

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ЕГО РАБОТЫ

В.И. Нагайченко, В.В. Сотников, Б.И. Иванов, А.М. Егоров, А.В. Щагин
Национальный Научный Центр "Харьковский физико-технический институт"
E-mail: valnag@kipt.kharkov.ua

Проведено исследование свойств рентгеновского излучения пироэлектрического генератора на основе кристалла ниобата лития при изменении давления остаточного газа в камере генератора в пределах 0.5...30 мТорр. Энергия ускоренных электронов достигала 90 кэВ. Отмечается, что граничная энергия в спектре тормозного рентгеновского излучения линейно возрастает с увеличением высоты кристалла до нескольких миллиметров, а для больших высот кристалла рост энергии замедляется. Обнаружено, что увеличение в два раза площади поверхности кристалла приводит к существенному увеличению граничной энергии рентгеновского излучения и значительному увеличению интегрального выхода рентгеновского излучения. Приведены также численные оценки энергии электронов, ускоряемых в пироэлектрическом генераторе. Показано, что одной из причин наблюдаемых явлений может быть влияние краевых эффектов на величину потенциала на поверхности пироэлектрического кристалла.

PACS: 52.70.La

1. ВВЕДЕНИЕ

Достаточно давно было установлено, что пироэлектрики, такие как ниобат и танталат лития, в цикле нагревание–охлаждение испускают электроны с энергией ~10...100 кэВ (см. [1-6] и цитируемую там литературу). Первые работы [1,3] выполнялись в вакууме ~10⁻⁶ Торр, при этом ток электронов был ~10⁻¹⁴...10⁻¹⁰ А. В работах [2,4,6] было обнаружено, что в вакууме ~10⁻² Торр ток существенно возрастает (до ~10⁻⁹ А). В связи с этим в мире возник повышенный интерес к использованию ниобата и танталата лития в компактных («карманных») ускорителях электронов и ионов, которые в свою очередь уже используются для генерации рентгеновского излучения [2,6,7] и нейтронов в DD-реакции [8,9]. Следует также отметить, что, например, в обзоре [6] описаны новые экспериментальные эффекты, физика которых не вполне выяснена: «газовое» усиление энергии и тока электронов, механизм генерации ионов, автофокусировка электронных и ионных пучков, спектр электронов с кратными энергиями, простирающийся до 1 МэВ. Выяснение физики этих и других наблюдаемых эффектов может позволить понять процессы, происходящие в пироэлектрическом генераторе и использовать возможности нового метода ускорения.

В ННЦ ХФТИ начаты исследования в этом направлении [10]. В настоящей работе представлен ряд новых результатов, полученных на пироэлектрическом ускорителе Института плазменной электроники и новых методов ускорения ННЦ ХФТИ. В [6,11-13] отмечалось, что параметры пироэлектрических генераторов сильно зависят от многих факторов, поэтому необходима их индивидуальная настройка. В настоящей работе проведено исследование спектров рентгеновского излучения при изменении давления газа в генераторе, а также высоты и площади сечения рабочей поверхности кристалла ниобата лития. Приведены также численные качественные оценки энергии ускоренных в пироэлек-

трическом генераторе электронов в зависимости от высоты и площади пироэлектрического кристалла.

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Подробное описание экспериментальной установки пироэлектрического генератора рентгеновского излучения (ПРИ) приведено в нашей предыдущей работе [10]. В данной работе измерялись спектры рентгеновского излучения электронов, ускоренных с помощью пироэлектрического кристалла LiNbO₃ (ниобат лития). Из анализа энергетических спектров были получены зависимости граничной энергии и интегрального выхода рентгеновского излучения от давления остаточного газа, а также от высоты и площади поверхности кристалла.

Для проведения экспериментов были изготовлены кристаллы из LiNbO₃ следующих размеров: 4 кристалла одинаковой площади 4×8 мм, перпендикулярной оси Z, но разной высоты вдоль оси Z (1 мм, 2 мм, 4 мм и 8 мм) и 3 кристалла площадью 4×4 мм и высотами 1 мм, 2 мм и 4 мм. Все измерения проводились при одинаковых циклах нагревания и охлаждения: нагревание от -50⁰ С до +100⁰ С в течение 15 минут и охлаждение в том же диапазоне температур и времени. Во всех экспериментах с разными кристаллами расстояние L от поверхности кристалла до коллиматора устанавливалось равным 9 мм. Кристаллы располагались Z-плоскостью в сторону детектора. Ниже эта плоскость называется рабочей плоскостью или поверхностью. Противоположная плоскость кристалла находилась в контакте с заземленным хладо(тепло)проводом. Схема генератора приведена на Рис.1.

3. СПЕКТРЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Спектрометрический тракт состоял из Si(Li) рентгеновского детектора типа БДЭР-2-25, спектрометрического усилителя Лангур и анализатора импульсов АИ-4096, Нарва. Эффективность регистрации детектора практически постоянна в диапазоне энергий излучения 5...25 кэВ и быстро падает с ро-

стом энергии излучения свыше 25 кэВ. Она описана в работе [14]. Энергетическая калибровка рентгеновского спектрометра производилась по спектральным линиям радиоактивного источника Am-241. Измерение каждого спектра проводилось в течение нагрева (охлаждения) кристалла вплоть до прекращения излучения при стабилизации температуры кристалла. Типичные спектры в режиме нагревания и охлаждения показаны на Рис.2,3, соответственно.

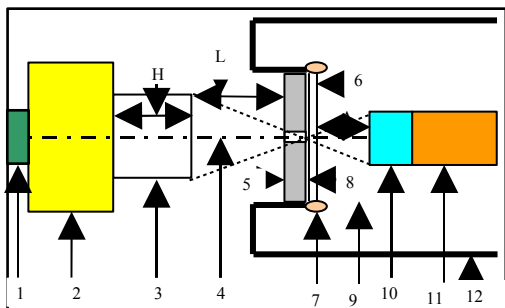


Рис.1. Схема генератора.

1 – нагревательный элемент; 2 – теплопровод из Al; 3 – кристалл LiNbO_3 высотой H; 4 – ось симметрии генератора; 5 – свинцовый коллиматор толщиной 2 мм с диаметром отверстия 1 мм; 6 – входное бериллиевое окно $\text{Si}(\text{Li})$ детектора толщиной 20 мкм; 7 – клей, соединяющий входное окно 6 с кожухом 12 детектора; 8 – мишень из меди толщиной 20 мкм, расположенная за коллиматором 5; 9 – внутренний объем детектора с вакуумом порядка 10^{-7} Торр; 10 – $\text{Si}(\text{Li})$ детектор площадью 25 мм^2 , расположенный на расстоянии $A = 5 \text{ мм}$ от входного окна 6; 11 – теплопровод детектора; L – расстояние от поверхности кристалла 3 до коллиматора 5 равно 9 мм

В процессе нагревания на рабочей поверхности кристалла благодаря пирозлектрическому эффекту возникает нескомпенсированный положительный заряд. Поэтому электроны ускоряются в промежутке между свинцовым коллиматором и кристаллом по направлению к кристаллу. Попадая в кристалл, ускоренные электроны производят рентгеновское излучение, которое проходит через свинцовый коллиматор, медную фольгу, бериллиевую фольгу и регистрируются детектором. Один из измеренных спектров этого излучения показан на Рис.2. Он содержит плавно изменяющийся спектрально-однородный фон тормозного излучения электронов в кристалле с граничной энергией около 45 кэВ. Резкий скачок спектральной плотности тормозного излучения объясняется резким изменением прозрачности медной фольги вблизи К-края поглощения Cu при энергии 9.0 кэВ. На непрерывном фоне есть два спектральных пика с энергиями 16.6 и 18.6 кэВ, которые совпадают со справочными значениями характеристических K_α и K_β линий атома Nb. Наличие этих пиков свидетельствует о том, что наблюдаемое излучение генерируется 'электронами в кристалле LiNbO_3 .

В процессе охлаждения на рабочей поверхности кристалла возникает нескомпенсированный отрица-

тельный заряд. Поэтому электроны в генераторе ускоряются в направлении от кристалла. Пройдя через свинцовый коллиматор, электроны поглощаются в медной фольге, производя в ней рентгеновское излучение, которое проходит через бериллиевую фольгу и регистрируются детектором. Один из измеренных спектров этого излучения показан на Рис.3.

