

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ

В.И. Нагайченко, В.А. Воронко, В.В. Сотников, В.В. Сидоренко, П.С. Кизим,
А.М. Егоров, А.В. Щагин*

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
Харьков, Украина*

**Харьковский национальный университет имени Каразина,
площадь Свободы, 4, Харьков, 61077, Украина
E-mail: valnag@kipt.kharkov.ua*

Описаны экспериментальные исследования возможностей увеличения потенциала на поверхности пироэлектрического кристалла LiNbO_3 в пироэлектрическом генераторе. Увеличение потенциала до величины, существенно превышающей 100 кВ, позволит повысить энергию ускоренных электронов, максимальную энергию и выход рентгеновского излучения, а в перспективе и выход нейтронов. Обсуждается экспериментально наблюдавшееся влияние высоты, площади и шероховатости пироэлектрического кристалла на величину потенциала. Описаны эксперименты по созданию секционированной колонны из пироэлектрических кристаллов. Описано наблюдавшееся существенное увеличение потенциала в широком диапазоне давлений при заполнении пироэлектрического генератора дейтерием по сравнению с другими газами, включая водород, воздух, криптон, ксенон.

1. ВВЕДЕНИЕ

В НИЦ ХФТИ проводятся экспериментальные исследования по применению пироэлектриков для ускорения заряженных частиц [1-3]. В [4-7] отмечалось, что параметры пироэлектрических генераторов существенно зависят от многих экспериментальных факторов. Целью настоящей работы был поиск возможностей увеличения потенциала на поверхности кристалла и соответствующего увеличения энергии ускоренных частиц. Описаны первые эксперименты с секционированной колонной из пироэлектрических кристаллов и исследования влияния состава и давления остаточного газа на свойства пироэлектрического генератора с кристаллами различной геометрии.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА

Анализ выполненных экспериментальных исследований показал, что предельная энергия рентгеновского излучения (энергия ускоренных электронов) увеличивается непропорционально с ростом высоты кристалла. Ранее мы показали [3], что нелинейную зависимость потенциала на поверхности пироэлектрика от высоты кристалла можно качественно объяснить увеличением влияния краевых эффектов с увеличением высоты кристалла.

Влияние наблюдаемого эффекта можно уменьшить, если толщина кристалла будет малой по сравнению с его поперечными размерами. Поэтому с целью создания настольного варианта высоковольтного ускорителя заряженных частиц мы провели первые эксперименты с секционированной колонной (сборкой), которая состоит из нескольких кристал-

лов толщиной 1 мм и диаметром 8 мм с прослойками из алюминиевых пластин.

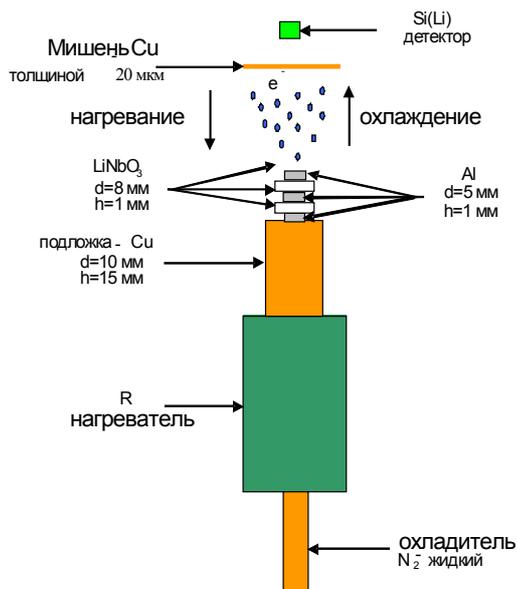


Рис.1. Схема секционированной сборки (колонны)

На Рис.1 показана схема эксперимента по измерению спектров рентгеновского излучения. Экспериментальная установка описана в работах [1-3]. Сборка состоит из нескольких пироэлектрических кристаллов LiNbO_3 , между которыми вставлены диски из алюминия. Кристаллы и диски соединены между собой теплоэлектропроводящей пастой для обеспечения тепловой и электрической проводимости. Ось Z кристаллов направлена по оси колонны.

На Рис.2 представлены спектры рентгеновского излучения, измеренные при охлаждении колонн, которые состоят из одного, двух и трех кристаллов толщиной 1 мм. Предельная энергия рентгеновского излучения в случае одного кристалла равна прибли-

зительно 21 кэВ, в случае двух кристаллов – около 36 кэВ, а для трех кристаллов – 47 кэВ.

