наблюдаемая ширина пика от  $\alpha$ -частиц обусловлена разрешением источника, а не спектрометра. Ширина

пика от генератора  $\Delta E_{\text{ген.}}=32,6$  кэВ обусловлена электронными шумами предусилителя и детектора. Разрешение спектрометра для электронов с энергией десятки килоэлектронвольт не превышало 12 кэВ. В качестве второй точки для калибровки энергетической шкалы спектрометра использовалась  $\gamma$ -линия Am-241 с энергией 59.54 кэВ. Измеренная цена канала анализатора составила 0.984 кэВ/канал.

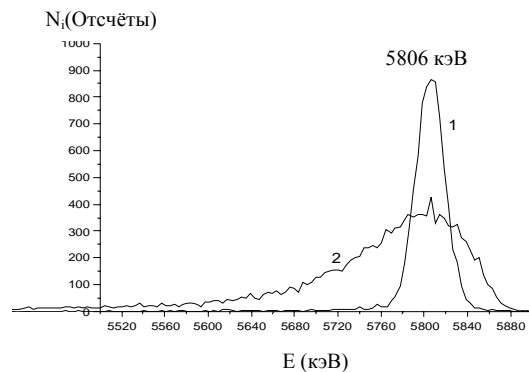


Рис.2. Пик, полученный от генератора стабильной амплитуды (1). Результат измерения спектра  $\alpha$ -частиц от радиоактивного источника Cm-244 (2)

### 4. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ ОТ КРИСТАЛЛА LiNbO<sub>3</sub>

В первых экспериментах мы наблюдали очень высокую загрузку спектрометра. Для уменьшения загрузки мы установили систему из двух коллиматоров, показанную на Рис.1. Измерения выполнялись в течение цикла нагрева и охлаждения кристалла.

В первой половине цикла кристалл нагревался от температуры  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  и при этом измерялся спектр электронов. Во второй половине цикла кристалл охлаждался от температуры  $+100^{\circ}\text{C}$  до  $-50^{\circ}\text{C}$  и при этом измерялся спектр ионов. Скорость нагрева регулировалась величиной напряжения, которое подавалось на нагревательный элемент, а скорость охлаждения оставалась неизменной. Спектры электронов измерялись отдельно до электрического пробоя кристалла при  $T_{\text{проб.}}=+5\pm 5^{\circ}\text{C}$  и после него.

В Таблице показаны измеренные зависимости граничной энергии спектра электронов (см. столбцы 4 и 5) и ионов (столбец 6) от скорости нагрева (столбец 2). В столбце 7 показана энергия пика в спектре ионов. В столбце 1 указаны напряжения, подаваемые на нагревательный элемент, в столбце 2 показана средняя скорость нагрева кристалла с максимальными погрешностями при данном напряжении. Средняя скорость охлаждения кристалла (см. столбец 3) оставалась постоянной. В столбце 4 показана граничная энергия  $E_{\text{гран.}}(H1)$  спектра электронов до пробоя, который происходил при нагревании кристалла до температуры  $T_{\text{проб.}}=+5\pm 5^{\circ}\text{C}$ . В столбце 5 показана граничная энергия  $E_{\text{гран.}}(H2)$  спектра электронов после пробоя. Как видно из Таблицы, увеличение скорости нагрева приводит к возрастанию граничной энергии спектра электронов и ионов, а также к увеличению энергии пика ионов.

Зависимости граничной энергии спектра электронов до пробоя (столбец 4) и после пробоя (столбец 5), а также энергии пика (столбец 7) и граничной энергии (столбец 6) в спектре ионов от скорости нагрева кристалла (столбец 2) при напряжении питания нагревательного элемента, указанного в столбце 1.

