

# Методика измерения пироэлектрических токов в сегнетоэлектрических материалах с помощью кратковременных импульсов лазерного излучения

И.Л. Мыльников, А.И. Дедык, Ю.В. Павлова, А.П. Буровихин, А.А. Семенов, М.А. Мишнев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** представлены результаты разработки методики оценки пироэлектрических токов в сегнетоэлектриках при воздействии периодических импульсов лазерного излучения. Собран измерительный стенд и проведены экспериментальные исследования влияния теплового воздействия импульсов лазерного излучения на образцы сегнетоэлектрических материалов. По полученным экспериментальным данным проводилась оценка величины пироэлектрического тока.

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрики, пироэлектрики, пироэлектрический ток, лазерное излучение, электрокалорический эффект

## Введение

При разработке нового типа твердотельных охлаждающих устройств и преобразователей энергии на основе сегнетоэлектрических (СЭ) материалов необходимо учитывать множество различных эффектов, возникающих при изменении температуры. Одним из них является пироэлектрический ток (пироток) [1], возникающий из-за изменения спонтанной поляризации сегнетоэлектрика. Термодинамический анализ показал, что для устройств, работающих на электрокалорическом эффекте (ЭКЭ), необходимо учитывать вклад пиротока [2].

Существующие методы измерения пиротока можно разделить на статические и динамические [3].

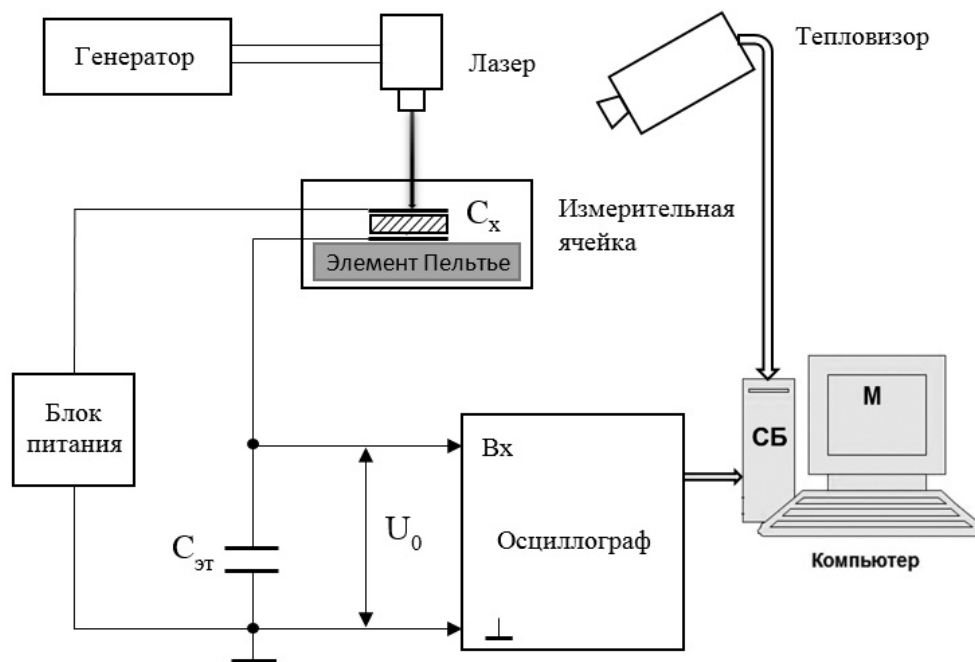
Статические методы определяют изменение поляризации по изменению физических величин при различных постоянных температурах. В отличие от статических методов динамические методы используют непрерывное изменение температуры, которое обычно задается линейной или периодической функцией.

Преимуществами динамических методов являются чувствительное к фазе обнаружение сигнала, обеспечивающее более высокое отношение сигнал-шум и точность.

Однако, динамические методы измерения пироэлектрических токов, известные на сегодняшний день, не соответствуют режимам работы твердотельных охладителей на электрокалорическом эффекте. В настоящей работе предложена оригинальная методика измерения пиротоков, возникающих в результате теплового воздействия импульсов лазерного излучения на образцы СЭ материалов.

## Эксперимент

Для экспериментальной методики измерения пиротоков был создан стенд, представленный на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Блок схема экспериментальной установки для измерения пиротоков

В методике использована модифицированная схема Сойера-Тауэра. Вместо переменного напряжения используется постоянное напряжение, а модуляция заряда производилась кратковременными тепловыми импульсам лазерного излучения с длиной волны 460 нм.

