



3. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория упругости. М.:Наука,1965.
4. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1965.
5. Суханов А.Д. Фундаментальный курс физики. В 4 т. Т.1. Корпускулярная физика. М.: Изд-во "Агар", 1996.
6. Браун В.Ф. Диэлектрики. М.: Изд-во ИЛ, 1961.
7. Еремина В.В., Костюков Н.С. Тюрина С.Ю. Моделирование оптического спектра воды в области упругих видов поляризации // Информатика и системы управления. 2003. № 2(6). С.9-14.
8. Еремина В.В., Костюков Н.С., Тюрина С.Ю. Моделирование оптического спектра воды в области упругой ионной поляризации // Информатика и системы управления. 2004. № 2(8). С.32-36.
9. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. М.: Изд-во ИЛ,1960.
10. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: Принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003.
11. Еремин И.Е., Костюков Н.С. Построение модели процесса поляризации диэлектриков с помощью обратных связей // Информатика и системы управления. 2001. № 1. С. 45-53.
12. Костюков Н.С., Еремин И.Е. Кибернетическая модель процесса упругой электронной поляризации диэлектрика // Электричество. 2004. № 1. С. 50-54.
13. Сканапи Г.И. Физика диэлектриков. Область слабых полей. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949.
14. Юхневич Г.В. Инфракрасная спектроскопия воды. М.: Наука, 1973.
15. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник. Л.: Химия, 1984.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.С. Астаповой.

УДК 537.533.7

© 2005 г. **Г.Г. Здоровцев,**
В.И. Иванов, канд. физ.-мат. наук,
Н.В. Марченков

(Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
Хабаровск)

ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ ЭДС В СЭНДВИЧНОЙ СТРУКТУРЕ МЕТАЛЛ-НИОБАТ ЛИТИЯ-МЕТАЛЛ

На основе электретной модели проведено численное моделирование экспериментальных зависимостей термостимулированной ЭДС в несимметричной сэндвичной структуре металл-ниобат лития-металл от геометрии кристалла, его температуры, концентрации легирующей примеси.

Введение

В работе [1] описано экспериментальное наблюдение термостимулированной ЭДС в легированном кристалле ниобата лития с двумя электродами из различных материалов, представляющего собой сэндвичную структуру металл-сегнетоэлектрик-металл (МСМ). Знак ЭДС определяется положением электродов, нанесенных напылением в вакууме на противоположные грани кристалла, и не зависит от ориентации кристаллографических осей образца относительно электродов. В отличие от классического пьезоэлектрического эффекта термостимулированная ЭДС пропорциональна температуре кристалла и не зависит от скорости ее изменения. Величина термостимулированной ЭДС имеет резко выраженную зависимость от степени легирования образца, возрастает с уменьшением толщины кристалла и нелинейно зависит от площади электродов [1]. Известные термоэлектрические явления (в том числе динамический пьезоэффект в несимметричной МСМ-структуре [2]) не объясняют полученные экспериментальные результаты.

Для описания обнаруженного явления в [1] предложена термоэлектрическая модель несимметричной МСМ-структуры. Целью данной работы является численное моделирование свойств такой системы и сравнение их с экспериментальными закономерностями [1,3].

Электретная модель

В предлагаемой модели электретная МСМ-структура рассматривается в качестве источника ЭДС с внутренним сопротивлением, равным сопротивлению кристалла. При этом зависимость термостимулированной ЭДС от температуры определяется температурной зависимостью сопротивления полупроводникового кристалла $R_{кр}$.

Экспериментально измерялся коэффициент $P_{el} = (R_n S)^{-1} \partial U_n / \partial T$, $[AK^{-1} \cdot cm^{-2}]$, где U_n – напряжение на нагрузке; T – температура кристалла; R_n – сопротивление нагрузки; S – площадь электрода кристалла. Из закона Ома имеем:

$$U_n = E_0 R_n (R_k + R_n)^{-1}, \quad (1)$$

где E_0 – электретная ЭДС; R_k – сопротивление кристалла. Отсюда для коэффициента P_1 получаем:

$$P_{el} = E_0 L \rho' (R_n S + \rho L)^{-2}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление кристалла; L – толщина кристалла; ρ' – производная удельного сопротивления кристалла по температуре

$$R_k = \rho L S^{-1}.$$

Согласно работе [4] температурная зависимость удельного сопротивления кристаллов ниобата лития, легированных железом с концентра-

