

**Еськов А.В.^{1,2}, Белявский П.Ю.^{1,2}, Анохин А.С.², Пахомов О.В.²,
Семенов А.А.¹, Мильников И.Л.^{1,2}, Никитин А.А.^{1,2}**

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ»

²Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

Моделирование многослойного электрокалорического элемента твердотельного охладителя

На основе метода конечных элементов проведено тепловое моделирование многослойного электрокалорического охлаждающего элемента. Показана возможность получения в подобных элементах объемной мощности охлаждения в несколько десятков ватт на сантиметр кубический.

Ключевые слова: электрокалорический эффект, титанат бария-стронция, твердотельные охлаждающие устройства.

Научно-техническое направление, связанное с разработкой и широким внедрением в практику компактных, экологически безопасных, экономичных и высоконадежных тепловых насосов, и охладителей, работающих как в комнатных условиях, так и в области криогенных температур, чрезвычайно актуально для современного общества. Среди разнообразных альтернативных технологий трансформаторов тепла большой интерес исследователей и разработчиков во всем мире привлекает возможность использования электрокалорического эффекта в твердотельных структурах [1,2]. Главной технической трудностью, стоящей на пути создания малогабаритных высокоэффективных твердотельных охладителей на электрокалорическом эффекте, является необходимость использования тепловых ключей для осуществления процесса отвода тепла от охлаждаемого объекта [3-5]. Ранее, в работах [6-9], предложены принцип построения и термодинамический цикл работы электрокалорического охладителя без использования тепловых ключей. Принцип работы основан на том, что величины электрокалорического эффекта в сегнетоэлектрических материалах при поляризации и деполяризации сегнетоэлектрического образца при одной и той же температуре неодинаковы [10].

В данной работе проведено компьютерное моделирование варианта многослойного активного элемента твердотельного электрокалорического охладителя, работающего без использования тепловых ключей. В качестве материала для моделирования многослойного элемента был выбран твердый раствор титаната бария-стронция ($\text{Ba}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{TiO}_3$) в котором экспериментально была показана разница величины электрокалорического эффекта при поляризации и деполяризации на уровне 0.006К. На рис. 1 представлена экспериментально полученная температурная зависимость величины электрокалорического эффекта для твердого раствора $\text{Ba}_{0.65}\text{Sr}_{0.35}\text{TiO}_3$.

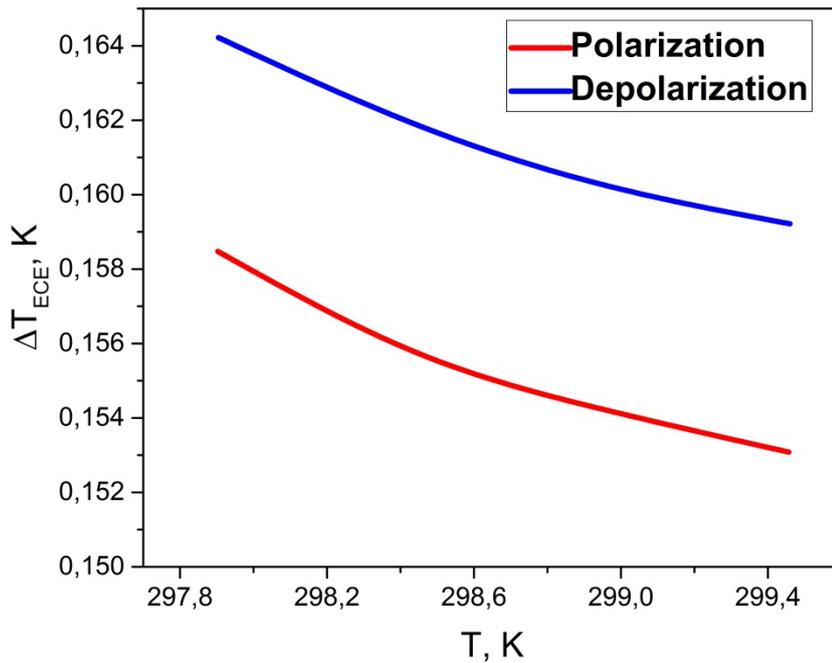


Рис.1

В качестве объекта моделирования был выбран многослойный емкостной элемент, схематичное изображение которого представлено на рис. 2.