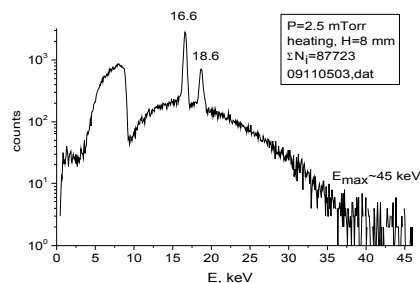


Рис.2. Типичный спектр рентгеновского излучения в режиме нагревания кристалла LiNbO_3 высотой 8 мм, площадью $4 \times 8 \text{ мм}$ при давлении остаточного газа 2.5 мТорр

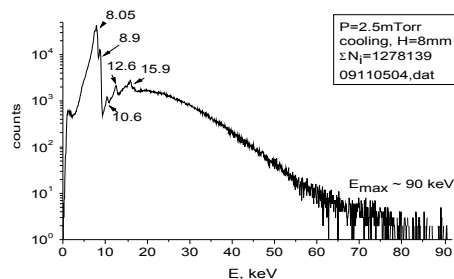


Рис.3. Типичный спектр рентгеновского излучения в режиме охлаждения кристалла LiNbO_3 высотой 8 мм, площадью $4 \times 8 \text{ мм}$ при давлении остаточного газа 2.5 мТорр

Он содержит плавно изменяющийся спектрально-однородный фон тормозного излучения электронов в медной фольге с граничной энергией около 90 кэВ. Резкий скачок спектральной плотности объясняется резким изменением прозрачности медной фольги вблизи К-края поглощения Cu при энергии 9.0 кэВ. На непрерывном фоне есть два спектральных пика K_α и K_β характеристического излучения меди с энергиями 8.05 и 8.9 кэВ, соответственно, возбуждаемых электронами в атомах Cu. Кроме того, видны спектральные особенности с энергиями 10.6, 12.6 и 15.9 кэВ, обусловленные L-линиями характеристического излучения и краями поглощения атомов Pb, из которого изготовлен коллиматор. Это излучение возбуждается ускоренными электронами на краях свинцовой диафрагмы, установленной перед детектором. Наличие соответствующих пиков характеристического излучения свидетельствует о том, что наблюдаемое излучение производится ускоренными электронами, движущимися в направлении детектора.

Граничная энергия в спектре тормозного излучения не может превышать энергию электронов, которые его производят. Максимальная энергия электронов, ускоренных в пирозлектрическом генераторе, несколько превышает, но близка к граничной энер-

гии в спектре тормозного рентгеновского излучения. Например, максимальная энергия электронов в случае охлаждения кристалла (см. спектр на Рис.3) составляет не менее 90 кэВ. Считая, что электроны малых энергий испускаются с рабочей поверхности кристалла, а затем ускоряются в электрическом поле в направлении свинцового коллиматора и медной фольги, приходим к выводу, что в процессе охлаждения кристалла на его рабочей поверхности возникает нескомпенсированный потенциал не менее 90 кВ. Таким образом, спектры рентгеновского излучения оказываются весьма информативными, а их анализ позволяет продвинуться в понимании физических процессов, происходящих в пирозлектрическом генераторе.

4. ИЗМЕРЕНИЯ ГРАНИЧНОЙ ЭНЕРГИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ, ВЫСОТЫ И ПЛОЩАДИ КРИСТАЛЛОВ

В первом цикле было измерено 72 спектра рентгеновского излучения при разных давлениях газового промежутка ПГРИ, с использованием пирозлектрических кристаллов разной высоты.

Из измеренных рентгеновских спектров (при использовании 4 кристаллов LiNbO_3 одинаковой площади 4×8 мм, но разной высоты вдоль оси Z – 1 мм, 2 мм, 4 мм и 8 мм) определялась граничная энергия тормозного рентгеновского излучения, которая соответствует и максимальной энергии ускоренных электронов. Результаты измерений представлены на Рис.4-5. Графики зависимости граничной энергии рентгеновских квантов от давления P газовой среды ПГРИ при разных высотах H кристалла приведены на Рис.4 отдельно для режимов нагревания и охлаждения. Зависимости граничной энергии от высоты кристалла для режимов нагревания и охлаждения показаны на Рис.5.

