

Моделирование твердотельного охладителя с электрокалорическими элементами

© А.В. Еськов, С.Ф. Карманенко, О.В. Пахомов*, А.С. Старков*

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий,
Санкт-Петербург, Россия

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ),
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: aeskow@mail.ru

На основе метода конечных элементов исследована динамика изменения температуры на краях слоистой структуры, состоящей из одного или более электрокалорических и теплопроводящих элементов, под воздействием импульсов периодического электрического поля. Рассмотрена возможность применения керамики и пленок (Ba, Sr)TiO₃ в качестве электрокалорических и теплопроводящих элементов охлаждающей линейной и радиальной структуры. Различие температуры в центре и на периферии в пленочной радиальной микро-структуре с двумя встречно-штыревыми кольцевыми электродными линиями составило 2.5 К. Увеличение количества линий и частоты электрического поля приводит к увеличению теплового эффекта.

PACS: 77.70.+a, 44.10.+i

1. Введение

Физические явления в твердом теле, приводящие к тепловым превращениям и преобразованию энергии, активно исследуются в последние годы с целью разработки на этой основе энергетически эффективных охлаждающих и генераторных устройств. Значительно возросло внимание исследователей к электрокалорическому (ЭК) эффекту в сегнетоэлектрических материалах. В основном проводятся исследования широкого круга сегнетоэлектрической керамики и пленок (титанаты, цирконаты, ниобаты свинца и других элементов второй и четвертой группы), проявляющих ощутимый ЭК-эффект в области комнатных температур [1–3]. Однако, значительная величина эффекта не является достаточным условием для того, чтобы электрокалорический элемент работал как охлаждающее устройство. Необходимо организовать эффективный термодинамический цикл и способ отвода тепла от охлаждаемого объекта. Поэтому работы в области моделирования охлаждающих и генераторных устройств, менеджмента энергетического преобразования и охлаждения, такие как [3–6], весьма актуальны в настоящее время. Для проведения моделирования могут применяться и традиционные, подробно исследованные сегнетоэлектрики, такие как титанат бария [7].

В настоящей работе приводятся результаты моделирования различных вариантов охладителей на основе ЭК-элементов, к которым прикладывается периодическое электрическое поле.

2. Модель охлаждающей линии с одним ЭК-элементом

Рассмотрим простую модель охлаждающей линии, изображенную на рис. 1, *a*. Она состоит из одного ЭК-элемента, отделенного от окружающей среды теплопроводящими слоями $[0-x_1]$ и $[x_2-L]$. Будем исследовать

одномерную модель и считать, что температура меняется только вдоль оси x . Одна граница ($x = 0$) является теплоизолированной, на другой поддерживается постоянная температура T_0 , которая равна начальной температуре. Теплоемкость $C(x)$ и теплопроводность $\lambda(x)$ материала принимаются как постоянные величины в пределах одного участка линии. Тогда распределение температуры $T(x, t)$ вдоль линии находится в результате решения уравнения теплопроводности [8]

$$C(x) \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda(x) \frac{\partial T}{\partial x} + Q(x, t, T), \quad (1)$$

которое удовлетворяет начальному и граничным условиям

$$T(x, 0) = T_0; \quad \lambda_0 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad T \Big|_{x=L} = T_0. \quad (2)$$

Функция $Q(x, t, T)$ определяет количество тепла, выделяемое (или поглощаемое) тепловым ЭК-источником, и задается в виде, представленном в работах [5,6,9],

$$Q(x, t, T) = -T \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (3)$$

где E — напряженность электрического поля на ЭК-элементе, P — поляризация диэлектрика. Функция $Q(x, t, T)$ отлична от нуля только на ЭК-элементе. Зависимость поля E от времени имеет период, равный A , и представляет собой функцию, состоящую из импульсов, изображенных на рис. 1, *b*. При подаче периодической последовательности импульсов на сегнетоэлектрический конденсатор выполняется цикл, представленный на $T-S$ -диаграмме, где T — температура элемента, S — энтропия элемента (рис. 1, *c*), который обеспечивает охлаждение одного из концов ЭК-элемента.

