

Управляемый пьезоэлектрический дефлектор пучка заряженных частиц

А.В. Щагин^{1,2)} О.О. Иващук^{2,3)} А.С. Кубанкин^{2,3)} М.Э. Гильц² И.А. Кищин^{2,3)} А.Н. Олейник^{2,4)}

1) ХФТИ, Харьков, Украина

2) БелГУ, Белгород, Россия

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

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

В настоящей работе демонстрируется возможность применения, изготовленного на базе двухкристальной схемы, пьезоэлектрического дефлектора для отклонения релятивистского пучка электронов с энергией 7 МэВ. Представлены расчеты ожидаемого угла отклонения пучка релятивистских электронов с помощью пьезоэлектрического дефлектора. Также приводятся зависимости величины напряженности электрического поля, генерирующегося в пьезоэлектрическом дефлекторе в вакууме от температуры пьезоэлектрика и давления остаточного газа.)

При одновременном нагреве двух пьезоэлектрических кристаллов в вакууме между их разноименно заряженными поверхностями образуется сильное электрическое поле [1]. В таком электрическом поле становится возможным отклонение пучка нерелятивистских электронов с энергией 30 кэВ [2] при изменении температуры пьезоэлектрических кристаллов на несколько °С в вакууме. Успешная реализация отклонения пучка релятивистских электронов с энергией 7 МэВ требует значительной модернизации, предложенного ранее, пьезоэлектрического дефлектора нерелятивистского пучка электронов (замена нагревательных элементов на более мощные и быстродействующие, увеличение массогабаритных характеристик теплопроводников, использование пьезоэлектрических кристаллов с большей площадью их рабочей поверхности), проведение экспериментальных исследований по поиску оптимальных режимов и условий работы пьезоэлектрического дефлектора, а также выполнение теоретических исследований ожидаемой величины угла отклонения.

Был разработан новый тип пьезоэлектрического дефлектора релятивистских электронов!

В МНОЛ радиационной физики НИУ «БелГУ» были выполнены предварительные эксперименты!

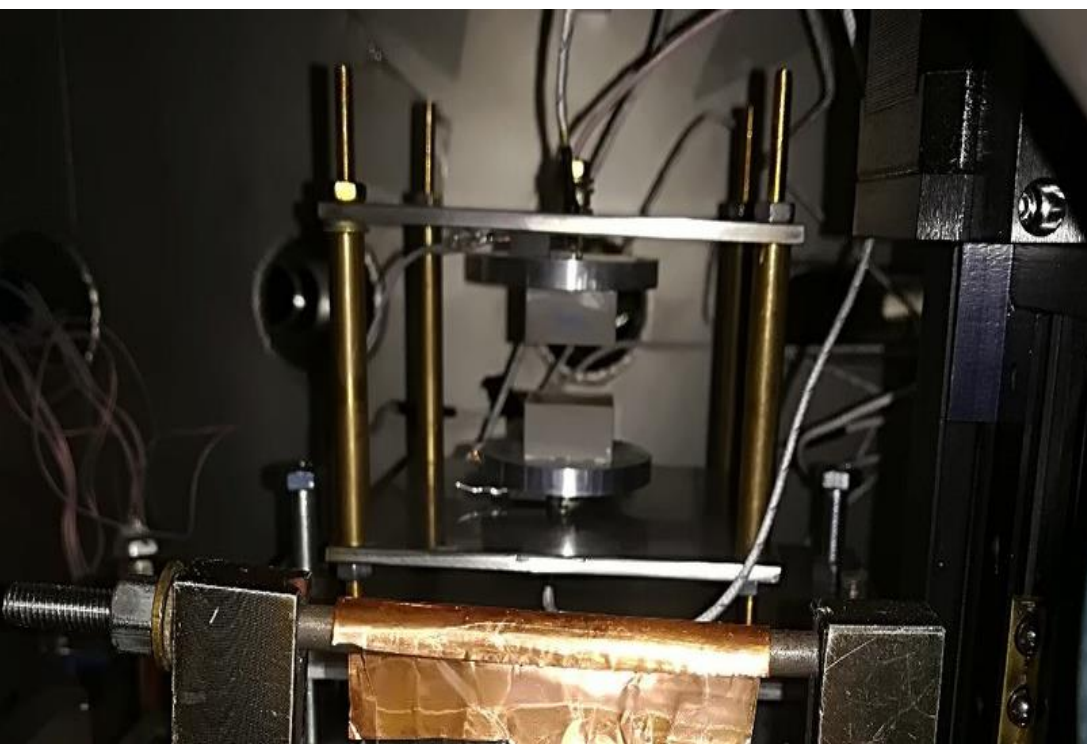


Рисунок 1 – Фотография пьезоэлектрического дефлектора релятивистских электронов

(1 – пьезоэлектрические кристаллы ниобата лития LiNbO₃, 2 – алюминиевые теплопроводники, 3 – кремниевые полупроводниковые диоды MUR 1660, 4 – термопара к-типа, 5 – вакуумная камера, 6 – детектор рентгеновского излучения).