Исследование влияния площади кристалла на спектры рентгеновского излучения выполнялось на двух кристаллах одинаковой высоты ($H=4$ мм), но разной площади рабочей поверхности (4×8 мм и 4×4 мм). С этими двумя кристаллами были измерены 36 спектров при различных давлениях газа в ПГРИ. Полученные экспериментальные результаты измерений представлены на Рис.6-7. Приведены графики зависимости интегрального выхода (Рис.6) и граничной энергии (Рис.7) рентгеновского излучения от давления остаточного газа для кристаллов разной площади поверхности при нагревании и охлаждении. Интегральным выходом в данном случае мы называем сумму числа счетов в каналах по всему зарегистрированному спектру.

Анализируя данные на Рис.4-7, можно сделать следующие выводы:

1) Граничная энергия рентгеновского излучения существенно возрастает с увеличением высоты H кристалла вдоль оси Z .

2) Максимум граничной энергии тормозного излучения находится при давлениях газовой среды ПГРИ в пределах от 0,1 до 5 мТорр для высоких

кристаллов LiNbO_3 .

3) Наблюдается нелинейная зависимость между высотой кристалла и граничной энергией тормозного излучения (а значит, и энергией ускоренных электронов) при одинаковой площади кристаллов.

4) Увеличение площади излучаемой поверхности кристалла в два раза (с 4×4 мм до 4×8 мм) приводит к увеличению интегрального выхода рентгеновского излучения более чем в два раза, в особенности при нагревании (в некоторых случаях наблюдалось увеличение в 10 раз).

5) Увеличение площади излучаемой поверхности кристалла в два раза (с 4×4 мм до 4×8 мм) приводит к существенному увеличению граничной энергии рентгеновского излучения. Этот неожиданный эффект наблюдался в широком диапазоне давлений остаточного газа.

Отметим, что зависимость выхода и граничной энергии рентгеновского излучения от давления газа существенно более плавная для кристаллов малой высоты. Возможно, это связано с более равномерным прогревом кристалла по объему.

Отметим также некоторую нестабильность результатов измерений с кристаллами большой высоты. Из-за этой нестабильности, приведенные на графиках зависимости, носят в значительной мере качественный характер.

5. ВЛИЯНИЕ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ НА ЭНЕРГИЮ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Будем полагать, что граничная энергия тормозного рентгеновского излучения приблизительно равна максимальной энергии электронов и определяется потенциалом на рабочей поверхности кристалла. Рассмотрим этот потенциал, который равен разности потенциалов между Z и Z^+ плоскостями кристалла, или, иными словами, между рабочей и заземленной поверхностями кристалла или между рабочей поверхностью кристалла и электродом, находящимся под потенциалом земли. На Рис.1 таким электродом является корпус детектора с коллиматором.

В каждый момент времени t в цикле нагревания-охлаждения пирозлектрического кристалла разность потенциалов между рабочей поверхностью кристалла и землей может быть определена по формуле (3.1) в [5]:

$$\Delta \phi(t) = \frac{Q(t)4S}{C_{cr} + C_{gap}}, \quad (1)$$

где Q – средняя плотность некомпенсированного пирозлектрического заряда, образующегося на поверхности кристалла при изменении его температуры, S – площадь кристалла, C_{cr} – емкость кристалла, C_{gap} – емкость промежутка между рабочей поверхностью кристалла и электродом.

Зависимость Q от времени (в цикле нагревания-охлаждения) определяется изменением температуры кристалла и скоростью деградации образующегося поверхностного заряда. Если бы в процессе нагрева (охлаждения) деградации не было, то

$$Q = \gamma \chi \Delta T, \quad (2)$$

где γ – пирозлектрический коэффициент, ΔT – изменение температуры кристалла от начала цикла.