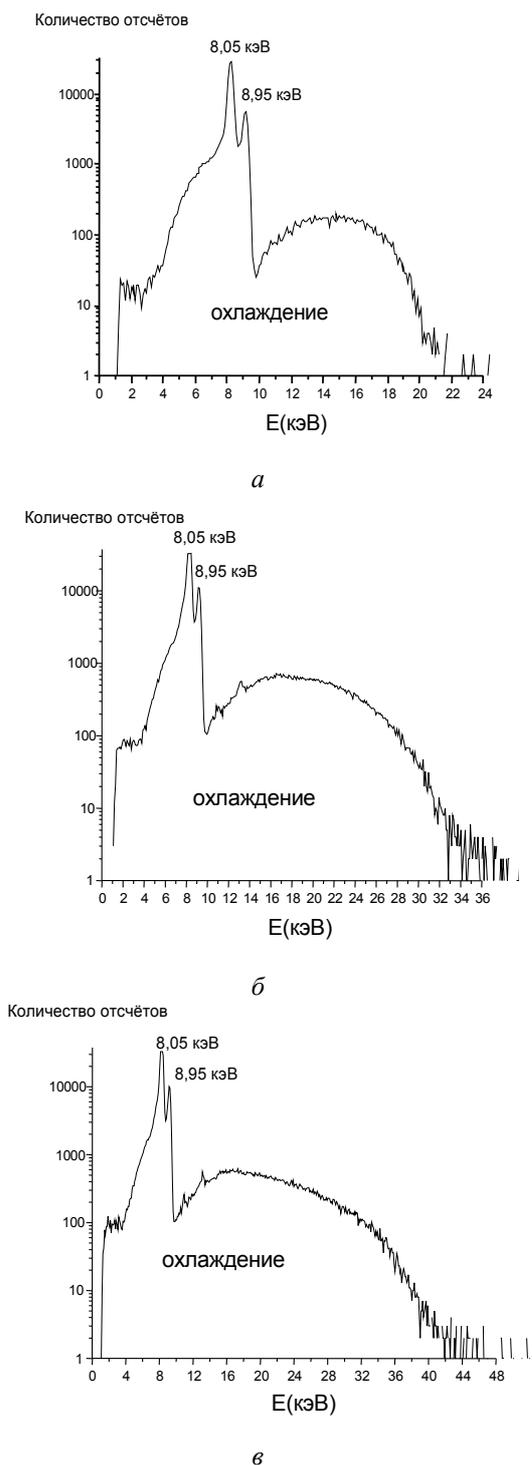


Рис.2. Спектры рентгеновского излучения при охлаждении (от +80°С до -25°С) отборок с одного (а), двух (б), трех (в) кристаллов толщиной 1 мм, во всех измерениях давление равнялось P=20 мТорр

Таким образом, видно, что предельная энергия рентгеновского излучения (энергия ускоренных электронов) увеличивается непропорционально с ростом высоты колонны. Возможно, что отсутствие более существенного увеличения энергии связано с неравномерностью охлаждения колонны. На следу-

ющем этапе мы планируем исследовать колонну другой геометрии, чтобы уменьшить влияние неравномерности охлаждения/нагрева на работу ускорителя.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ И СОСТАВА ОСТАТОЧНОГО ГАЗА НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

С целью исследования влияния давления и состава остаточного газа на спектральные свойства генератора была разработана методика наполнения камеры генератора разными газами в диапазоне давлений от 0,5 до 50 мТорр. Исследования были проведены для водорода, дейтерия, криптона, ксенона. Баллон с исследуемым газом и с подключенным манометром (без редуктора) прикреплялся с помощью переходника к натекателю, который полностью открывался (см. Рис.3). После откачки форвакуумным и сорбционным насосами проводилось наполнение камеры газом до давления порядка 100 мТорр. Затем камера снова откачивалась на высокий вакуум. Такая процедура проводилась трижды. Далее с помощью натекателя камера наполнялась исследуемым газом до необходимого давления. Давление в камере измерялось с помощью вакуумных ламп ПМТ-2 и ПМИ-2. Коэффициенты для пересчета показаний ламп в зависимости от исследуемого газа приведены в таблице.

Коэффициенты пересчета показаний ламп

Газ	ПМТ-2	ПМИ-2
Воздух	1	1
H ₂ , D ₂	0.67	0.47
Kr	2.3	1.98
Xe	3.15	2.71

В процессе исследований были измерены спектры рентгеновского излучения при разных давлениях газового промежутка генератора для водорода, дейтерия, криптона, ксенона и воздуха. Измерения проводились в температурном диапазоне от -40°С до +110°С (цикл нагревания-охлаждения) с использованием пироэлектрического кристалла LiNbO₃ диаметром 8 мм и высотой 10 мм. На Рис.3 в качестве примера приведены спектры рентгеновского излучения при нагревании и охлаждении кристалла LiNbO₃ для воздуха, ксенона, криптона, дейтерия.