Интервал 1 на рис. 1 соответствует заряду конденсатора и поляризации сегнетоэлектрика, что ведет к уменьшению энтропии. В течение интервала 2 тепло, выделившееся во время заряда, растекается по структуре,

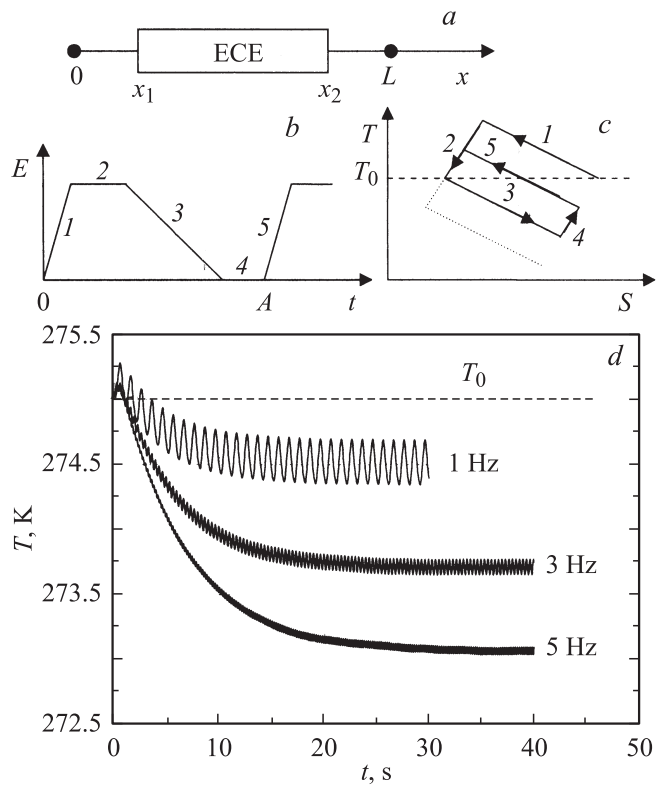


Рис. 1. Моделирование твердотельной линии с одним ЭК-элементом (ECE). *a* — модель охлаждающей линии с одним ЭК-элементом, *b* — форма импульсов, подаваемых на ЭК-элемент, *c* — термодинамический цикл, реализуемый в охлаждающей линии, *d* — динамика изменения температуры на левом конце охлаждающей линии с одним элементом.

оставляя конденсатор заряженным, но при температуре порядка начальной. Интервал 3 соответствует разряду конденсатора, приводящему к его охлаждению и увеличению энтропии за счет деполяризации. В интервал времени 4 охлажденный конденсатор способен воспринять тепло от охлаждаемого тела, находящегося в точке 0. Начинается нагрев конденсатора, для недопущения возвращения конденсатора к первоначальному состоянию прикладывается следующий импульс 5. В дальнейшем цикл повторяется (показано пунктирной линией). Вследствие нелинейности производной поляризации используемого диэлектрика от температуры и выбора рабочей точки количество тепла, которое электрокалорический элемент способен воспринять во время разряда, больше количества тепла, выделившегося в нем во время заряда.

Численное моделирование процесса охлаждения осуществлялось с помощью метода конечных элементов. За начальную температуру принималось значение $T_0 = 275$ К, которая поддерживалась на конце охлаждающей линии ($x = L$). Амплитуда электрического поля составляла $5 \text{ V}/\mu\text{m}$. В качестве материала сегнетоэлектрического конденсатора и теплопроводящих элементов использовалась керамика $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ (BST) с плотно-

стью $\rho = 6.0 \text{ g/cm}^3$, теплопроводностью $\lambda = 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ и теплоемкостью $c = 900 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

Периодические импульсы электрического поля подавались на ЭК-элементы с частотой $f = 1/A$, которая варьировалась в пределах 1–5 Hz. Они приводили к периодическому нагреванию (охлаждению) ЭК-элементов и перераспределению температурного поля вдоль структуры. После действия серии циклов электрического поля, приложенных к твердотельной структуре, определялось распределение температуры между свободным концом охлаждающей линии ($x = 0$) и теплообменником ($x = L$). На рис. 1, *d* представлены результаты компьютерного моделирования изменения температуры, из которого следует, что температура свободного конца линии существенно зависит от частоты прикладываемых импульсов. После приведения серии циклов переключений система переходит в установившийся температурный режим, и в дальнейшем температура совершает только небольшие колебания около среднего значения.

3. Охлаждающие линии с двумя ЭК-элементами и моделирование радиальной планарной структуры

Аналогичный подход к моделированию ЭК-элементов был использован для твердотельной линии, включающей два ЭК-элемента, схема которой приведена на рис. 2, *a*. Между двух ЭК-элементов размещается теплопроводящий элемент, которые соединяют ЭК-элементы с охлаждаемым объектом ($x = 0$) и теплообменником ($x = L$) соответственно.