Обычно [5,12,13], C_{cr} и C_{gap} определяют по стандартным формулам для плоского конденсатора:

$$C_{cr} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{cr} \chi S}{d_{cr}}, \quad C_{gap} = \frac{\epsilon_0}{d_{gap}} \chi S, \quad (3)$$

где d_{cr} – высота кристалла, d_{gap} – расстояние между кристаллом и плоским электродом, ϵ_{cr} – диэлектрическая проницаемость кристалла, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Таким образом,

$$\Delta \phi = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_{cr}} \chi \frac{d_{cr}}{1 + \frac{d_{cr}}{\epsilon_{cr} d_{gap}}}, \quad (4)$$

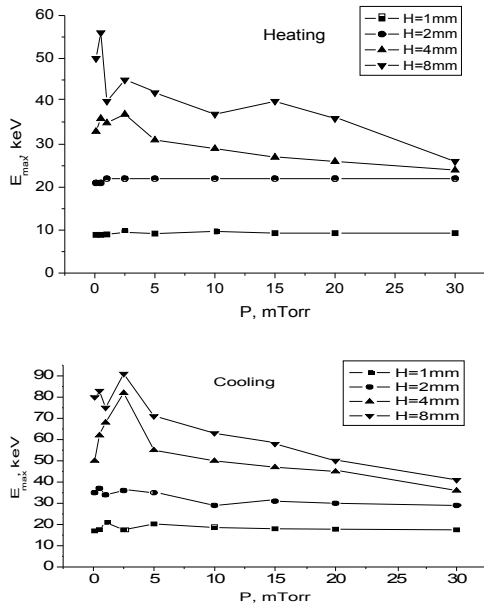


Рис. 4. Зависимости граничной энергии тормозного излучения E_{max} от давления P газовой среды ПГРИ, при разных высотах кристалла H , в случае нагревания (Heating) и охлаждения (Cooling)

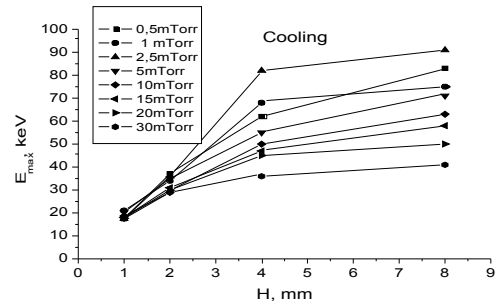
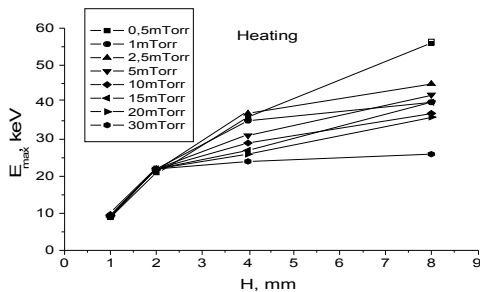


Рис. 5. Зависимости граничной энергии тормозного излучения E_{max} от высоты H при разных давлениях P газовой среды ПГРИ в случае нагрева и охлаждения

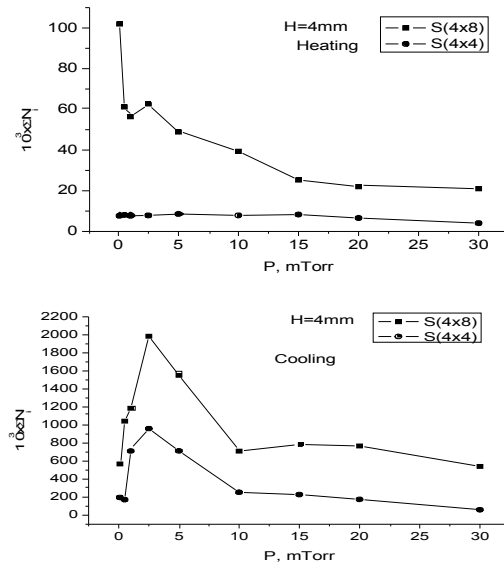


Рис. 6. Зависимости интегрального выхода рентгеновского излучения от давления остаточного газа для кристаллов разной площади поверхности

