

Динамическая ИК-радиометрия: новый метод исследования пироэлектрических и электрокалорических свойств объемных и пленочных материалов

Г.Ю. Сотникова, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, К.Л. Муратиков, Р.С. Пассет,
Е.П. Смирнова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: g.sotnikova@mail.ioffe.ru

Представлен новый экспериментальный метод исследования пироэлектрических и электрокалорических свойств материалов в реальных условиях теплообмена, основанный на анализе динамики изменения температуры поверхности образца при различных видах внешнего воздействия. Метод включает экспериментальные алгоритмы и многоканальную установку, обеспечивающую формирование и *in situ* контроль сигналов входного воздействия (электрического и/или лазерного теплового) и результирующего отклика материала (электрического и/или температурного) с помощью быстродействующих высокочувствительных радиационных температурных сенсоров нового типа – неохлаждаемых узкополосных фотодиодов среднего ИК-диапазона спектра (MIR-сенсоры), чувствительных в спектральной области 2-5 μm . Они обеспечивают возможность бесконтактного измерения температуры участка поверхности объекта диаметром ~ 3 мм с точностью не хуже 50 мК вблизи 20°C с высоким временным разрешением ~ 1 ms. Точность измерений повышается с ростом температуры образца и достигает 5 мК в районе 100 °C и 1 мК при температурах выше 200 °C [1]. Дополнительным преимуществом предлагаемых радиационных сенсоров является их нечувствительность к лазерному излучению с длинами волн менее 1 μm [2]. Разработанная универсальная экспериментальная установка позволяет осуществлять непрерывный мониторинг температуры исследуемых объектов, включая объемные и пленочные образцы, при различных формах и амплитудах лазерного теплового и/или электрического воздействия, реализуя тем самым прямые методы измерения тепловых, электрических, пироэлектрических и электрокалорических свойств материалов и функциональных элементов на их основе.

Теоретическое обоснование экспериментальных методик и расчетных алгоритмов приведено в работах [1,3,4]. Представлена информационная модель образца полярного диэлектрического материала, основанная на его представлении как динамической системы с сосредоточенными параметрами, описываемой уравнением состояния $P = P(E, T)$. В экспериментальных исследованиях переменные состояния (температура T , электрическое поле E , поляризация P) являются измеряемыми величинами и представляют исходную информацию для количественного определения значений анализируемых параметров материала. Именно процедура получения исходной информации определяет точность и достоверность полученных значений, в частности, пироэлектрического и электрокалорического коэффициентов исследуемых материалов. Определены требования к форме возбуждающего теплового и/или электрического воздействия на образец и быстродействию измерительных сенсоров для получения достоверных количественных характеристик при исследовании пироэлектрического и электрокалорического (ECE) эффектов динамическими методами. Приведены расчетные алгоритмы и анализ методической погрешности определения пироэлектрического и электрокалорического коэффициентов при использовании различной формы лазерного теплового воздействия и методов (технических характеристик датчиков) измерения его температуры.

Измерение реального теплообмена образца является обязательным условием не только для достоверной экспериментальной количественной оценки электрокалорических и пироэлектрических свойств исследуемых материалов [3], но и их практического применения, так как для эффективного извлечения тепла рабочий элемент накопителя энергии/охлаждителя должен обладать достаточной массой. Анализ температурного отклика

образца на тепловой импульс в виде ступенчатой функции (переходной характеристики) позволяет определить истинное значение коэффициента теплообмена (H) образца с окружающей средой в реальных условиях эксперимента [4], в том числе и для различных конструкций электрокалорических охлаждающих элементов.

Прямое детектирование температуры образца в пирозлектрических измерениях, выполняемых обычно ЛММ методом [5], существенно повышает точность определения пирозлектрического коэффициента материалов, в том числе индуцированного внешним электрическим полем. Анализ формы температурного отклика образца при исследованиях индуцированного пирозэффекта при приложении электрического поля позволяет не только исключить влияние токов утечки на результаты измерения пирозкоэффициента, но и оценить величину проводимости материала, включая ее температурную зависимость [3].

Анализ формы температурного отклика образцов в электрокалорических исследованиях не только повышает достоверность определения основной количественной характеристики ЕСЕ – электрокалорической разности температур δT , но и дает возможность оценить пороговые значения напряженности приложенного электрического поля. Высокое быстродействие метода позволяет регистрировать предпробойное состояние образца, связанное с явлениями частичного разряда [6] и тем самым оптимизировать характер воздействия электрического поля, обеспечивая эффективную работу охлаждающих элементов в безопасном режиме, не приводящем к пробую.

Эффективность метода динамической ИК-радиометрии подтверждена большим количеством экспериментальных результатов исследования пирозлектрических и электрокалорических свойств образцов объемных керамических сегнетоэлектриков-релаксоров и многослойных структур на их основе, монокристаллов и пленок AlN на различных типах подложек. Экспериментально доказана возможность регистрации явлений частичного разряда и формирования токопроводящих каналов и их влияние на температурный отклик образца при приложении сильного электрического поля.

1. G.Yu. Sotnikova, G.A. Gavrilov, A.A. Kapralov, K.L. Muratkov, E.P. Smirnova, *Rev. Sci. Instrum.* **91**, 015119 (2020).
2. С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, Г.Ю. Сотникова, А.Л. Тер-Мартirosян, *ФТП* **48**, 135 (2014).
3. Г.Ю. Сотникова, Г.А. Гаврилов Г.А., К.Л. Муратиков, Р.С. Пассет, Е.П. Смирнова, *ФТТ* **63**, 730 (2021).
4. С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, К.Л. Муратиков, Г.Ю. Сотникова, *Письма в ЖТФ* **43**(14), 104 (2017).
5. S.V. Lang, D.K. Das-Cupta, *J. Appl. Phys.*, **59**(6) 2151 (1986).
6. Г.Ю. Сотникова, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Р.С. Пассет, Е.П. Смирнова, А.В. Сотников, *ФТТ* **62**(10) 1631 (2020).