Скорость охлаждения кристалла (столбец 3) оставалась неизменной

1	2	3	4	5	6	7
$U_{\text{нагр.}}$ (Вольт)	$T^0C/t(\text{нагр.})$ (град./мин)	$T^0C/t(\text{охл.})$ (град./мин)	$E_{\text{гран.}}(\text{H1})$ (кэВ)	$E_{\text{гран.}}(\text{H2})$ (кэВ)	$E_{\text{гран.}}(\text{охл.})$ (кэВ)	$E_{\text{пик...}}(\text{охл.})$ (кэВ)
7	3±2	3±2	160	77	65	40
8	6±2	3±2	341	85	75	59
9	8±2	3±2	352	95	80	63
10	10±2	3±2	360	186	100	66

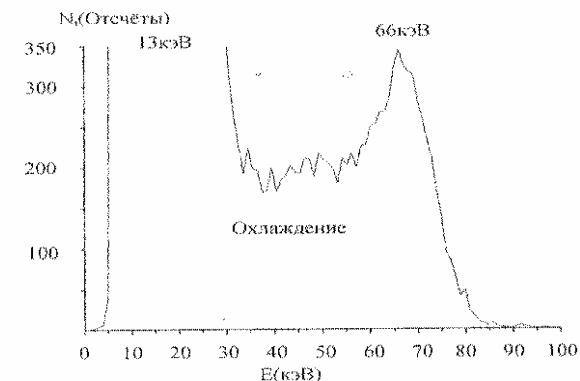
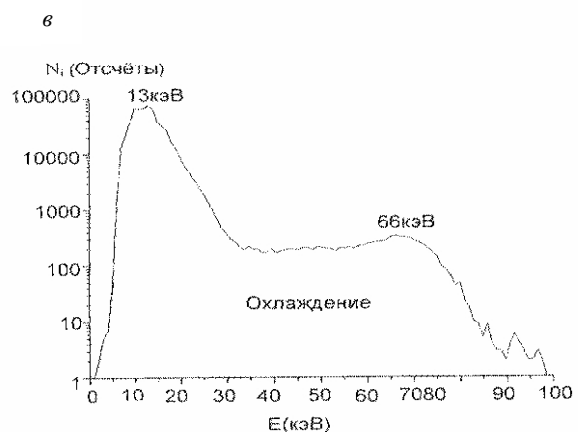
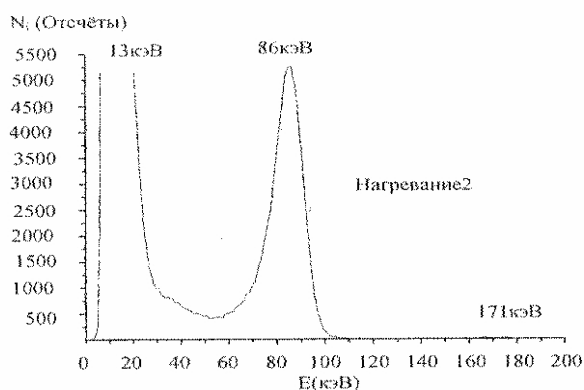
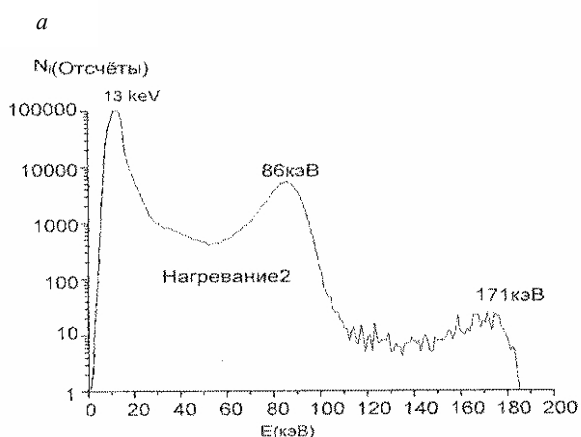
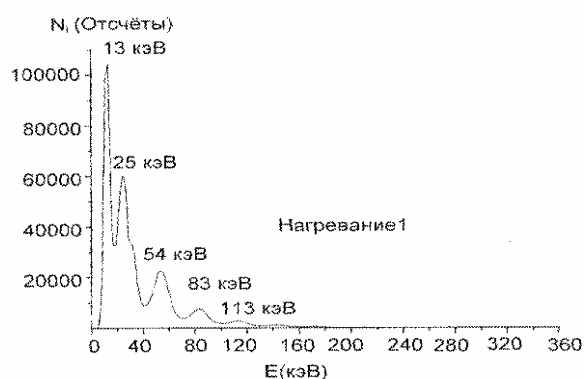
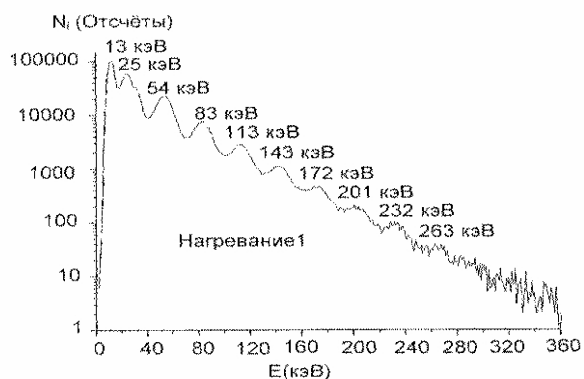