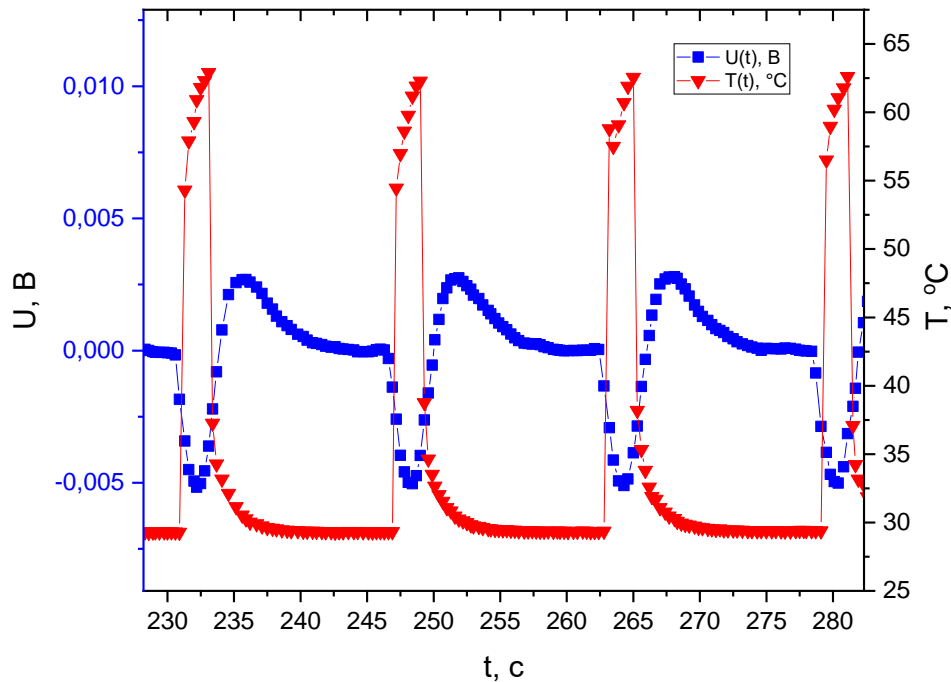
В качестве исследуемого сегнетоэлектрика использовался твердый раствор титана бария-стронция  $Ba_{0.62}Sr_{0.38}TiO_3$ .

Исследуемый образец помещался в измерительную ячейку и с помощью подвижного столика устанавливалась необходимая ориентация образца в пространстве. Для задания рабочей точки по температуре использован элемент Пельтье, температурный диапазон работы которого от  $-20$  до  $+110$  °С. Для создания начальной индуцированной поляризации в исследуемом СЭ образце от блока питания подавалось постоянное электрическое напряжение смещения. Так как при последовательном соединении конденсаторов в схеме заряд на конденсаторах  $C_x$  и  $C_{эт}$  одинаков, то напряжение между конденсаторами будет перераспределяться в соответствии с отношением  $(C_x/C_{эт}) = (U_0/U_x)$ . Т.к.  $C_{эт} \gg C_x$ , то практически всё напряжение, подаваемое на схему, приложено к образцу  $C_x$ . Ёмкость конденсатора  $C_{эт}$  составляет 1 мкФ, что позволяет подавить все лишние шумы с частотами выше нескольких десятков герц и выделить основной сигнал. Измерение уровня сигнала происходило при помощи высокоточного осциллографа.

Мощность излучения, период и длительность импульса лазера выбирались отдельно для каждого эксперимента, исходя из геометрии образца и исследуемого сегнетоэлектрического материала. При воздействии на образец лазерного излучения происходило нагревание СЭ. Из-за изменения температуры его поляризация менялась, и, следовательно, изменялась ёмкость исследуемого конденсатора. Изменение ёмкости влечёт за собой перераспределение зарядов между обкладками конденсаторов, как следствие разность потенциалов  $U_0$  менялась относительно первоначального значения. Это отклонение детектировалось, записывалось и выводилось на компьютер. Изменение температуры фиксировалось тепловизором и вместе с данными об изменении напряжения на эталонном конденсаторе передавалось на компьютер для

последующей обработке. Измерение напряжения и температуры были синхронизированы по времени с помощью специально написанной программы. Точность измерения температуры составляла  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рисунке 2 представлена последовательность импульсов напряжения  $U_0$ , возникающих при импульсном нагреве образцов лазером.



**Рисунок 2.** Последовательность импульсов напряжения, возникающих при импульсном нагреве образцов лазером

Далее проводился пересчёт зависимостей  $U_0(t)$  в зависимости пироэлектрического тока от времени  $I_{pyr}(t)$ . По определению плотность пироэлектрического тока:

$$J_{pyr} = \frac{\partial P}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{I_{pyr}}{S}$$

Тогда пироэлектрический ток можно записать как

$$I_{pyr} = S \frac{\partial P}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = S \frac{\partial P}{\partial t}$$

