

ЗАВИСИМОСТЬ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ РАБОТЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

А.Н. Олейник^{1,2,*}, Е.В. Болотов¹, М.Э. Гильц¹, О.О. Иващук^{1,3},
А.А. Кленин¹, А.С. Кубанкин^{1,3}, А.В. Щагин^{1,4}

¹⁾ Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

²⁾ Колледж Ройял Холлоуэй, Эгам, Великобритания

³⁾ Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

⁴⁾ Харьковский физико-технический институт, Харьков, Украина

^{*} e-mail: andreyoleynik92@mail.ru

Одним из малоизученных фундаментальных аспектов проявления пирозлектрического эффекта в условиях вакуума является определение корреляции между максимально возможным генерируемым электрическим потенциалом и диапазоном изменения температуры пирозлектрика. Как правило, величину максимального генерируемого электрического потенциала на поверхности пирозлектрика можно оценить по величине максимальной энергии спектра рентгеновского излучения. Представлены результаты исследования зависимости максимальной энергии рентгеновского излучения от величины предварительного изменения температуры монокристалла танталата лития (LiTaO_3). Полученная зависимость демонстрирует что максимальные возможности генерации рентгеновского излучения пирозлектрическим источником проявляются при применении импульсного режима генерации.

Мотивация работы

Одним из малоизученных фундаментальных аспектов проявления пирозлектрического эффекта в условиях вакуума является определение корреляции между максимально возможным генерируемым электрическим потенциалом и диапазоном изменения температуры пирозлектрика. Как правило, величину максимального генерируемого электрического потенциала на поверхности пирозлектрика можно оценить по величине максимальной энергии спектра рентгеновского излучения. Из определения пирозлектрического эффекта, количество индуцируемого заряда прямо пропорционально степени изменения температуры, что позволяет предположить такой же характер зависимости и для величины генерируемого электрического потенциала. Для корректного определения зависимости величины максимального электрического потенциала от диапазона изменения температуры необходимо достижение высокого вакуума, порядка 10^{-5} - 10^{-6} Торр, для того чтобы ограничить утечки заряда через окружающую среду и тем самым, создать условия чтобы большая часть заряда осталась на поверхности пирозлектрика. Однако при таком давлении остаточного газа, генерация рентгеновского излучения становится гораздо слабее, что в итоге не дает корректно оценить максимальный возможный генерируемый электрический потенциал при осуществлении пирозлектрического эффекта в условиях высокого вакуума. Помочь в решении этой задачи может недавно представленный способ управления пирозлектрическим источником рентгеновского излучения, заключающийся в модуляции работы источника импульсами электронов от дополнительного источника. После предварительного изменения температуры, электроны от дополнительного источника инжектируются в промежуток между пирозлектриком и мишенью, и ускоряются в какую-либо из двух сторон, вызывая усиление эффекта генерации рентгеновского излучения. Такая операция позволяет увеличить пиковую интенсивность генерируемого излучения, минимум, на два порядка по сравнению со стандартными пирозлектрическими источниками и получить импульсный режим генерации рентгеновского излучения для данного типа источников. В данной работе представляются результаты определения зависимости генерируемого при пирозлектрическом эффекте электрического потенциала на свободной поверхности монокристалла танталата лития (определяется по граничной энергии рентгеновского излучения) от величины предварительного изменения температуры пирозлектрика. В различных измерениях варьировалась величина предварительного изменения температуры пирозлектрика ΔT . Спектры рентгеновского излучения, получаемые при различных величинах ΔT сравнивались и анализировались.

Эксперимент

Генерация рентгеновского излучения осуществлялась в импульсном режиме после достижения определенной величины изменения температуры. Пирозлектрик, монокристалл танталата лития (LiTaO_3) цилиндрической формы (диаметр 20 мм, высота 10 мм, вектор спонтанной поляризации ориентирован вдоль оси цилиндра) был ориентирован таким образом, что при нагреве пирозлектрика на его свободной поверхности индуцировался положительный заряд.