цией более 0.3 вес. % (для которых в [1, 3] были получены основные экспериментальные результаты), описывается законом Мотта:

$$\rho = \rho_0 \exp(T_0^{0,25} T^{-0,25}), \quad (3)$$

где ρ_0, T_0 – эмпирические константы, зависящие от концентрации легирующей примеси [4]. Из (3) получаем:

$$\rho' = -\rho T_0^{0,25} T^{-1,25}, \quad (4)$$

Окончательно имеем для тока на нагрузке и коэффициента P_1 :

$$I = E_0 R_n (R_n + \rho_0 L S^{-1} \exp(T_0^{0,25} T^{-0,25}))^{-1}, \quad (5)$$

$$P_{el} = E_0 L \rho \cdot T_0^{0,25} T^{-1,25} (R_n S + \rho_0 \exp(T_0^{0,25} \cdot T^{-0,25}) L)^{-2}. \quad (6)$$

Сопоставление полученных аналитических зависимостей с экспериментальными позволяет проверить адекватность предложенной модели.

Аппроксимация экспериментальных зависимостей

Для анализа модели использовалась линейная аппроксимация экспериментальных зависимостей величины P_1 от геометрии и температуры кристалла, концентрации легирующей примеси.

Рассмотрим зависимость P_1 от площади электрода (кристалла), показанную на рис. 1. Приводя (2) к линейной функции, получаем следующее выражение:

$$S = S^{0,5} P_1^{-0,5} (E_0 \rho' L)^{0,5} R_n^{-0,5} - \rho L R_n^{-1}, \quad (7)$$

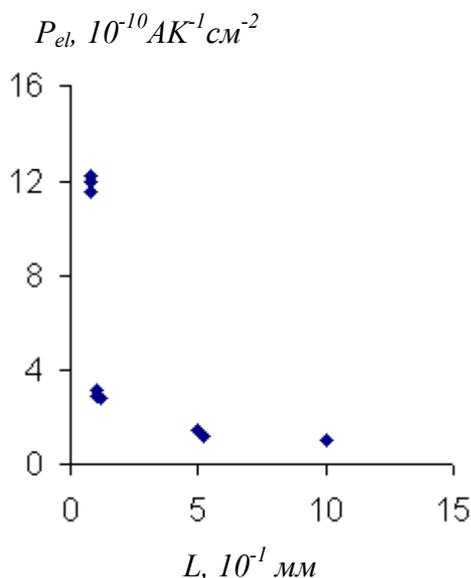


Рис. 1. Экспериментальная зависимость коэффициента P_{el} от толщины кристалла L ($S = 5 \text{ мм}^2$, 0.3 вес.% Fe, электроды Al-Cr).

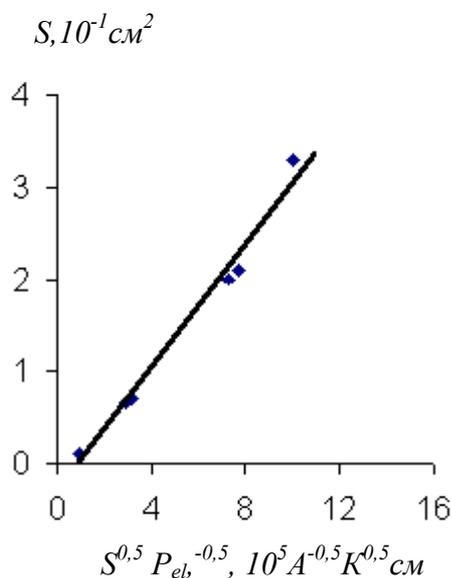


Рис. 2. Линейная аппроксимация зависимости коэффициента P_{el} от площади кристалла S согласно формуле (7).

Экспериментальные данные (рис. 1) в линеаризованных координатах согласно формуле (7) показаны на рис. 2. Прямая соответствует численной

аппроксимации выражения (7) по методу наименьших квадратов. Аналогично, линеаризуя зависимость P_{el} от толщины кристалла, получаем:

$$L = S^{0,5} P_1^{-0,5} (E_0 \rho' L R_n)^{0,5} \rho^{-1} - R_n S \rho, \quad (8)$$

Соответствующий график представлен на рис. 4.

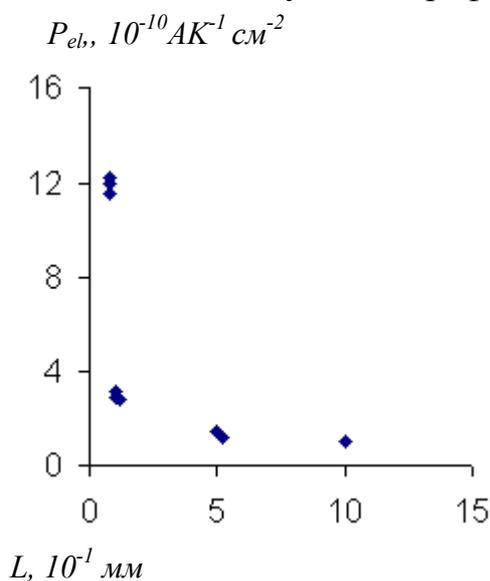


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента P_{el} от толщины кристалла L ($S = 5 \text{ мм}^2$, 0,3 вес. % Fe, электроды Al-Cr).