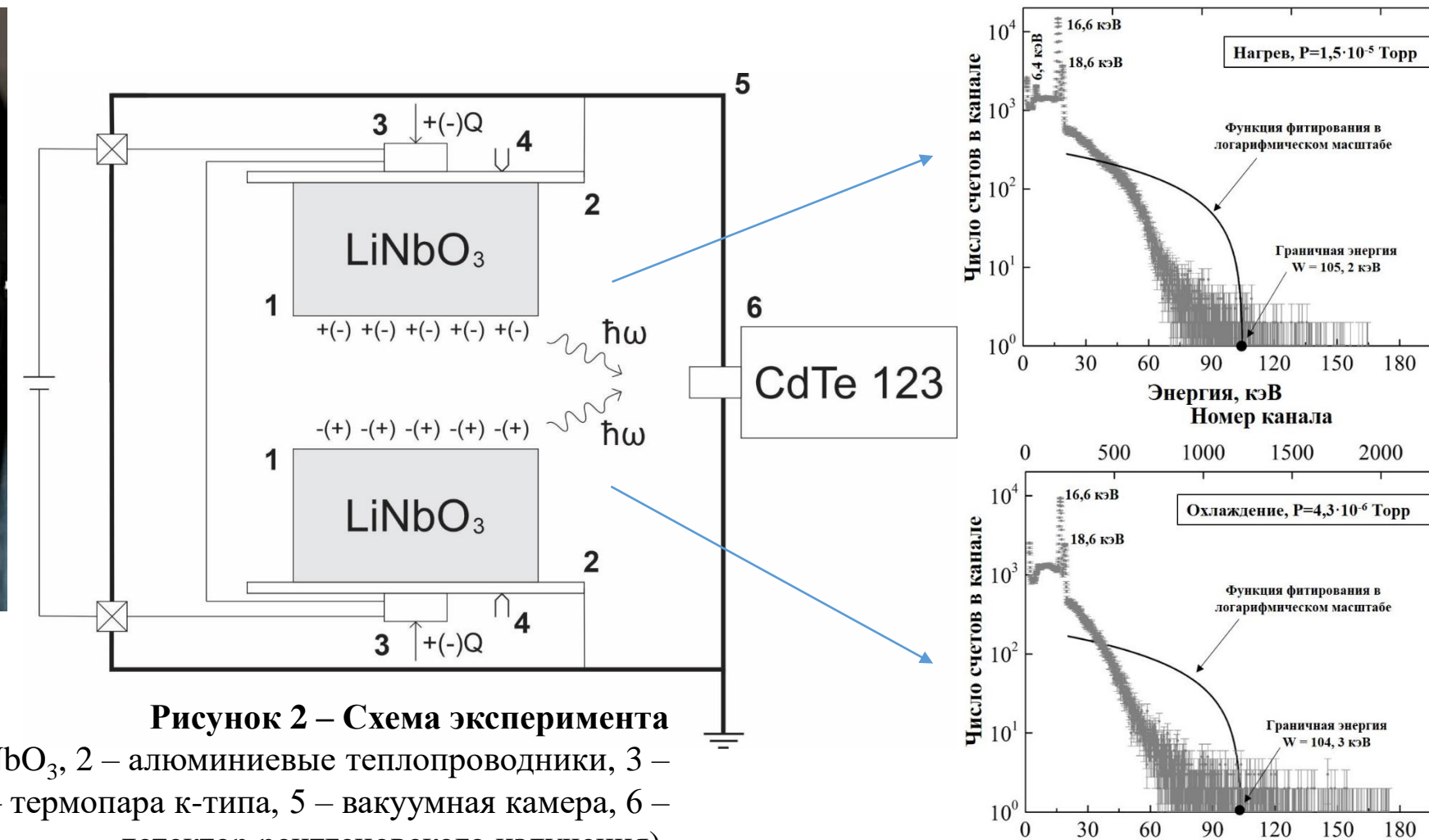


Рисунок 2 – Схема эксперимента