Рис.3. Результаты измерений спектров электронов при нагревании до пробоя (а, б) и после пробоя (в, г), и ионов при охлаждении (д, е) полученные с помощью поверхностно-барьерного детектора. Спектры (а, в, д) показаны в логарифмическом масштабе, а спектры (б, г, е) – в линейном

Граничная энергия  $E_{\text{гран.}}(\text{Охл.})$  и энергия пика  $E_{\text{пик.}}(\text{Охл.})$  для ионов при охлаждении указаны в столбцах 6 и 7 соответственно. Как видно из Таблицы, увеличение скорости нагрева приводит к возрастанию граничной энергии спектра электронов и ионов, а также к увеличению энергии пика ионов. Форма спектров (электронов при нагревании, ионов при охлаждении) повторяется для различных скоростей изменения температуры кристалла.

На Рис.3 показаны типичные результаты измерений спектров электронов при нагревании (*a, б, в, г*), и ионов при охлаждении (*д, е*) полученные с помощью поверхностно-барьерного детектора при максимальной скорости изменения температуры кристалла (см. Таблицу). Максимумы при энергии около 13 кэВ обусловлены шумами спектрометрического тракта и уровнем дискриминации амплитудного анализатора импульсов. Во время нагревания происходили электрические пробоя по кристаллу. Мы измеряли спектры электронов отдельно до и после пробоев. Спектр электронов при нагревании до пробоя (*a, б*) существенно отличаются от спектра электронов при нагревании после пробоя (*в, г*). Спектр электронов при нагревании (*a, б*) до пробоя содержит пики с кратными энергиями. Пики с энергией от 25кэВ до 363 кэВ (9 пиков) являются эквидистантными с расстоянием между пиками равным  $E_{\text{мин.с}}=30\pm 1\text{кэВ}$ . Величина энергии 1-го пика отличается от  $E_{\text{мин.с}}=30\pm 1\text{кэВ}$  на 5 кэВ, возможно, из-за нелинейности спектрометра при малых амплитудах сигнала. Спектр электронов при нагревании после пробоя (*в, г*) имеет один пик с энергией 86 кэВ, а также очень слабый пик с удвоенной энергией 171 кэВ, который виден только в логарифмическом масштабе. Интегральный выход, взятый по всему спектру электронов до пробоя, в 2.6 раза больше, чем после пробоя. Спектр ионов при охлаждении кристалла (*д, е*) имеет только один пик с энергией 66 кэВ. Суммарный интегральный выход, взятый по всему спектру электронов до пробоя и после пробоя (число зарегистрированных электронов), приблизительно в 5 раз больше, чем интегральный выход, взятый по всему спектру, для ионов.

По-видимому, спектральные пики с кратными энергиями обусловлены одновременным детектированием нескольких электронов. Эти электроны попадают в детектор в пределах времени формирования сигнала, т.е. менее 0.8 мкс. Это явление в работе [2] интерпретировалось как «электронные кластеры». Авторы [5] считают, что одновременное детектирование нескольких электронов происходит благодаря их автофокусировке. Аналогичные спектры электронов с кратными энергиями наблюдались в работе [14] при эмиссии электронов с обычного катода. Это явление весьма подобно хорошо известному дробовому эффекту в радиолампах [15, 16]. Существует возможность возникновения некоторых из спектральных пиков с кратными энергиями благодаря отрицательным ионам с кратными зарядами атомов или молекул, которые движутся в том же направлении, что и электроны.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мы провели серию измерений спектров с различными скоростями изменения температуры кристалла. Отметим некоторые результаты измерений.