Из измеренных спектров определялась предельная энергия тормозного рентгеновского излучения, которая соответствует и максимальной энергии ускоренных электронов, а также интегральный выход рентгеновского излучения. Зависимости предельной энергии тормозного излучения E_{макс} и интегрального выхода рентгеновского излучения от давления P газовой среды при нагревании и охлаждении кристалла LiNbO₃ для воздуха, ксенона, криптона, дейтерия, водорода приведены на Рис.4 и на Рис.5 соответственно.

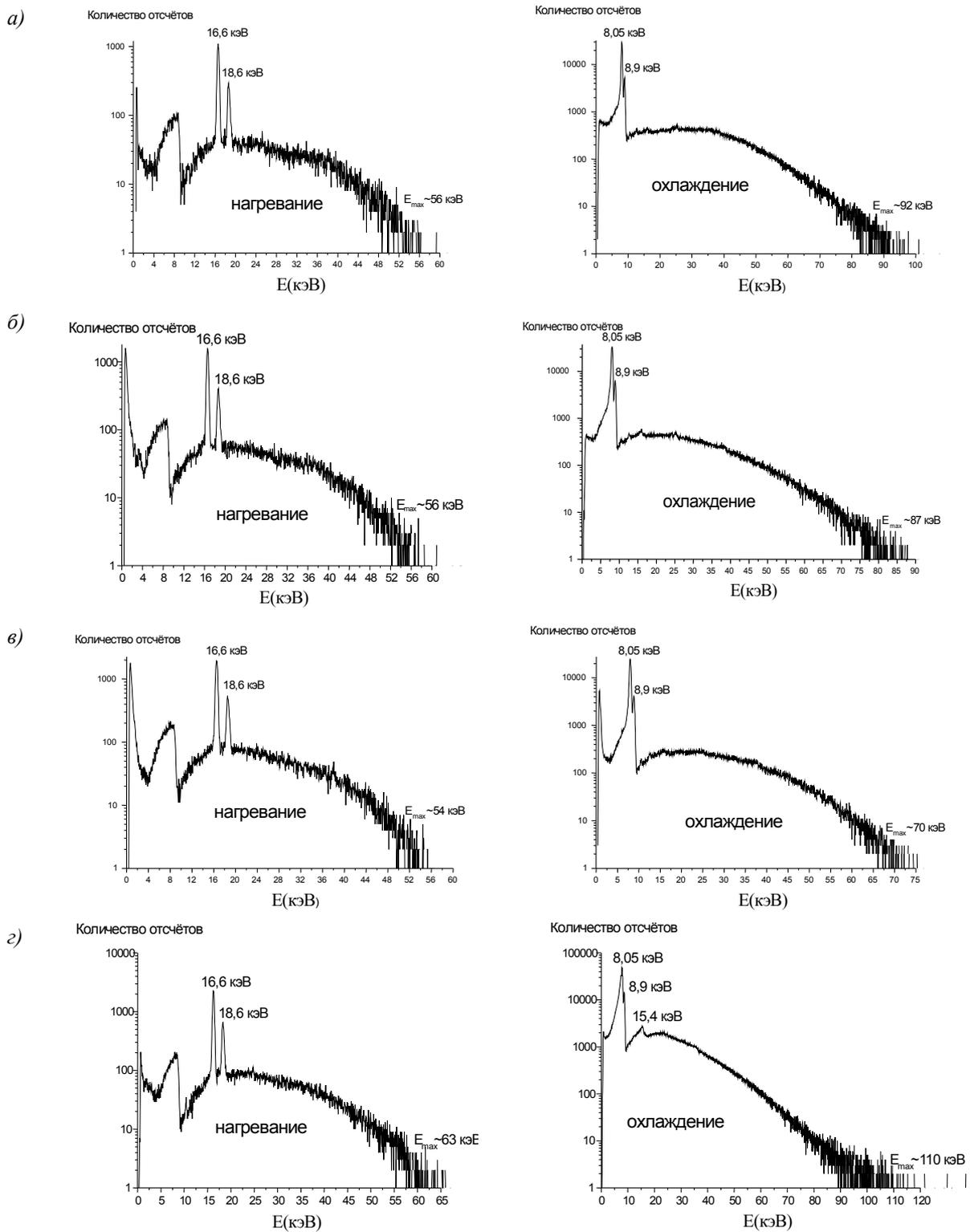


Рис 3. Спектры рентгеновского излучения при нагревании и охлаждении кристалла LiNbO_3 диаметром 8 мм и высотой 10 мм для а) воздуха, б) ксенона, в) криптона, г) дейтерия