Следует выделить три стадии эксперимента: предварительный нагрев, облучение поверхности при помощи дополнительного эмиттера электронов и естественное охлаждение (Рисунок 1а). Кристалл предварительно разогревался при помощи элемента Пельтье при давлении остаточного газа около 2×10^{-5} Торр. После завершения предварительного нагрева, включался эмиттер электронов на короткое время (около 15 секунд). В качестве эмиттера использовалась нить накала, напряжение на которой составляло 1В. Электроны ускорялись к положительно заряженной поверхности пирозлектрика, что приводило к генерации тормозного и характеристического рентгеновского излучения при торможении их на атомах пирозлектрика (Рисунок 1б). Далее эмиттер электронов выключался, пирозлектрик естественным образом охлаждался, вызывая индукцию отрицательного заряда на полярной поверхности и генерацию рентгеновского излучения при бомбардировке мишени ускоренными от поверхности пирозлектрика электронами. В качестве мишени использовалась пластина из нержавеющей стали.

Результаты

Включение дополнительного эмиттера электронов при отсутствии активного изменения температуры (Стадия II) вызывает массовую генерацию рентгеновского излучения с максимальной граничной энергией. В период действия нити накала, активного изменения температуры пирозлектрика и индукции заряда на его поверхности не было, что свидетельствует о том, что источником электрического поля является заряд, накопленный на поверхности пирозлектрика в период предварительного нагрева. Более длительное облучение (более 15 секунд) поверхности пирозлектрика источником электронов не имеет смысла, так как весь накопленный положительный заряд компенсируется налетающими электронами.

При относительно небольших величинах предварительного изменения температуры (порядка 10-40 °C) данная зависимость линейная, однако дальнейшее повышение этой величины приводит к постепенному насыщению граничной энергии в области 80 кэВ. По всей видимости это связано с увеличением доли заряда, которая теряется с полярной поверхности через окружающую среду, боковые поверхности и объем пирозлектрика при повышении количества заряда, индуцируемого на полярную поверхность пирозлектрика. Оценки максимальной энергии электронов при изменении температуры монокристалла танталата лития на 50 °C в однокристалльной схеме показывают, что максимально достижимая энергия составляет приблизительно 100 кэВ^{1,2}, что согласуется с полученными нами результатами. Разность оценки и экспериментально наблюдаемого значения граничной энергии, позволяет оценить долю теряемого заряда в 20% от общего количества индуцируемого заряда. Также стоит отметить, что изменение температуры на относительно небольшую величину (около 10 °C) уже позволяет наблюдать генерацию рентгеновского излучения с граничной энергией уже около 40 кэВ.

Изменение температуры еще на меньшую величину приводит к резкому ослаблению эффекта генерации рентгеновского излучения, что затрудняет корректное определение граничной энергии спектра при малой величине предварительного изменения температуры. Итак, применение импульсного режима генерации рентгеновского излучения с применением дополнительного эмиттера электронов позволяет получить верхнюю оценку граничной энергии рентгеновского излучения при изменении температуры пирозлектрика на определенную величину. Меньшая энергия рентгеновского излучения будет свидетельствовать о наличии процессов, приводящих к повышенной утечке заряда с поверхности пирозлектрика или отсутствию баланса между положительным и отрицательным зарядом при термоциклировании. Отдельно стоит отметить, что проведенные измерения ясно показывают, что применение импульсного режима работы пирозлектрического источника позволяет получить максимальные характеристики генерируемого излучения, что позволяет рассчитывать, что именно такой режим работы позволит использовать пирозлектрические источники рентгеновского излучения в различных приложениях.