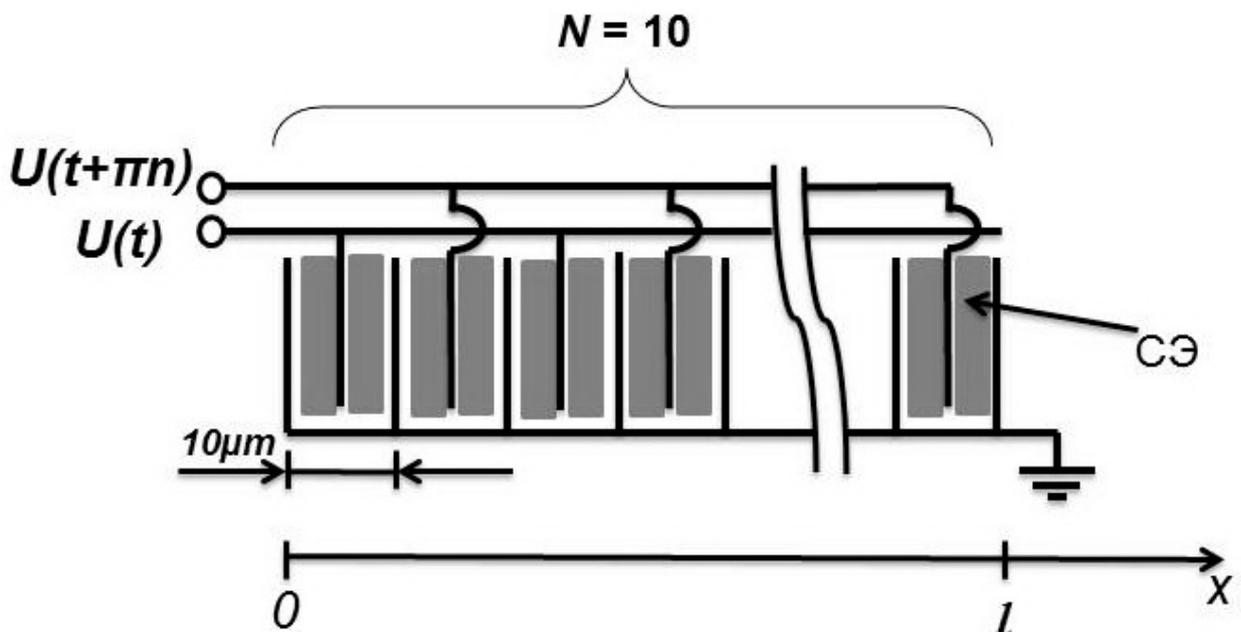


Рис.2

Моделируемый многослойный конденсатор состоит из десяти емкостных элементов, выполненных по технологии высокотемпературной совместоспеченной керамики (НТСС). Толщина сегнетоэлектрика (СЭ) в каждом слое составляет 10 мкм, толщина никелевых электродов 1 мкм. Особенность электрической разводки слоев позволяет

подавать на каждый емкостной элемент, управляющий сигнал со своей величиной потенциала и выбранным сдвигом по фазе.

При моделировании рассматривалась одномерная тепловая модель, и считалось, что температура меняется только вдоль оси x . Одна граница ($x=0$) является теплоизолированной, на другой осуществляется отвод тепла за счет обтекания медленным потоком воздуха, находящегося при температуре, равной начальной T_0 . Теплоемкость $C(x)$ и теплопроводность $\lambda(x)$ материала принимаются как постоянные величины в пределах каждого участка многослойного элемента. Тогда распределение температуры $T(x,t)$ вдоль элемента находится в результате решения уравнения теплопроводности (1)

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

которое удовлетворяет начальным и граничным условиям (2)

$$T(x, 0) = T_0; \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 , \quad \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = h(T - T_0) , \quad (2)$$

Функция $Q(x,t,T)$ определяет количество тепла, выделяемое (или поглощаемое) тепловым ЭК-источником, и задается в следующем виде

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

где E —напряженность электрического поля на ЭК-элементе, P —поляризация диэлектрика. Функция $Q(x,t,T)$ отлична от нуля только на ЭК-элементе. Управляющий сигнал представляет из себя прямоугольные импульсы напряжения со скважностью 50%. Особенность подачи управляющего сигнала заключалась в сдвиге фазы сигнала на пол периода для каждого последующего слоя. На рис. 3 представлена динамика изменения температуры в точке $x=0$ при подаче управляющего сигнала с частотой 500Гц, 1000Гц и 2000Гц.

Из представленных зависимостей можно рассчитать объемную мощность охлаждения данного многослойного охлаждающего элемента, которая равна $6\text{Вт}/\text{см}^3$ для сигнала частотой 500Гц, $9\text{Вт}/\text{см}^3$ для сигнала в 1 кГц и, соответственно, $25\text{Вт}/\text{см}^3$ для 2кГц. По результатам моделирования следует отметить, что даже использование в качестве материала емкостных элементов материалов с относительно небольшой разницей величин электрокалорического эффекта при поляризации и деполяризации возможно получение существенной мощности охлаждения при использовании многослойных охлаждающих элементов с тонкими слоями и при работе на более высоких частотах управляющего сигнала.