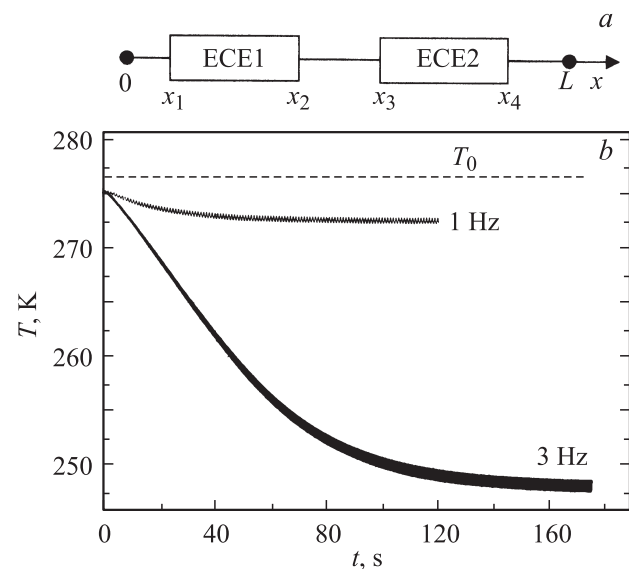


Рис. 2. Моделирование твердотельной линии с двумя ЭК-элементами. *a* — охлаждающая линия с двумя ЭК-элементами, *b* — динамика изменения температуры на левом конце охлаждающей линии с двумя элементами.

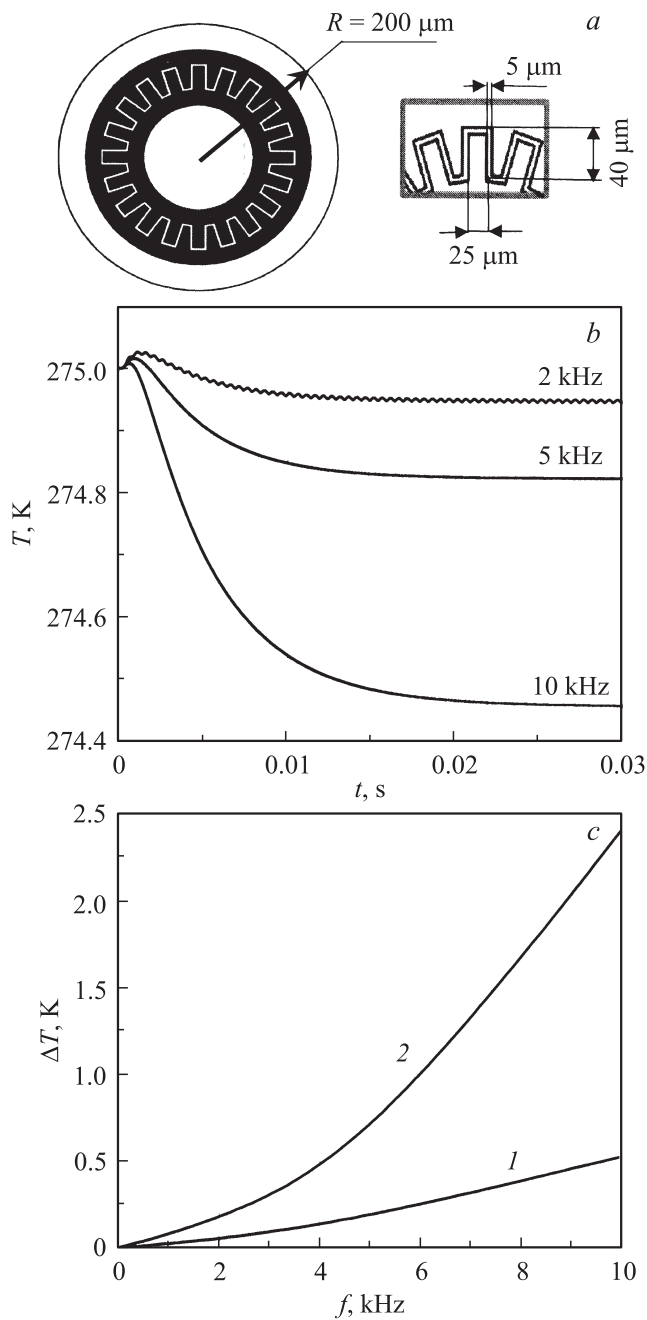


Рис. 3. Моделирование радиальной твердотельной линии. *a* — прототип планарного радиального охладителя, *b* — динамика понижения температуры в центре структуры, *c* — зависимость изменения эффекта охлаждения от частоты для радиальных систем с разным числом электродов (см. текст).