где  $S$  – площадь образца. Т.к изменение поляризации, обусловленное изменением температуры, можно записать как  $dP = dq/S$ , то пироток:

$$I_{pyr} = S \frac{dq}{dt}$$

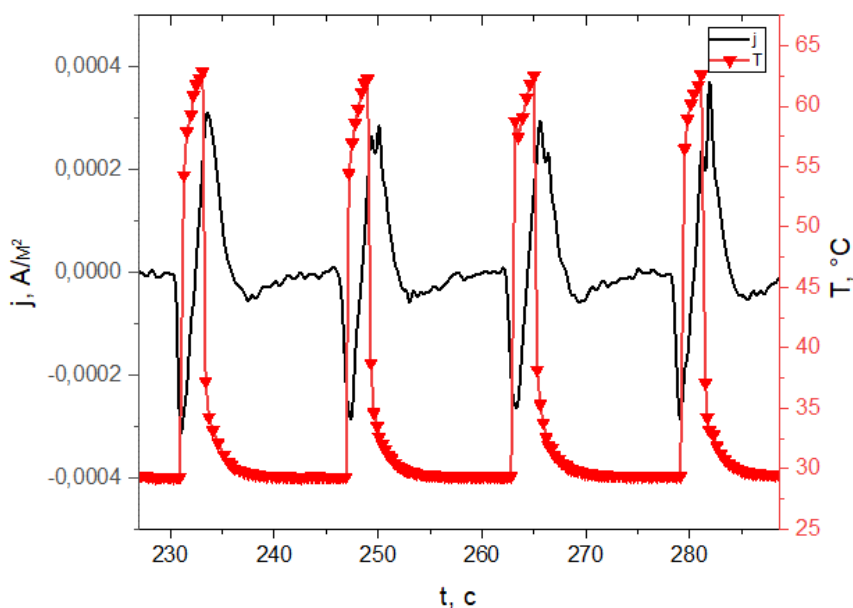
Изменение заряда СЭ конденсатора

$$dq = C_x dU_x$$

Поскольку заряды на конденсаторах  $C_x$  и  $C_0$  одинаковы, то и изменение зарядов на них также одинаково, зависимость пироэлектрического тока от времени следует рассчитывать в соответствии с выражением:

$$I_{pyr} = \frac{C_0 dU_0}{dt}$$

Пересчёт зависимостей  $U_0(t)$ , приведённых на рисунке 2 в зависимости пиротока от времени, представлен на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Последовательность импульсов пирозлектрического тока, возникающих при импульсном нагреве образцов лазером

По порядку величины и по характеру зависимостей пироток соответствует результатам, полученным другими авторами [4].

При температурных измерениях вклад в пирозлектрический ток могут вносить также токи термостимулированной деполяризации и фотопроводимость и явления на контакте металл-сегнетоэлектрик.

Было показано [5], что при напряжениях (50 – 150) В контактные явления можно не учитывать, т.к. наблюдается омическая проводимость, а при высоких напряжённостях полей вольт-амперная характеристика соответствует барьеру Шоттки. Высокая скорость нагрева позволяет исключить влияние токов термостимулированной деполяризации и токов фотопроводимости из-за больших времен релаксации глубоких ловушек. [6, 7].

## Заключение

Разработана методика обработки результатов для получения температурных зависимостей пирозлектрических токов.

Создана экспериментальная установка для измерения пирозлектрического отклика сегнетоэлектрических материалов при воздействии коротких импульсов лазерного излучения.

На основе анализа расчётных и экспериментальных результатов показано, что измеренные токи для  $Ba_{0.62}Sr_{0.38}TiO_3$  являются пирозлектрическими.

Достоинством и отличительной чертой предложенной методики от других динамических методов измерения пироток является большая скорость нагревания образцов, которая соответствует условиям работы ЭКЭ и позволяет не учитывать вклад в пироток сквозной проводимости, токов ТСД и фототоков.

## Список литературы

1. Chynoweth, A.G. Dynamic method for measuring the pyroelectric effect with special reference to barium titanate / A.G. Chynoweth // *Journal of Applied Physics*. – 1956. – Vol. 27. – № 1. – P. 78 – 84.
2. Струков, Б.А. Пирозлектрические материалы: свойства и применения / Б.А. Струков // *Соросовский образовательный журнал*. – 1998. – №5. – С .96 – 101.
3. Jachalke, S. How measure the pyroelectric coefficient? / S. Jachalke, E. Mehner, H. Stoecker [et al.] // *Applied Physics Reviews*. – 2017. – Vol. 4 – P. 021303-1 – 021303-17.

4. Смирнова, Е.П. Электрокалорический эффект в твердом растворе  $\text{BaTiO}_3\text{-SrTiO}_3$  / Е.П. Смирнова, Г.Ю. Сотникова, Н.В. Зайцева [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44. – № 2. – С. 49-55.
5. Мыльников, И.Л. Оценка влияния приэлектродных слоев на свойства сегнетоэлектрических конденсаторных структур / И.Л. Мыльников, Ю.В. Павлова, А.И. Дедык [и др.] // Сборник трудов шестой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 29 мая-1 июня 2017, с. 380-384
6. Вертопрахов, В.Н. Термостимулированные токи в неорганических веществах / В.Н. Вертопрахов, Е.Г. Сальман. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. – 333 с.
7. Бьюб, Р. Фотопроводимость твердых тел / Р. Бьюб. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 559 с.