

Методика измерения пирозлектрических 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 пирозлектрических 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 пирозлектрического тока.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, пирозлектрики, пирозлектрический 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 пирозлектрический 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 пирозлектрических 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.

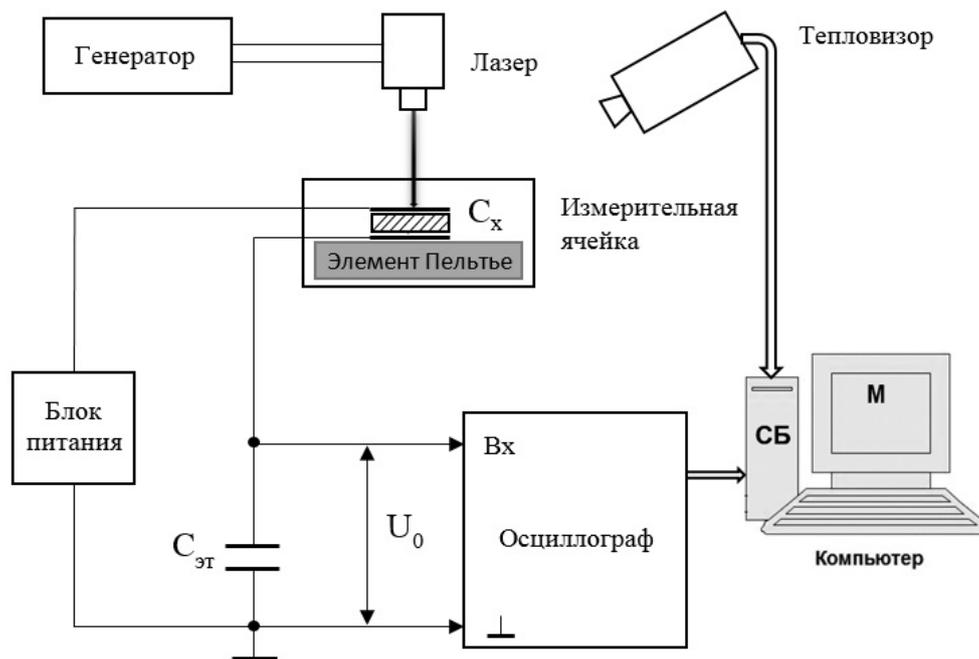


Рисунок 1. Блок схема экспериментальной установки для измерения пиротоков

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 $\text{Ba}_{0.62}\text{Sr}_{0.38}\text{TiO}_3$.

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 $C_{\text{эт}}$ одинаков, то напряжение между конденсаторами будет перераспределяться в соответствии с отношением $(C_x/C_{\text{эт}}) = (U_0/U_x)$. Т.к. $C_{\text{эт}} \gg C_x$, то практически всё напряжение, подаваемое на схему, приложено к образцу C_x . Ёмкость конденсатора $C_{\text{эт}}$ 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.

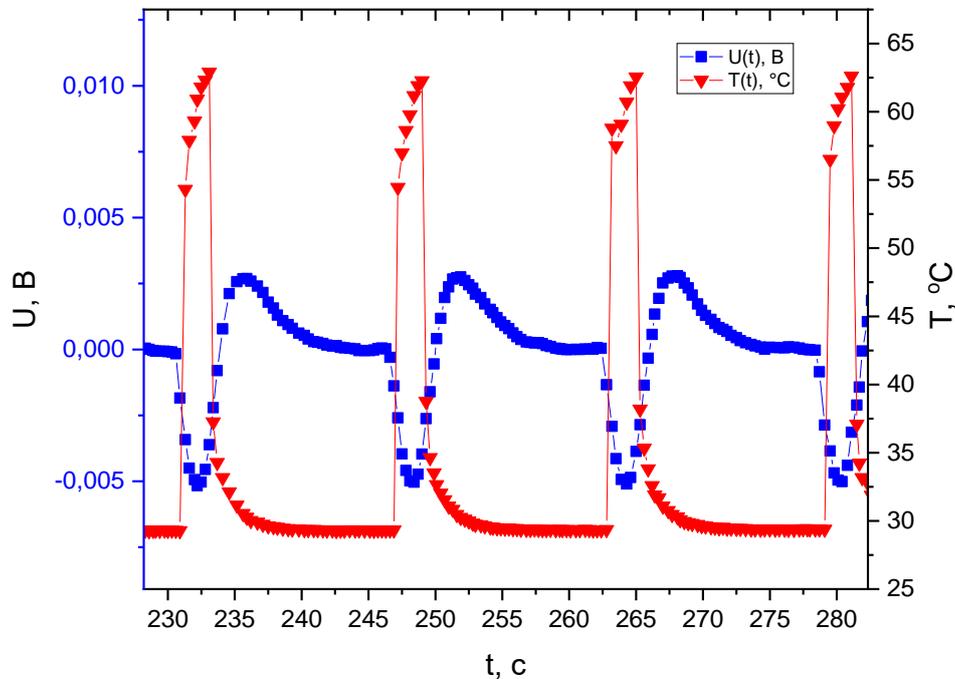


Рисунок 2. Последовательность импульсов напряжения, возникающих при импульсном нагреве образцов лазером

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.

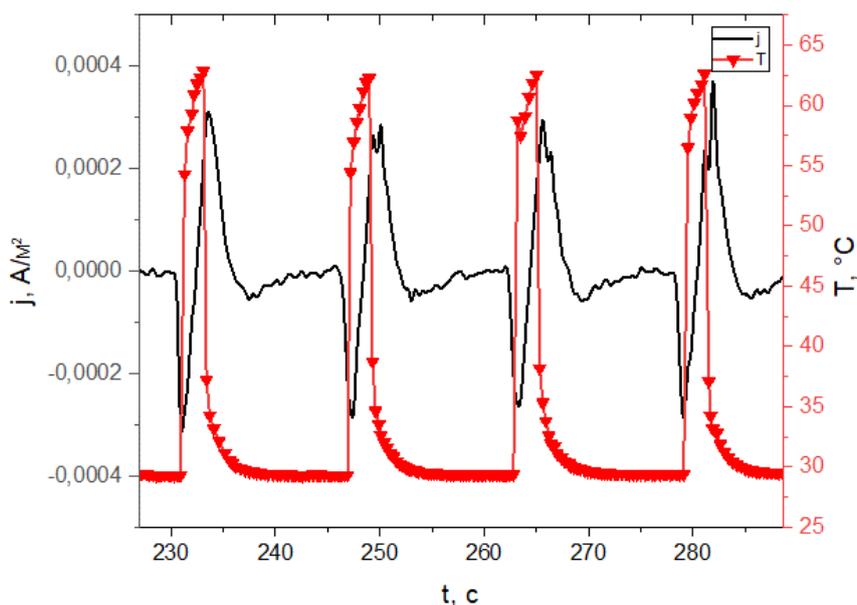


Рисунок 3. Последовательность импульсов пирозлектрического тока, возникающих при импульсном нагреве образцов лазером

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 пиротоков 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.