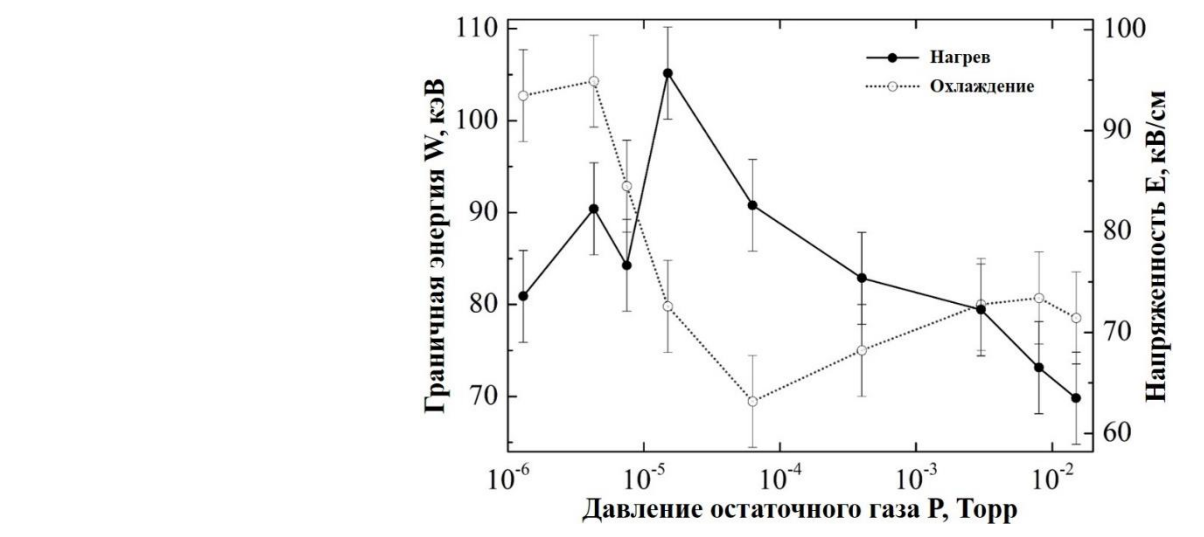
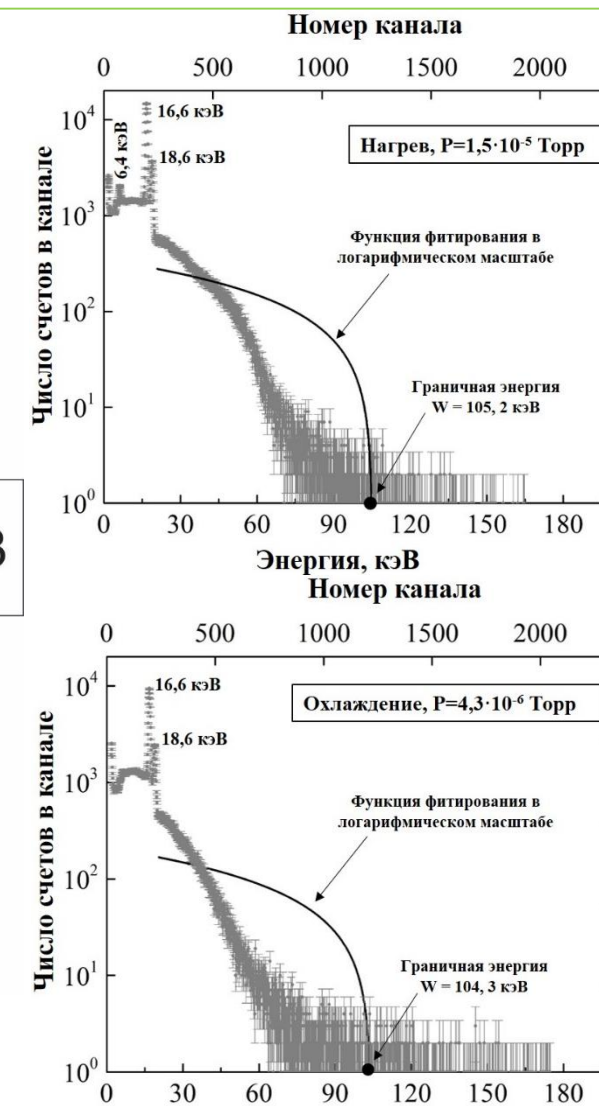