1. Увеличение скорости нагрева приводит к возрастанию граничной энергии спектра электронов и ионов, а также к увеличению энергии пика ионов (см. Таблицу).

2. При одинаковой скорости охлаждения кристалла параметры спектра ионов зависят от предыдущей скорости нагревания. Кристалл как бы «запоминает», что с ним происходило ранее (см. Таблицу).

3. Спектры электронов до пробоя содержат серию, содержащую до десятка спектральных пиков с кратными энергиями. Энергии соседних пиков различаются на  $30\pm 1\text{кэВ}$ . Спектр электронов после пробоя близок к моноэнергетическому (см. Рис.3).

4. Спектры ионов содержат один пик (см. Таблицу и Рис.3).

5. Суммарное количество зарегистрированных электронов в несколько раз больше суммарного количества зарегистрированных ионов за один цикл (см. Рис.3).

Вид спектра ускоренных электронов значительно флуктуирует во времени. Спектр электронов до пробоя имеет многопиковую структуру, связанную с тонкой временной структурой плотности электронов в пучке. Моноэнергетический спектральный пик электронов достигает энергии 30 кэВ до первого пробоя и 86 кэВ после восстановления от первого пробоя. Спектры ионов более стабильны, пробоя не наблюдались. Моноэнергетический спектральный пик ионов достигает энергии 66 кэВ.

Отметим резкое изменение спектральных характеристик пучка электронов до и после пробоя, который происходит при температуре около  $+5^{\circ}\text{C}$ . Это изменение может свидетельствовать об изменении условий испускания электронов с поверхности кристалла. До пробоя испускаются одновременно по несколько электронов. После пробоя испускаются одиночные электроны с почти утроенной энергией. Но конкретная физическая причина наблюдавшегося резкого изменения в испускании пучка электронов остаётся неясной.

В целом, пироэлектрический ускоритель, несмотря на некоторую присущую пироэлектрическим процессам нестабильность, может применяться как малогабаритный маломощный автономный управляемый источник излучения электронов, ионов и рентгеновского излучения. Одна из возможных областей применения – для калибровки и проверки работоспособности различных детекторов и дозиметров ионизирующего излучения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. J.D. Brownridge. Pyroelectric X-ray generator // *Nature*. 1992, v.358, p.287.
2. J.D. Brownridge, S. Raboy. Investigation of pyroelectric generation of X-rays // *J. Appl. Phys.* 1999, v.86, p.640.