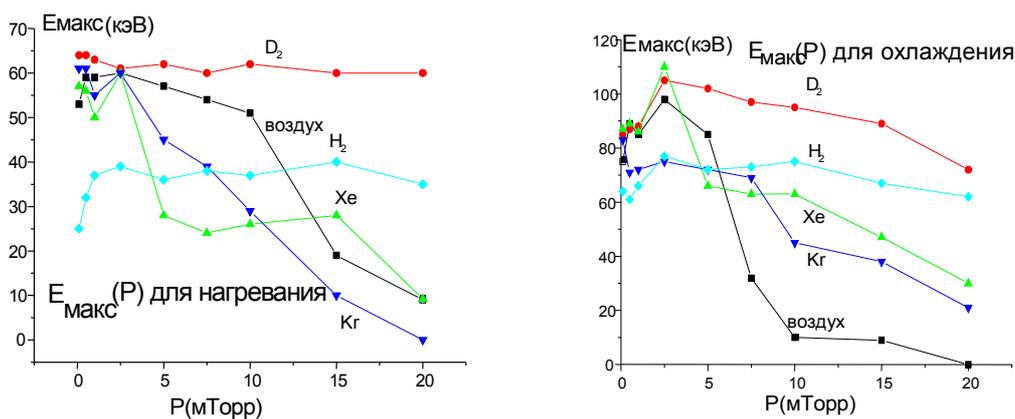


Рис.4. Зависимость предельной энергии тормозного излучения $E_{\text{макс}}$ от давления P газовой среды в генераторе при нагревании и охлаждении кристалла LiNbO_3

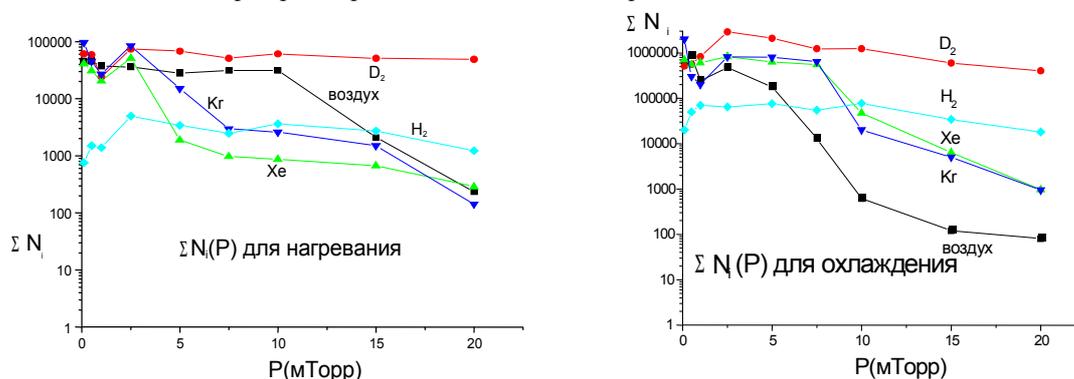


Рис.5. Зависимость интегрального выхода ΣN_i по всему спектру рентгеновского излучения от давления P газовой среды в генераторе при нагревании и охлаждении кристалла LiNbO_3

ВЫВОДЫ

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- Максимальная энергия и максимальный интегральный выход рентгеновского излучения наблюдаются при использовании в качестве остаточного газа дейтерия как в режиме нагревания, так и в режиме охлаждения во всем диапазоне давлений.

- В режиме нагревания кристалла значения максимальной энергии и интегрального выхода рентгеновского излучения во всем диапазоне давлений газовой среды существенно ниже по сравнению с режимом охлаждения для всех исследованных газов.

- Максимальная энергия и максимальный интегральный выход рентгеновского излучения для всех исследованных газов наблюдались при давлении несколько миллиторр как в режиме нагревания, так и в режиме охлаждения.

- Качественный ход зависимостей максимальной энергии и интегрального выхода рентгеновского излучения для воздуха, криптона и ксенона повторяется во всем диапазоне давлений газовой среды. Есть четко выделенный максимум максимальной энергии и интегрального выхода рентгеновского излучения при давлении 2...3 мТорр, а с ростом давления наблюдается их резкое падение.

- Для дейтерия и водорода зависимость предельной энергии и интегрального выхода рентгеновского излучения слабо изменяется с изменением давления.