Результаты расчета тепловых процессов в приведенной структуре показаны на рис. 2, *b*. Выигрыш от использования дополнительного элемента на частоте 1 Hz составляет 2.5° , а на частоте 3 Hz уже 25° . Вследствие большого количества взаимосвязанных параметров рассматриваемой структуры (таких как длина элементов и тепловых связей, фазовый сдвиг и частота импульсов) выбор оптимальных рабочих параметров линии с двумя

и большим количеством элементов возможен лишь с применением автоматизированных комплексов численного анализа и методов глобальной оптимизации.

Твердотельная охлаждающая структура на основе ЭК-элементов может иметь радиальную пленочную конструкцию. В работе проводилось моделирование радиального твердотельного охладителя, сформированного на основе круглой сапфировой подложки. На подложку осаждалась пленка $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$ толщиной $1 \mu\text{m}$. На поверхности пленки BST формировалась электродная встречно-штыревая кольцевая топология, вид которой приведен на рис. 3, *a*. На внешней границе радиальной микроструктуры (периферии) поддерживалась постоянная температура. Серия периодических импульсов напряжения, приложенная на электродное кольцо, приводит к выделению или поглощению тепловой энергии в пленке BST. Применение пленок сегнетоэлектрика вместо керамики позволяет значительно увеличить частоту следования переключающих импульсов и таким образом увеличить мощность теплового потока. Периодическая температурная неоднородность передается в подложку, выполняющую функцию теплопровода. В микроструктуре формируется тепловой поток, направленный вдоль радиуса структуры. При определенных физических и геометрических параметрах микроструктуры тепловой поток имеет направление от центра к периферии, что приводит к отводу тепловой мощности от нагретого объекта, размещенного в центре, или к понижению температуры.

В работе проводилось моделирование радиального охладителя с одной линией электродов. Диаметр охладителя составлял 0.4 mm , а ширина зазора в электродах — $5 \mu\text{m}$. Моделирование проводилось методом конечных элементов для частот 2, 5 и 10 kHz, амплитуда подаваемого поля $3 \text{ V}/\mu\text{m}$. На рис. 3, *b* представлены временные зависимости изменения температуры в центральной точке микроструктуры для различной частоты. Расчет показал, что на структуре с одним кольцом электродов можно получить понижение температуры $\sim 0.5 \text{ K}$ на частоте 10 kHz.

На рис. 3, *c* представлены сводные зависимости эффекта охлаждения в радиальной структуре при разных частотах для систем с одной (1) и двумя (2) линиями электродов. Видно значительное увеличение температурного перепада в радиальном охладителе при увеличении количества встречно-штыревых кольцевых электродов.

4. Заключение

На основе метода конечных элементов и специализированных компьютерных программ решения дифференциальных уравнений в частных производных создана методика проведения вычислительных экспериментов с твердотельными охлаждающими структурами, включающими электрокалорические элементы. Моделирование

температурных распределений в линейных и радиальных структурах, включающих один и более ЭК-элемент, показало, что мощность теплового потока, направленного от одного конца охлаждающей линии к другому (или от периферии к центру), сильно зависит от размерных характеристик линий, формы и частоты периодического электрического поля. Наиболее перспективными являются микроструктуры на основе пленок сегнетоэлектриков, которые позволяют получать перепад температуры в несколько градусов при частоте поля 10 kHz на длине менее 1 mm, что представляет собой многообещающий результат для построения эффективных твердотельных охлаждающих малогабаритных устройств.

Список литературы

- [1] A.S. Mischenko, Q. Zhang, J.F. Scott, R.W. Whatmore, N.D. Marhur. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 242 912 (2006).
- [2] D. Guyomar, G. Sebald, B. Guiffard, L. Seveyrat. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 4491 (2006).
- [3] G. Sebald, S. Pruvost, D. Guyomar. *Smart Mater. Struct.* **17**, 015 012 (2008).
- [4] Liu Shaobo, Li Yanqiu. *Mater. Sci. Eng. B* **113**, 46 (2004).
- [5] S.F. Karmanenko, O.V. Pakhomov, A.M. Prudan, A.S. Starkov, A.V. Es'kov. *J. Eur. Cer. Soc.* **27**, 3109 (2007).
- [6] О.В. Пахомов, А.С. Старков, С.Ф. Карманенко, А.В. Еськов. *Вестн. Междунар. акад. холода* **2**, 31 (2007).
- [7] G. Aksay, S.P. Alpay, G.A. Rossetti, J.F. Scott. *J. Appl. Phys.* **103**, 024 104 (2008).
- [8] В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. *Теплопередача. Энергия*, М. (1975). 492 с.
- [9] M. Marvan, A.K. Jonscher, J. Fahnrich. *J. Eur. Cer. Soc.* **21**, 1345 (2001).