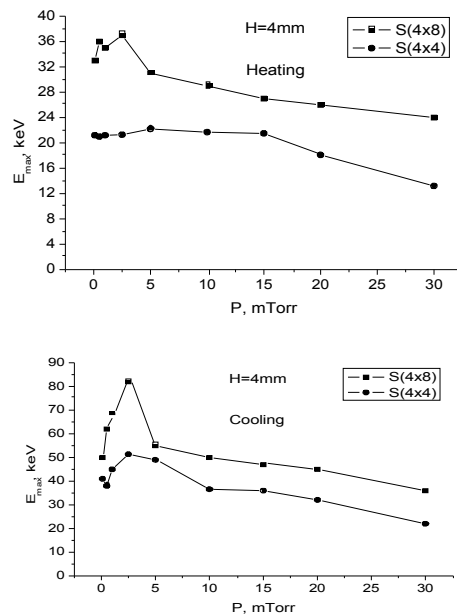


Рис. 7. Зависимости граничной энергии тормозного излучения от давления остаточного газа для кристаллов разной площади поверхности

$$\Delta \phi \approx \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_{cr}} \chi d_{cr}, \quad d_{cr} \ll d_{gap}, \quad C_{gap} \ll C_{cr} \quad (5)$$

Из соотношений (4), (5) следует, что разность потенциалов, а значит и энергия ускоренных электронов (если они проходят всю разность потенциалов, начиная с нулевой энергии), должна линейно зависеть от высоты кристалла и не зависеть от площади кристалла. Однако это находится в противоречии с нашими экспериментальными результатами, представленными на Рис.4,5,7.

Возможное объяснение наблюдаемого эффекта может быть связано с тем, что формулы для емкости плоского конденсатора (3) верны лишь для случая, когда расстояние d между обкладками очень мало по сравнению с их линейными размерами. Если же величина d больше линейных размеров обкладок, то начинают сказываться краевые эффекты (неоднородность поля вблизи краев конденсатора), которые, видимо, необходимо учитывать при оценке энергии электронов в пирозлектрическом генераторе.

Для плоскопараллельных конденсаторов различной формы расчет емкости с учетом краевых эффектов можно провести по различным (имеющимся в научной литературе) приближенным формулам. В частности, ниже приведены приближенные формулы и расчеты с учетом краевых эффектов емкости плоского конденсатора с круглыми пластинами одинакового радиуса r и расстоянием между пластинами d в однородной среде. Формулы взяты из работы [15].

При $\frac{d}{r} < 0.4$,

$$C \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi r^2}{d} \left[1 + \frac{3}{16} \frac{r}{d} \ln \frac{r}{d} - 1 + \frac{d}{4\pi r} \ln \frac{d}{2r} \right] \quad (6)$$

$$C \approx 4\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi r^2}{4d} \left[1 + \frac{3}{16} \frac{r}{d} \ln \frac{r}{d} - 1 + \frac{d}{4\pi r} \ln \frac{d}{2r} \right], \quad 0.4 \leq \frac{d}{r} < 2.5, \quad (7)$$

$$C \approx \frac{4\epsilon_0 \epsilon_r r^2}{d} \left[1 - \frac{2r}{\pi d} \ln \frac{r}{d} + \frac{7}{12} \frac{r^2}{d^2} \ln^2 \frac{r}{d} + \frac{33}{40} \frac{r^3}{d^3} \ln^3 \frac{r}{d} \right], \quad \frac{d}{r} \geq 2.5, \quad (8)$$

Емкость плоскопараллельного конденсатора в неоднородной среде с $\epsilon_2 > \epsilon_1$ (диэлектрическая проницаемость внутри конденсатора равна ϵ_2 , а вокруг него ϵ_1) определяется по формуле [14]:

$$C(\epsilon_2) \approx C(\epsilon_1) + \epsilon_0 \frac{(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{d} S, \quad (9)$$

где $C(\epsilon_1)$ – емкость конденсатора с плоскопараллельными (произвольной формы, но одинаковыми обкладками) в однородной среде с ϵ_1 .