Рисунок 3 – График зависимости напряженности электрического поля от давления остаточного газа в вакууме

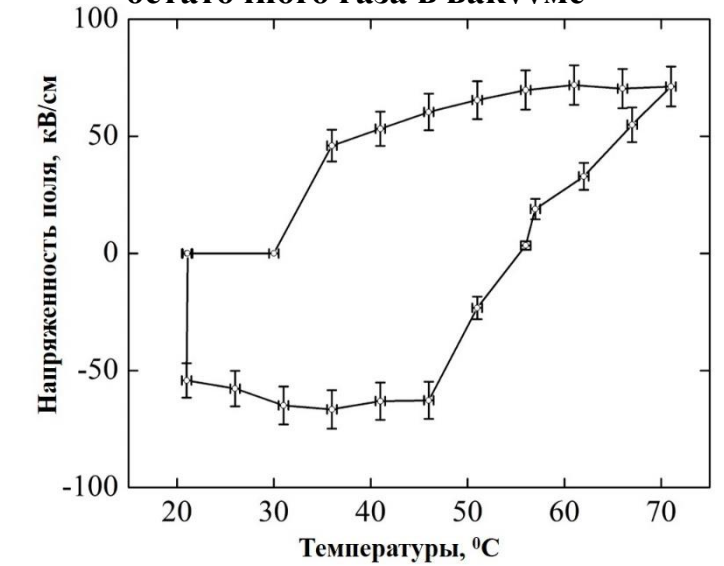


Рисунок 4 – График зависимости напряженности электрического поля от температуры пьезоэлектриков

На рисунке 2 представлена схема предварительных экспериментов с пьезоэлектрическим дефлектором (рисунок 1) релятивистских электронов в отсутствие пучка заряженных частиц. Пара пьезоэлектрических кристаллов (1), расположенных на алюминиевых теплопроводниках (2), подвергается термическому воздействию с помощью кремниевых полупроводниковых диодов (3) в диапазоне температур от 30 до 71,2 °С. Кристаллы расположены параллельно друг другу вдоль одной оси на расстоянии 11 мм. Вектора спонтанной поляризации каждого кристалла коллинеарны и сонаправлены друг другу. В случае одновременного нагрева пьезоэлектрических кристаллов на их свободных поверхностях образуется заряд противоположного знака, что приводит к возникновению электрического поля между ними. Взаимодействие ускоренных свободных электронов, возникших в процессе термоэмиссии под действием сильного электрического поля, с положительно заряженной поверхностью пьезоэлектрического кристалла сопровождается интенсивным рентгеновским излучением. При охлаждении каждый пьезоэлектрик переполаризовывается, и поток электронов движется в противоположном направлении. Такой цикл измерений проводится при различных давлениях остаточного газа в вакуумной камере (5). По граничной энергии зарегистрированного в экспериментах рентгеновского излучения можно судить о величине напряженности электрического поля между парой пьезоэлектриков в вакууме. Результаты экспериментов приведены на рисунке 3. В экспериментах было выявлено оптимальное давление остаточного газа в вакуумной камере около 10⁻⁵ Торр при котором напряжённость электрического поля при работе пьезоэлектрического дефлектора в вакууме достигает своего максимального значения. В дальнейшем все эксперименты были выполнены при данном значении давления остаточного газа. На рисунке 4 демонстрируется напряжённость электрического поля как функция от температуры в течение цикла работы (нагрев-охлаждение) пьезоэлектрического дефлектора в вакууме. Довольно любопытным экспериментальным фактом является процесс продолжительной (около нескольких суток) стабилизации сильного электрического поля в пьезоэлектрическом дефлекторе в течение охлаждения пьезоэлектрических кристаллов в вакууме, что является очень важным свойством пьезоэлектрического дефлектора.

На рисунке 5 изображена конструкция пьезоэлектрического дефлектора релятивистского пучка заряженных частиц. Перед началом экспериментальных исследований на установке РЕНТГЕН 1 (рисунок 7) Синхротрона «ПАХРА», Троицк, ФИАН им. П.Н. Лебедева, был измерен спектр рентгеновского излучения (РИ), что позволило оценить величину напряженности электрического поля в пьезоэлектрическом дефлекторе (E=100 кВ/см). Также перед началом эксперимента на пучка релятивистских электронов было выполнено расчеты ожидаемой величины угла отклонения пучка релятивистских электронов с энергией 7 МэВ в поле (E=100 кВ/см) пьезоэлектрического дефлектора. По предварительным оценкам данная величина составляет порядка 0,027 рад.