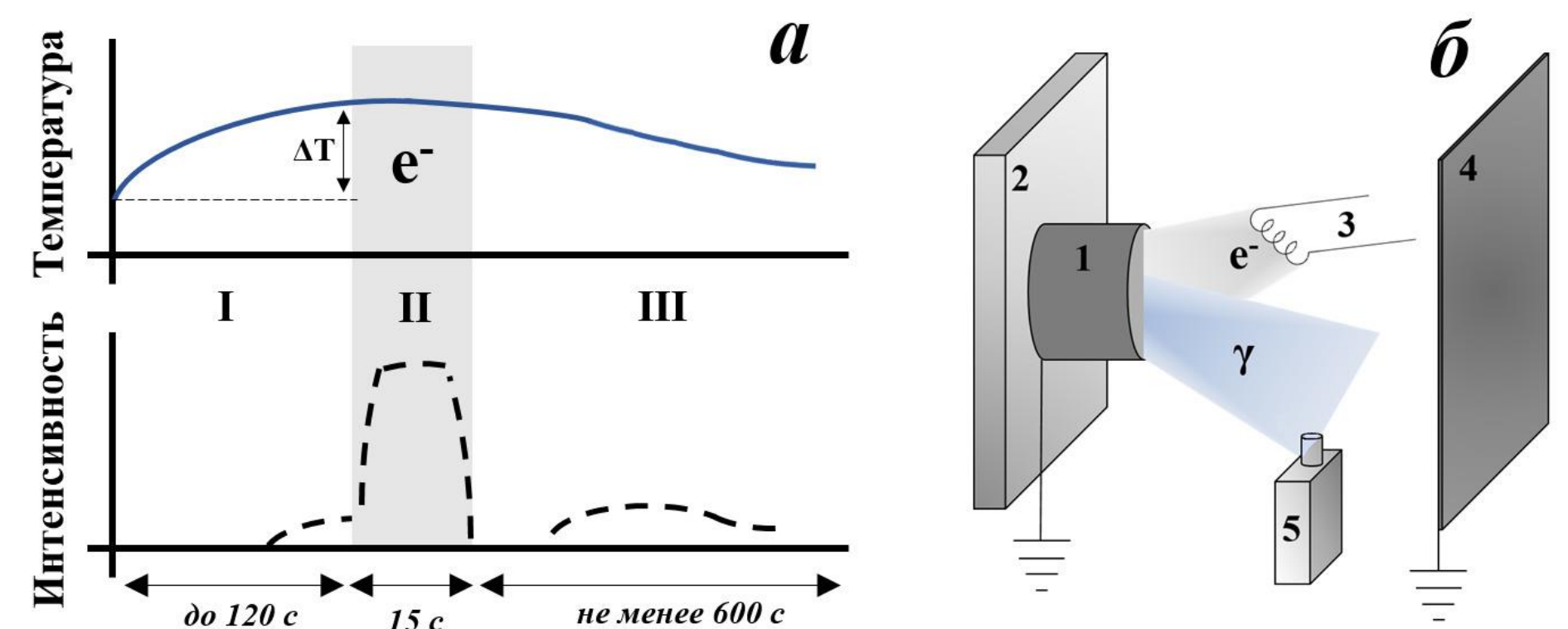


Рисунок 1. (а) Изменение температуры пирозлектрика и интенсивности генерируемого рентгеновского излучения в ходе эксперимента. Выделяются следующие стадии эксперимента: I - предварительный нагрев пирозлектрика, II - освещение пирозлектрика дополнительным эмиттером электронов, III - естественное охлаждение пирозлектрика. (б) Схема генерации рентгеновского излучения с поверхности пирозлектрика при действии дополнительного эмиттера электронов. 1 - пирозлектрический кристалл танталата лития, 2 - элемент Пельтье, 3 - эмиттер электронов (нить накала), 4 - мишень, 5 - детектор рентгеновского излучения (Amptek XR-100SDD).