3. J.D. Brownridge, S.M. Shafroth, D. Trott, B. Stoner, W. Hooke. Observation of multiple nearly monoenergetic electrons production by heating pyroelectric crystals in ambient gas // *Appl. Phys. Lett.* 2001, v.78, p.1158-1159.
4. V.I. Nagaychenko, V.M. Sanin, A.M. Yegorov, A.V. Shchagin. Spectra of pyroelectric X-ray generator // *Вопросы атомной науки и техники, Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2004, №43(2), с.214-216. *E-preprint physics/0309049*. September 10, 2003, 5 pages.
5. J. Geuther, Ya. Danon, F. Saglime, B. Sones. High-energy X-ray Production with Pyroelectric Crystals // *J. Appl. Phys.* 2005, v.97, p.104916.
6. J.D. Brownridge, S.M. Shafroth. Electron and positive ion beams and X-rays produced by heated and cooled pyroelectric crystals such as LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub> in dilute gases: phenomenology and applications. <http://www.binghamton.edu/physics/Brownridge%20Summary.pdf>
7. N. Kukhtarev, J.D. Kukhtareva, M. Bayssie, J. Wang, J.D. Brownridge. Generation of focused electron beam by pyroelectric and photogalvanic crystals // *J. Appl. Phys.* 2004, v.96, p.116794.
8. J.A. Geuther, Ya. Danon. Electron and positive ion acceleration with pyroelectric crystals // *J. Appl. Phys.* 2005, v.97, p.074109.
9. B. Naranjo, J.K. Gimzewski, S. Putterman. Observation of nuclear fusion driven by pyroelectric crystal // *Nature*. 2005, v.434, p.1115.
10. J. Geuther, Ya. Danon, F. Saglime. Nuclear reactions induced by a pyroelectric accelerator // *Phys. Rev. Lett.* 2006, v.96, p.054803.
11. В.И. Нагайченко, В.В. Сотников, Б.И. Иванов, А.М. Егоров, А.В. Щагин. Исследование свойств рентгеновского излучения пироэлектрического генератора в зависимости от режимов его работы // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2006, №5, с.254-259.
12. V.I. Nagaychenko, V.V. Sotnikov, B.I. Ivanov, A.M. Yegorov, A.V. Shchagin. The influence of size and surface condition of lithium niobate crystal on the energy and intensity of X-ray radiation of the pyroelectric generator. (In Russian) // *J. Surface*. 2007, v.3, p.81-89.
13. В.И. Нагайченко, В.А. Воронко, В.В. Сотников, В.В. Сидоренко, П.С. Кизим, А.М. Егоров, А.В. Щагин. Увеличение энергии электронов в пироэлектрическом ускорителе // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Ядерно-физические исследования»*(50), 2008, №.5, с.72-76.
14. *Пироэлектрический генератор рентгеновского излучения* / Материалы по проекту УНТЦ 1911, под ред. А.В. Щагина. Харьков: ННЦ ХФТИ. Т.1, 2007, 140 с.; Т.2, 2009, 92 с.
15. M.A. Piestrup, H.E. Puthoff, P.J. Ebert. Measurement of multiple-electron emission in single field-emission events // *J. Appl. Phys.* 1997, v.82 (11), p.5862-5864.
16. J. D. Brownridge and S. M. Shafroth. Self-focused electron beams produced by pyroelectric crystals on heating and cooling in dilute gases // *Appl. Phys. Lett.* 2001, v.79, p.3364.
17. James D. Brownridge and Stephen M Shafroth. Pressure Dependence of Energetic (=160 keV) Focused Electron Beams Arising From Heated or Cooled (LiNbO<sub>3</sub>) Pyroelectric Crystals // *Appl. Phys. Lett.* 2003, v.83, p.1477.
18. J. Geuther, Ya. Danon. Applications of pyroelectric particle accelerator // *NIM*. 2007, v.B261, p.110-113.

*Статья поступила в редакцию 18.11.2009 г.*

## RESEARCH OF THE SPECTRA OF THE CHARGED PARTICLES BEAM IN THE PYROELECTRIC ACCELERATOR

*V.I. Nagaychenko, V.S. Miroshnik, A.M. Yegorov, A.V. Shchagin*

Research of the spectra of the beam particles accelerated in the pyroelectric accelerator. Results of experimental research of spectral properties of particles beams accelerated in the pyroelectric accelerator are presented. The method of the measurement of spectra of the beam electrons and ions is described. It was found that measured spectra of electrons has multi-peak structure in some definite temperature range of the pyroelectric and is almost monoenergetic in another one. The maximum energy in the spectrum of electrons reaches 360 keV and in the spectrum of ions reaches 100 keV. Physical reasons for appearance of multi-peak and single-peak structures in the electron beam spectra are discussed.

## ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ПУЧКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТОК В ПИРОЕЛЕКТРИЧНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ

*В.І. Нагайченко, В.С. Мірошник, О.М. Егоров, А.В. Щагін*

Подано результати експериментального дослідження спектральних властивостей пучків часток, які прискорюються в піроелектричному прискорювачі. Описана методика вимірювання спектрів пучка електронів й іонів за допомогою поверхнево-бар'єрного детектора заряджених часток. Виявлено, що вимірюваний спектр електронів в одному інтервалі температур піроелектрика має многопикову структуру, а в другому інтервалі прискорені електрони майже моноенергетичні. Максимальна енергія в вимірюваному спектрі прискорюваних електронів досягає 360 кеВ, а прискорюваних іонів 100 кеВ. Обговорюються фізичні причини виникнення многопикової й однопикової структури в спектрі електронів.