Пучок электронов генерируется в микротроне, далее транспортируется по вакуумному каналу и с помощью отклоняющего магнита (1) направляется в вакуумную камеру (3) (рисунок 8). Пьезоэлектрический дефлектор (2) установлен таким образом в вакуумной камере (3), что пучок электронов проходит по центру между двумя пьезоэлектрическими кристаллами. При включении пьезоэлектрического дефлектора (2) на скитилиационном экране (5) наблюдается изменение положения изображения пучка электронов. Зная расстояние между центральной осью пьезоэлектрического дефлектора и экраном, можно оценить угол отклонения пучка электронов относительно его первоначального направления.

Предварительно был измерен спектр РИ (рисунок 5) при работе пьезоэлектрического дефлектора в вакууме на установке РЕНТГЕН 1 в отсутствие пучка релятивистских электронов

Рисунок 5 - Устройство пьезоэлектрического дефлектора

(1 – Пьезоэлектрические кристаллы, 2 – диэлектрические теплопроводники, 3 – полупроводниковые кремниевые диоды, 4 – металлические пластины, 5 – металлические стержни, 6 – термопары К-типа). Положение входящего в дефлектор пучка электронов показано в виде эллипса на рисунке.

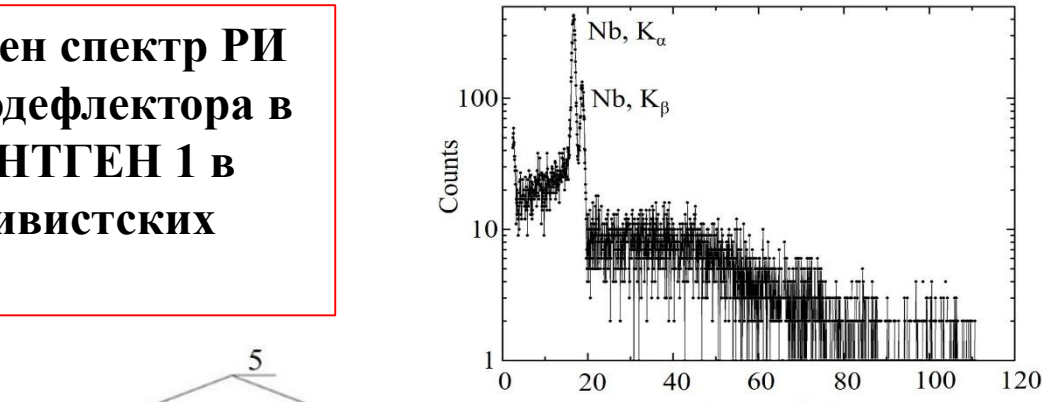


Рисунок 6 – Спектр рентгеновского излучения (РИ)