- Применение дейтерия в качестве остаточного газа позволяет существенно увеличить энергию и количество электронов, ускоренных в пироэлектрическом ускорителе. В дейтерии предельная энергия приблизительно в 1,5 раза выше, чем в водороде, а интегральный выход рентгеновского излучения выше в широком диапазоне давлений. При высоких давлениях выход излучения с дейтерием может на несколько порядков превышать выход излучения с применением других газов.

Представляется оптимальным использование дейтерия в качестве остаточного (рабочего) газа в пироэлектрическом генераторе рентгеновского излучения и пироэлектрическом ускорителе.

Работа выполнена частично благодаря гранту УНТЦ 1911.

ЛИТЕРАТУРА

1. V.I. Nagaychenko, V.M. Sanin, A.M. Yegorov, A.V. Shchagin. Spectra of pyroelectric X-ray generator // *ВАНТ. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 2004, №43(2), p.214-216; Preprint, 2003 at

<http://www.arxiv.org/ftp/physics/papers/0309/0309049.pdf>

2. V.I. Nagaychenko, B.I. Ivanov, A.M. Yegorov, V.V. Sotnikov, A.V. Shchagin. Studies on the properties of X-ray radiation from the pyroelectric generator at different modes of its operation // *ВАНТ. Серия "Плазменная электроника и новые методы ускорения"*. 2006, №5, p.254-259.
3. V.I. Nagaychenko, V.V. Sotnikov, B.I. Ivanov, et al. The influence of size and surface condition of lithium niobate crystal on the energy and intensity of X-ray radiation of the pyroelectric generator // *Surface*. 2007, v.3, p.81-89 (in Russian)
4. J.D. Brownridge, S.M. Shafroth, Electron and positive ion beams and X-rays produced by heated and cooled pyroelectric crystals such as LiNbO₃ and LiTaO₃ in dilute gases // *Trends in Lasers and Electro-Optics Research* / Ed. W.T. Arkin, Nova Science Publishers, 2004.
5. J. Geuther, Ya. Danon, F. Saglime, B. Sones. Electron acceleration for X-ray production using paired pyroelectric crystals // *6 Intern. Meeting on Nucl. Applications of Accel. Technology, AccApp'03*, p.124, San Diego, June 1-5, 2003.
6. J. Geuther, Ya. Danon. Electron and positive ion acceleration with pyroelectric crystals // *J. Appl. Phys.* 2005, v.97, 074109.
7. J. Geuther, Ya. Danon. High-energy X-ray production with pyroelectric crystals // *J. Appl. Phys.* 2005, v.97, 104916.

Статья поступила в редакцию 19.11.2007 г.

ELECTRON ENERGY INCREASE IN THE PYROELECTRIC ACCELERATOR

V.I. Nagaychenko, V.A. Voronko, V.V. Sotnikov, V.V. Sidorenko, P.S. Kizim, A.M. Yegorov, A.V. Shchagin

The paper deals with the experimental possibilities of increasing the potential on the pyroelectric crystal LiNbO₃ surface in the pyroelectric generator. The increase in the potential up to the value significantly greater than 100 kV makes it possible to increase the accelerated electron energy, the maximum energy and yield of X-ray radiation, and, in prospect, the neutron yield. The experimentally observed influence of pyroelectric crystal height, area and roughness on the potential value is discussed. Experiments on developing a sectionalized column from pyroelectric crystals are described. The account is given of the observed substantial potential increase in a wide pressure range at filling the pyroelectric generator with deuterium gas in comparison with other gases, including hydrogen, air, krypton and xenon.

ЗБІЛЬШЕННЯ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОНІВ У ПІРОЕЛЕКТРИЧНОМУ ПРИСКОРІЮВАЧІ

В.І. Нагайченко, В.О. Воронко, В.В. Сотніков, В.В. Сидоренко, П.С. Кизим, О.М. Егоров, А.В. Щагін

В роботі описані експериментальні дослідження можливостей збільшення потенціалу на поверхні піроелектричного кристалу LiNbO₃ у піроелектричному генераторі. Збільшення потенціалу до величини, що істотно перевищує 100 кВ, дозволить підвищити енергію прискорених електронів, максимальну енергію і вихід рентгенівського випромінювання, а в перспективі і вихід нейтронів. Обговорюються експерименти по впливу висоти, площі і шорсткості піроелектричного кристалу на величину потенціалу. Описані експерименти по створенню секційної колони з піроелектричних кристалів. Описано істотне збільшення, що спостерігалось, потенціалу в широкому діапазоні тиску при заповненні піроелектричного генератора дейтерієм у порівнянні з іншими газами, включаючи водень, повітря, криптон, ксенон.