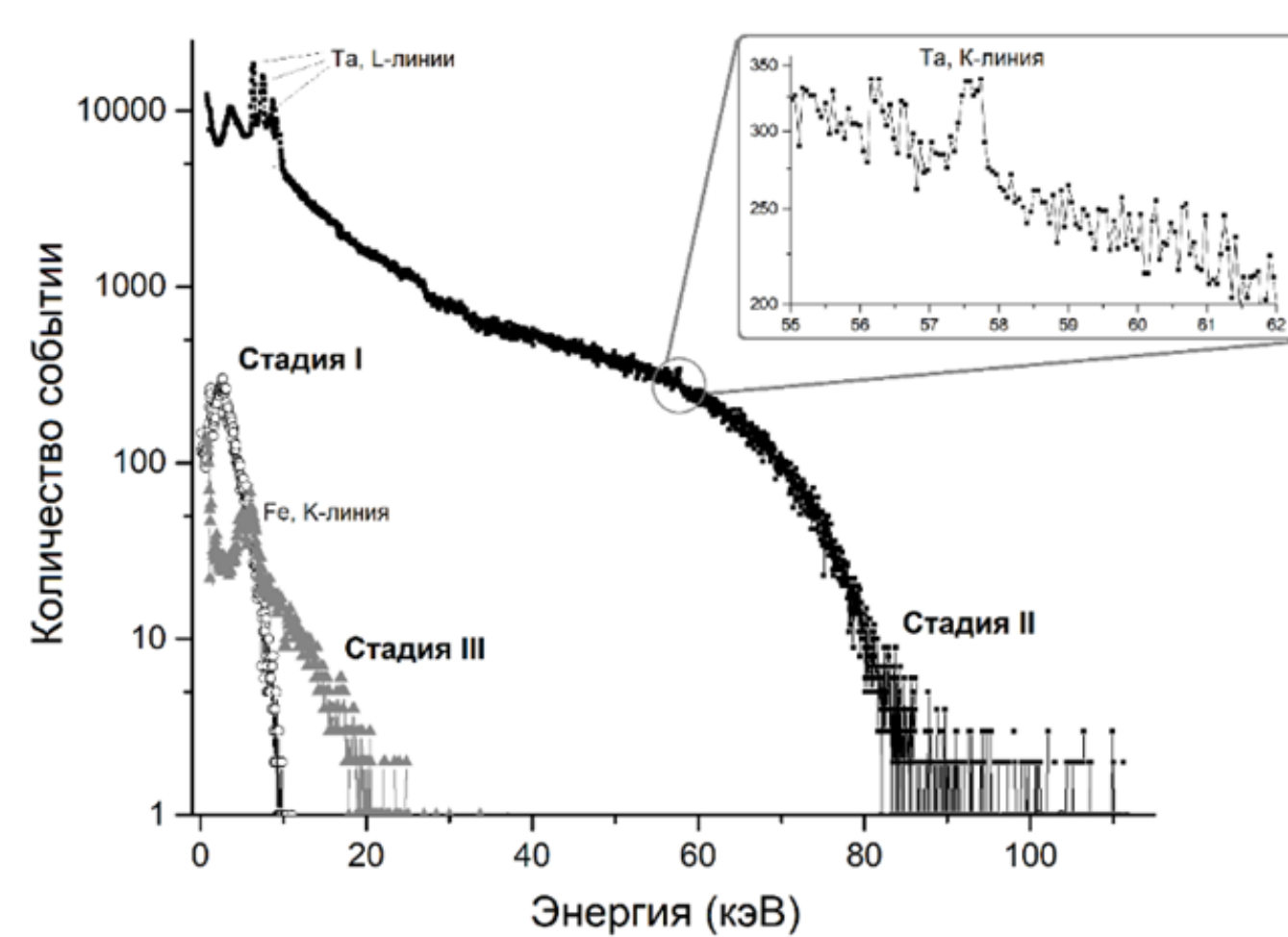


Рисунок 2. Спектры рентгеновского излучения, зарегистрированные при предварительном нагреве (стадия I), облучении дополнительным источником электронов (стадия II) и последующем естественном охлаждении пирозлектрика (стадия III). Во вкладке показана часть спектра с характеристической K-линией тантала, зарегистрированного во время стадии II эксперимента.