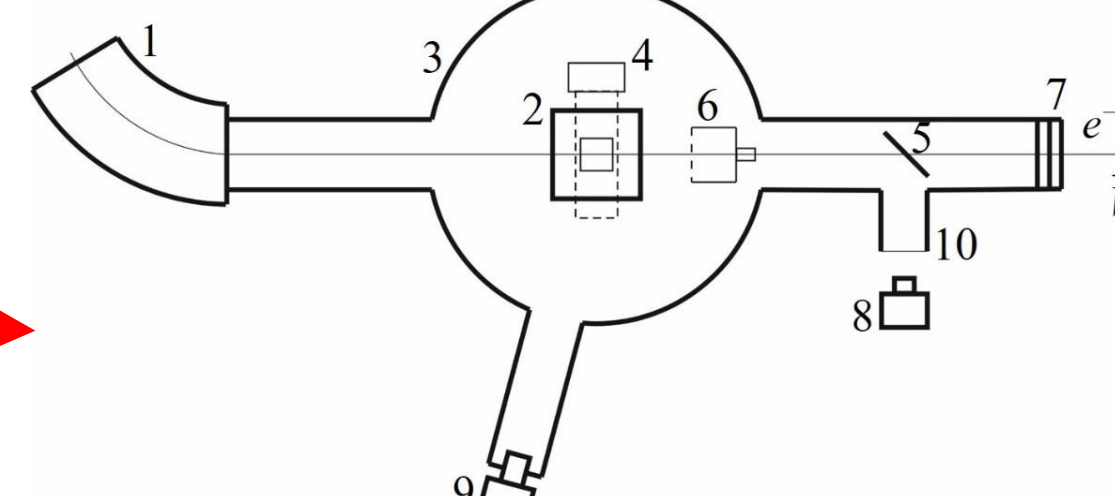


Рисунок 8 – Схема эксперимента (1 – отклоняющий магнит, 2 – пьезоэлектрический дефлектор (рисунок 5), 3 – вакуумная камера, 4 – линейный транслятор, 5 – выдвигной скитилиационный экран, 6 – выдвигной цилиндр Фарадея, 7 – Пропорциональная камера, 8 – веб-камера, 9 – рентгеновский детектор, 10 – стеклянное окно).

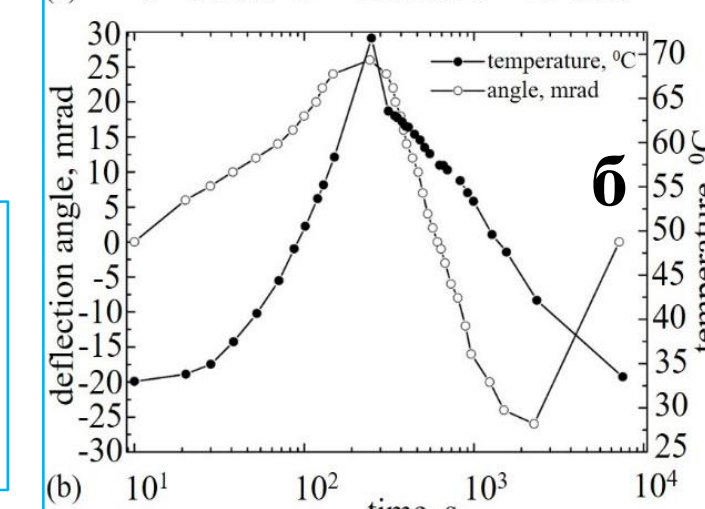
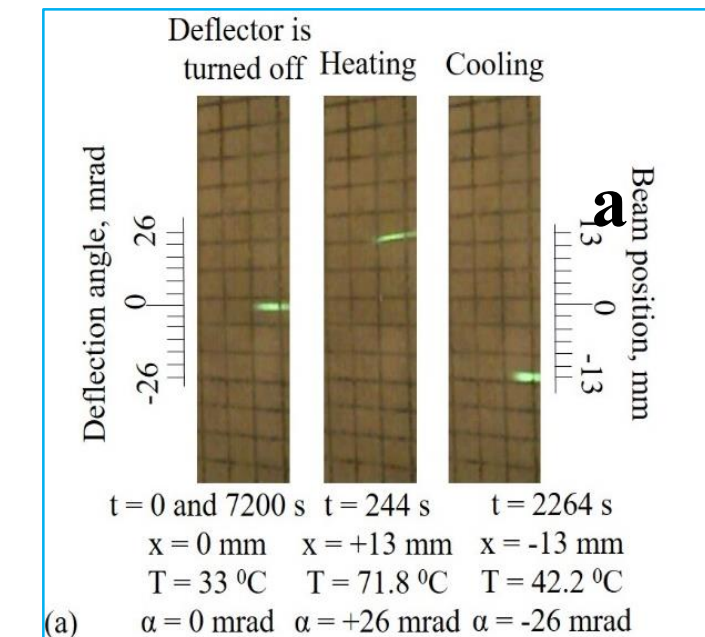


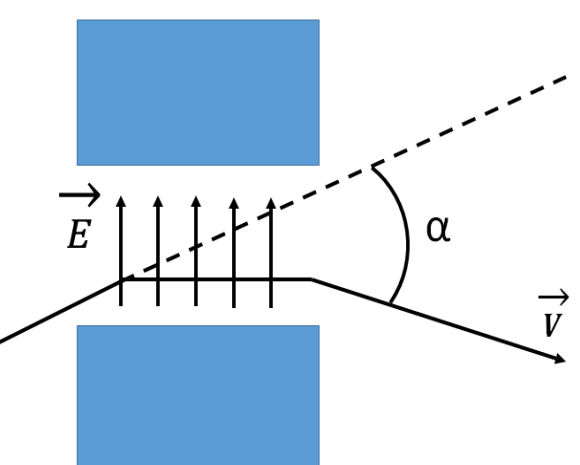
Рисунок 9 – Отклонение электронного пучка. (а) Три фотографии изображения пучка электронов на экране когда дефлектор выключен и при максимальных углах отклонения при нагреве и охлаждении пьезоэлектрических кристаллов. (б) Угол отклонения пучка электронов и измеренная температура как функции от времени.