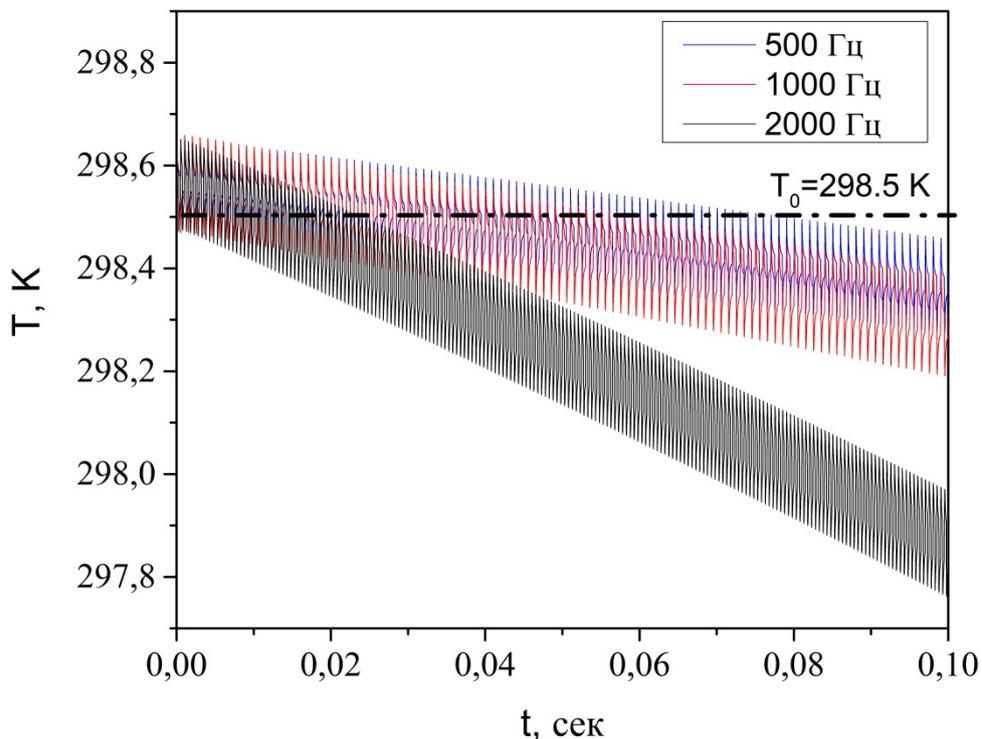


Рис.3

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук МК-6229.2015.8.

Библиографический список

1. Valant M. Electrocaloric materials for future solid-state refrigeration technologies //Progress in Materials Science. – 2012. – Т. 57. – №. 6. – С. 980-1009.
2. Ožbolt M. et al. Electrocaloric refrigeration: thermodynamics, state of the art and future perspectives //International journal of refrigeration. – 2014. – Т. 40. – С. 174-188.
3. Jia Y., Ju Y. S. A solid-state refrigerator based on the electrocaloric effect //Applied Physics Letters. – 2012. – Т. 100. – №. 24. – С. 242901.
4. Gu H. et al. A chip scale electrocaloric effect based cooling device //Applied Physics Letters. – 2013. – Т. 102. – №. 12. – С. 122904.
5. Guo D. et al. Design and modeling of a fluid-based micro-scale electrocaloric refrigeration system //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Т. 72. – С. 559-564.
6. Karmanenko S. F. et al. Layered ceramic structure based on the electrocaloric elements working as a solid state cooling line //Journal of the European Ceramic Society. – 2007. – Т. 27. – №. 8. – С. 3109-3112.
7. Еськов А. В. и др. Моделирование твердотельного охладителя с электрокалорическими элементами //Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – №. 8. – С. 1483-1486.
8. Пахомов О. В. и др. Термодинамическая оценка эффективности охлаждения посредством электрокалорической твердотельной линии //Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – №. 8. – С. 80-85.
9. Karmanenko S. et al. New approaches to electrocaloric-based multilayer cooling //Electrocaloric Materials. – Springer Berlin Heidelberg, 2014. – С. 183-223.
10. Старков А. С. и др. Электрокалорический отклик сегнетоэлектрика на воздействие периодического электрического поля //Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – №. 7. – С. 1422-1426.