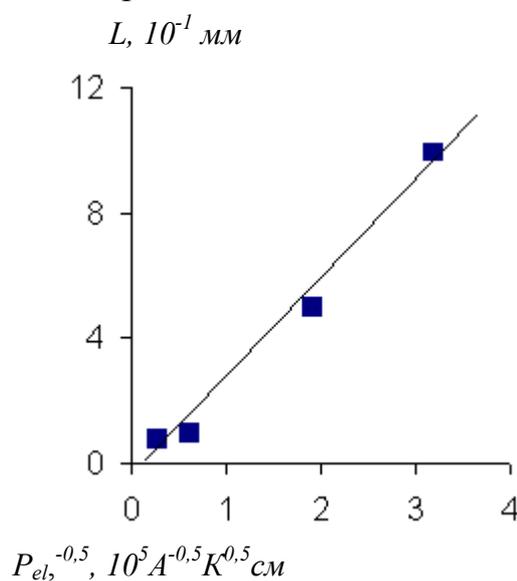


Рис. 4. Линейная аппроксимация зависимости коэффициента P_{el} от толщины кристалла согласно формуле (8).

Величина удельного сопротивления, определенного из рис. 2, 4, составляет $7 \cdot 10^9$ и 10^{10} Ом·см соответственно, что по порядку величины близко к значениям в работах $[4,5] \cdot 10^9 \div 10^{10}$ Ом·см. Из этих же графиков можно получить значение параметра $E_0 \rho'$, который составляет величину около 10^9 В·Ом·см·К⁻¹. Подставляя значение $\rho' = 10^{11}$ Ом·см·К⁻¹, имеем оценку $E_0 = 10^{-2}$ вольт.

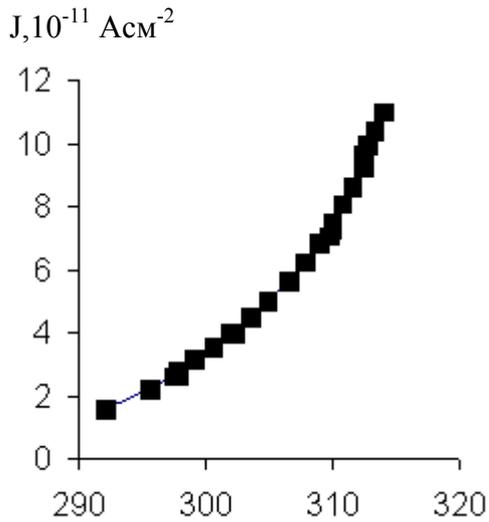
На рис. 5 показана экспериментальная зависимость плотности термостимулированного тока от температуры кристалла. Данную зависимость можно аппроксимировать и линеаризованной функцией, полученной из формулы (5):

$$\ln(I_n S^{-1}) = \ln(E_0 L_e \rho_{ke} (L_0 \rho_0)^{-1}) - (0,25(T_0)^{0,25}) T^{-0,25}. \quad (9)$$

Из рис. 1 – 6 видно, что экспериментальные зависимости достаточно близки к линейным, что свидетельствует в пользу предлагаемой модели.

Концентрационная зависимость коэффициента P_{el} (рис. 7) также может быть обусловлена зависимостью ρ' и ρ от процентного содержания легирующей примеси.

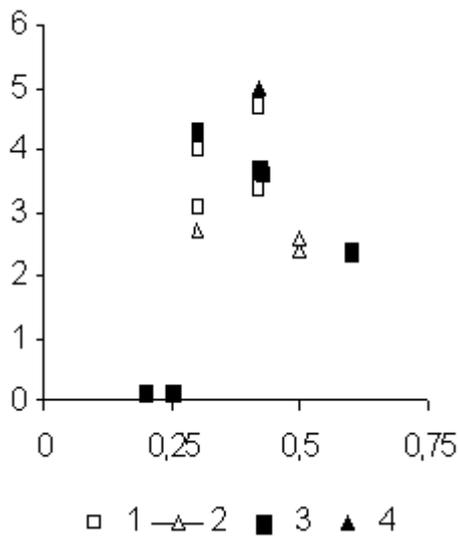
На рис. 8. построена концентрационная зависимость коэффициента P_{el}' .