Используя формулы (6)-(9), можно качественно оценить энергию ускоренных электронов в пирозлектрическом ускорителе в зависимости от высоты и площади кристалла при прочих равных условиях. В качестве примера, на Рис.8 приведены зависимости от высоты кристалла d значений ожидаемой энергии ускоренных электронов для цилиндрического кристалла радиусом 0.32 см, диэлектрической

проницаемостью $\epsilon = 31$, пирозлектрическим коэффициентом $\gamma = 0.82 \cdot 10^{-4}$ C/(m² K) (пирозлектрик LiNbO₃) и электродом того же радиуса, расположенным на расстоянии 1 см от кристалла. Предполагается, что плотность заряда на поверхности кристалла равна $Q = \gamma \chi \Delta T$ с $\Delta T = 50$ градусов. Кривая 1 на Рис.8 построена с использованием формул (3), кривая 2 – формул (6),(9). На Рис.9 приведена зависимость энергии электронов от радиуса кристалла при фиксированной высоте 0.4 см.

Результаты расчетов, представленных на Рис.8, позволяют качественно объяснить нелинейную зависимость потенциала на поверхности пирозлектрика от высоты кристалла. Нелинейность объясняется увеличением влияния краевых эффектов с увеличением высоты кристалла.

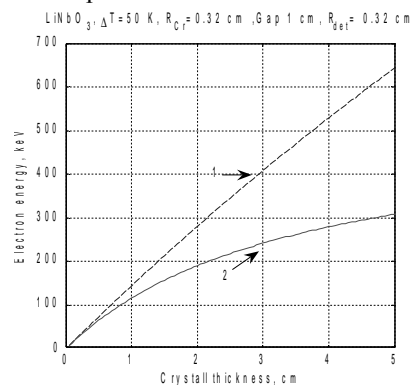


Рис.8. Зависимость энергии ускоренных электронов от высоты кристалла. 1 – оценка по формуле (4) без учета краевых эффектов, 2 – оценка по формулам (6)-(9) с учетом краевых эффектов

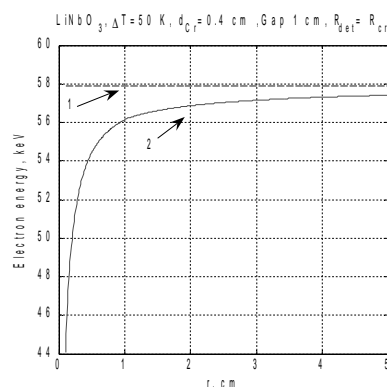


Рис.9. Зависимость энергии ускоренных электронов от радиуса кристалла. 1 – оценка по формуле (4) без учета краевых эффектов, 2 – оценка по формулам (6)-(9) с учетом краевых эффектов

Результаты расчетов, представленных на Рис.9 зависимостей, позволяют качественно объяснить зависимость потенциала на поверхности пирозлектрика от площади кристалла. Частично зависимость объясняется увеличением влияния краевых эффектов с уменьшением площади кристалла. Однако, в эксперименте (Рис.7) мы наблюдали существенно более сильную зависимость граничной энергии тормозного излучения от площади кристалла, чем это могло бы быть объяснено только влиянием краевых эффектов.

Таким образом, наблюдаемые зависимости от размеров пьезоэлектрического кристалла можно, по крайней мере, качественно и/или частично, объяснить влиянием краевых эффектов на потенциал на поверхности кристалла. Для численного сравнения следует учесть реальную форму кристалла и электродов, утечку заряда через газ и поверхность кристалла, деградацию заряда через ток ускоренного пучка, а также размер детектора.

5. ВЫВОДЫ

В работе проведены измерения граничной энергии тормозного излучения пьезоэлектрического генератора при различных давлениях газа в зависимости от высоты и площади пьезоэлектрического кристалла. Подтверждена нелинейная зависимость максимальной энергии электронов от высоты кристалла, которая раньше отмечалась в работах [11-13]. Обнаружена существенная зависимость максимальной энергии электронов от площади кристалла. Показано, что одной из причин этих явлений может быть влияние краевых эффектов на величину потенциала на поверхности пьезоэлектрического кристалла. Обнаружено нелинейное увеличение выхода рентгеновского излучения при нагревании с увеличением площади кристалла.

Работа выполнена при частичной поддержке НТЦУ, проект №1911.