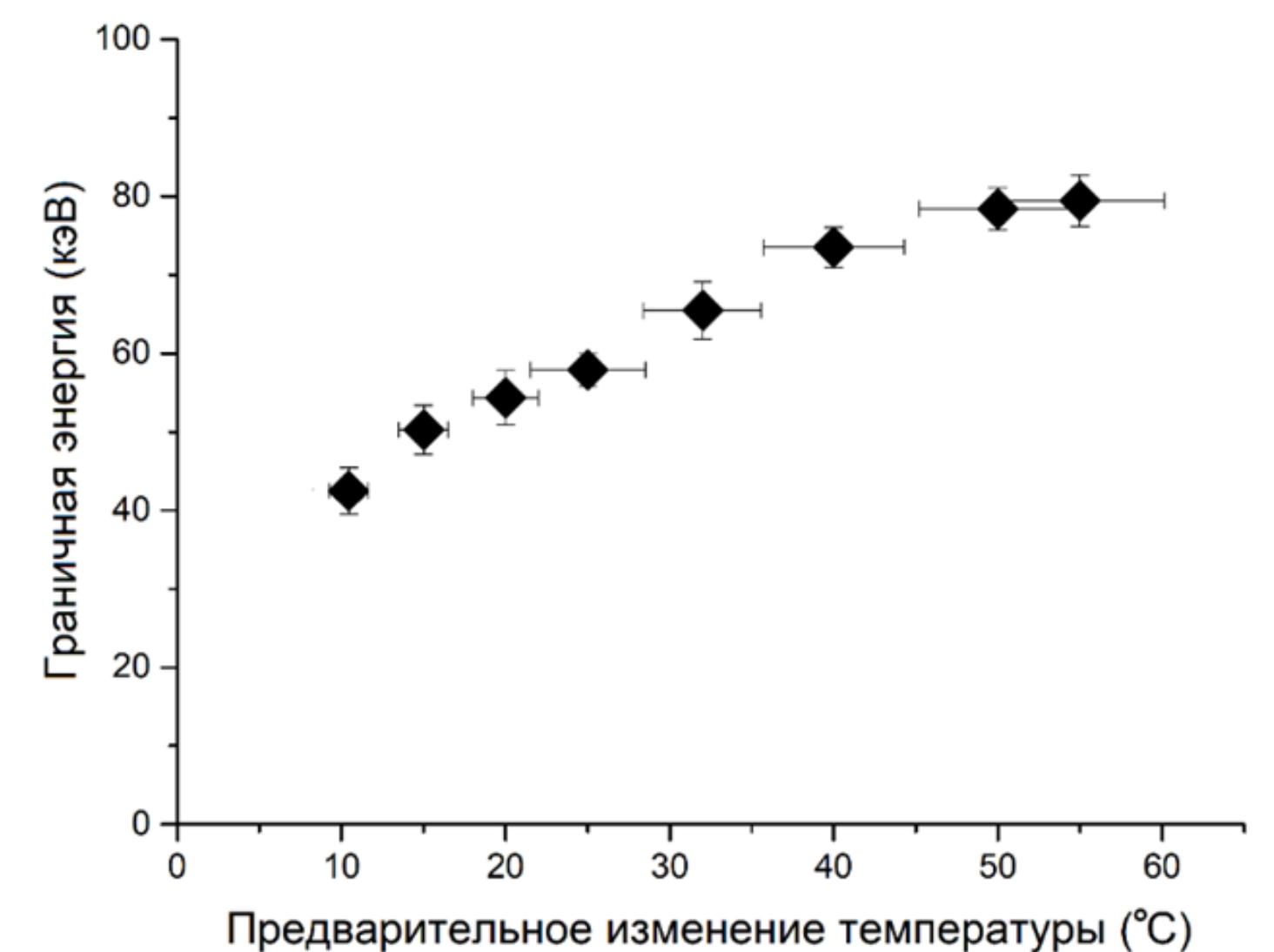


Рисунок 3. Зависимость граничной энергии рентгеновского излучения, генерируемого при работе дополнительного источника электронов от величины предварительного изменения температуры.

1. Geuther J.A., Danon Y. High-energy x-ray production with pyroelectric crystals. J. Appl. Phys. 2005. Vol. 97. P. 104916.

2. Geuther, J. Radiation generation with pyroelectric crystals. PhD Thesis. 2007. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.