По граничной энергии тормозного рентгеновского излучения, учитывая расстояние между кристаллами была определена напряжённость электрического поля, образованного между ними

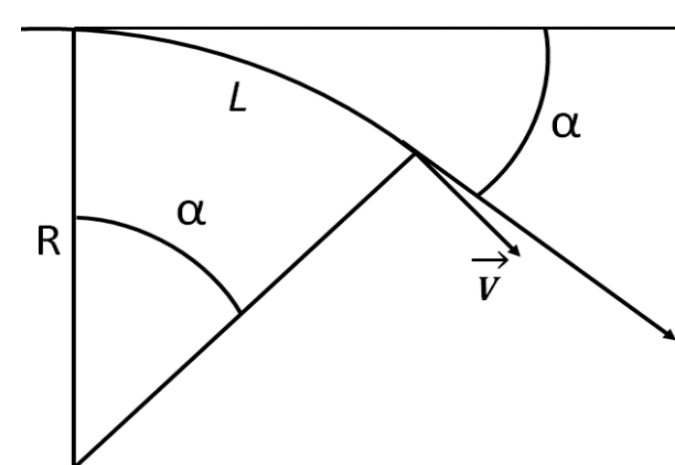
$$E_{\text{max}}^{\text{X-ray}} = \frac{eU}{ed} = \frac{h\nu_{\text{max}}}{ed} = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$$

Рисунок 7 – Схематическое изображение экспериментальной установки Рентген 1, Синхротрон «ПАХРА», Троицк, ФИАН им. П.Н. Лебедева (вид сверху). 1 – микротрон, 2,3 – поворотные магниты, 4 – детектор рентгеновского излучения, 5 – свинцовая защита от фоновой радиации, 6 – вакуумная камера с системой откачки и расположенной в ней пьезоэлектрическим дефлектором, 7 – система регистрации и визуализация пучка электронов с энергией 7 мэВ

Расчеты угла отклонения пучка релятивистских электронов с энергией 7 мэВ в поле (E=100 кВ/см) пьезоэлектрического дефлектора



$$\alpha = \frac{qEl}{\epsilon_{kin} \epsilon_{kin} + mc^2} = \frac{qEl \cdot 7.511}{\epsilon_{kin} \cdot 8.022} = \frac{qEl}{\epsilon_{kin}} \cdot 0.93630 = \frac{1e \cdot 2cm \cdot 10^5 V/cm}{7 \cdot 10^6 eV} \cdot 0.93630 = \frac{2 \cdot 0.93630}{70} = 0.026751 \text{ рад}$$



Это означает, что на расстоянии 1 метр после дефлектора пучок отклонится на 26.75 мм. Такая геометрия вполне приемлема для эксперимента на пучке электронов с энергией 7 МэВ.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке конкурсной части госзадания по созданию и развитию лабораторий, проект № FZWG-2020-0032 (2019-1569).

Заключение

В эксперименте наблюдалось отклонение пучка электронов с энергией 7 МэВ на угол около 26 мрад в электрическом поле напряженностью 100 кВ/см пьезоэлектрического дефлектора при изменении температуры пьезоэлектрических кристаллов на 38,8 °С в вакууме. Наблюдается хорошее согласие расчетной (27 мрад) и экспериментально полученной величины (26 мрад) угла отклонения пучка релятивистских электронов в поле пьезоэлектрического дефлектора.

Литература

- Jeffrey Geuther, Yaron Danon, and Frank Saglime, Nuclear Reactions Induced by a Pyroelectric Accelerator, PRL. 96, 054803 (2006).
- A.N. Oleinik, A.S. Kubankin, R.M. Nazhudinov, K.A. Vokhmyanina, A.V. Shchagin and P.V. Karataevd, Pyroelectric deflector of charged particle beam, J. Inst. 11 P08007. 2016. A.S. Kubankin, R.M. Nazhudinov and et.al. // JINST. – 2016. – Vol. 11. – P. 08007.