ЛИТЕРАТУРА

1. B. Rosenblum, P. Braunlich, J.P. Carrico. Thermally stimulated field emission from pyroelectric LiNbO₃ // *Appl. Phys. Lett.*, 1974, v.25, p.17.
2. J.D. Brownridge. Pyroelectric X-ray generator // *Nature*, 1992, v.358, p.287.
3. G. Rosenman, I. Rez. Electron emission from ferroelectric materials // *J. Appl. Phys.*, 1993, v.73, p.1904.
4. J.D. Brownridge, S. Raboy. Investigation of pyroelectric generation of X-rays // *J. Appl. Phys.*, 1999, v.86, p.640.
5. G. Rosenman, D. Shur, Ya.E. Krasik, A. Dunaevsky. Electron emission from ferroelectrics // *J. Appl. Phys.*, 2000, v.88, p.6109 (Review).
6. 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.
7. <http://www.amptek.com/coolx.html>. *Amptek Inc., Miniature X-ray generator with pyroelectric crystal*.
8. B. Naranjo, J.K. Gimzewski, S. Putterman. Observation of nuclear fusion driven by pyroelectric crystal // *Nature*, 2005, v.434, p.1115.
9. J. Geuther, Ya. Danon, F. Saglime. Nuclear reactions induced by a pyroelectric accelerator // *Phys. Rev. Lett.* 2006, v.96, 054803.
10. 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, вып.43(2), с.214-216; *E-preprint physics/0309049*. September 10, 2003, 5 p.
11. J. Geuther, Ya. Danon, F. Saglime, B. Sones. *Electron acceleration for X-ray production using paired pyroelectric crystals*. Proc. of 6 Intern. Meeting on Nucl. Applications of Accel. Technology, San Diego, 2003, AccApp'03, p.124.
12. J. Geuther, Ya. Danon. Electron and positive ion acceleration with pyroelectric crystals // *J. Appl. Phys.* 2005, v.97, 074109.
13. J. Geuther, Ya. Danon. High-energy X-ray production with pyroelectric crystals // *J. Appl. Phys.* v.97, 104916, 2005.
14. A.V. Shchagin, N.A. Khizhnyak. Differential properties of parametric X-ray radiation from a thin crystal // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1996, v.B119, p.115-122.
15. Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. *Расчет электрической емкости*. Ленинград: «Энергоиздат», 1981, с.288.

STUDIES INTO THE PROPERTIES OF X-RAY RADIATION OF THE PYROELECTRIC GENERATOR DEPENDING ON ITS OPERATION REGIME

V.I. Nagaychenko, V.V. Sotnikov, B.I. Ivanov, A.M. Yegorov, A.V. Shchagin

Experiments were made to investigate spectra of X-ray radiation of the pyroelectric X-ray generator based on crystal LiNbO₃ at variations in the residual gas pressure in the generator's chamber in the range 0.5...30 mTorr. The energy of accelerated electrons reached 90 keV. It is noted that with an increasing height of crystals at a fixed crystal working surface area, the maximum X-ray radiation energy first increases linearly and then shows a tendency to saturation. It was found, that at a fixed crystal height, a two-fold increase in the area of the crystal leads to sufficient increase in the maximum X-ray radiation energy and to significant increase in the integrated yield of X-ray radiation. The energy of electrons accelerated in the PXRG is numerically evaluated. It is shown, that one of the reason of observed phenomena may be the influence of the edge effect on the value of the potential on the pyroelectric crystal surface.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЬЕОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ

В.І. Нагайченко, В.В. Сотніков, Б.І. Іванов, О.М. Єгоров, А.В. Щагін

Проведено дослідження властивостей рентгенівського випромінювання піроелектричного генератора на основі кристала ніобата літію при зміні тиску залишкового газу в камері генератора в межах 0.5...30 мТорр. Енергія прискорених електронів досягала 90 кеВ. Відзначається, що гранична енергія в спектрі гальмового рентгенівського випромінювання лінійно зростає зі збільшенням висоти кристала до декількох міліметрів, а для великих висот кристала ріст енергії сповільнюється. Виявлено, що збільшення в два рази площі поверхні кристала приводить до істотного збільшення граничної енергії рентгенівського випромінювання і значному збільшенню інтегрального виходу рентгенівського випромінювання. Приведені також чисельні оцінки енергії електронів, що прискорюються в піроелектричному генераторі. Показано, що однієї з причин явищ, що спостерігаються, може бути вплив крайових ефектів на величину потенціалу на поверхні піроелектричного кристала.