T, K

Рис. 5. Экспериментальная зависимость плотности тока от температуры кристалла (LiNbO_3 : Fe – 0,43 вес.%, $10 \times 5 \times 1 \text{ мм}^3$, Y – срез; Al-Cr).

$P_{el}, 10^{-10} \text{ AK}^{-1} \text{ см}^{-2}$



$Fe, \text{ вес.}\%$

Рис. 7. Экспериментальная зависимость коэффициента P_{el} от концентрации примеси железа в кристалле ниобата лития для разных срезов и материалов контактов (1 – Al-Cr, Z – срез; 2 – In-Cr, Z – срез; 3 – Al-Cr, Y – срез; 4 – In-Cr, Y – срез)

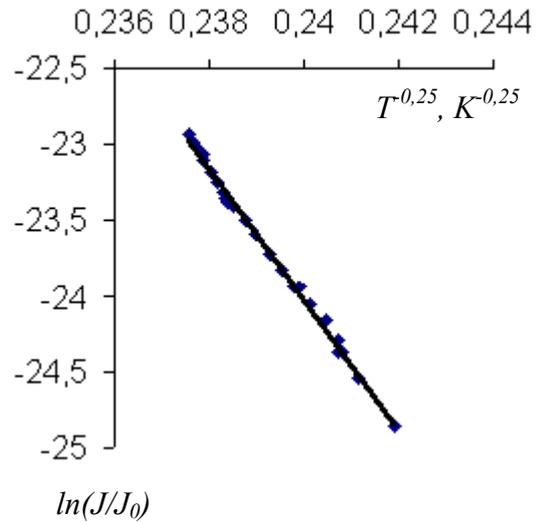
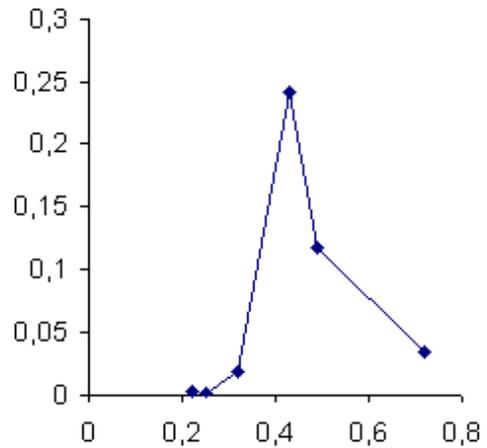


Рис. 6. Линейная аппроксимация зависимости плотности тока от температуры кристалла согласно формуле (9).

$P_{el}', 10^{-9} \text{ ОмсмК}^{-1}$



$Fe, \text{ вес.}\%$

Рис. 8. Зависимость коэффициента P_{el}' от концентрации примеси железа в кристалле ниобата лития.

Заключение

Таким образом, проведенное сравнение экспериментальных данных и численных расчетов на основе электретной модели демонстрирует не-



плохое качественное и количественное соответствие. Небольшие отклонения расчетных и экспериментальных данных наблюдаются в области малых толщин МСМ-структуры, что может быть связано с влиянием контактных явлений. Более корректное определение величины термоэлектрической ЭДС требует точных экспериментальных значений ρ' и ρ исследуемых образцов. Полученные результаты могут быть использованы для установления механизма образования источника ЭДС в МСМ-структуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В.* Термоэдс в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов //Изв. вузов, сер. физ. 2001. №1. С. 96-97.
2. *Ицковский М.А., Щедрина Л.В.* Термостимулированные токи в системе металл – диэлектрик – металл // Физика твердого тела. 1979. Т.21. № 12. С. 3567-3575.
3. *Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В.* Термостимулированная эдс в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов. Препринт № 19. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000.
4. *Barkan I.B., Baskin E.M., Entin M.V.* Mechanism of Conductivity of a Fe-Doped LiNbO₃ Crystal //Phys. stat. sol. 1980. V.59(a). P. 97-102.
5. *Ахмадуллин И.Ш., Голенищев-Кутузов В.А., Мигачев С.А., Миронов С.П.* Низкотемпературная электропроводность кристаллов ниобата лития конгруэнтного состава // Физика твердого тела. 1998. Т.40. № 7. С. 1307-1309.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.С. Астаповой.

УДК 621.391

© 2005 г. **А.Н. Рыбалева**, канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В работе предложена упрощенная методика моделирования теплообменного аппарата как объекта регулирования температуры при воздействии на расход теплоносителя. Приведена структура модели, в большей степени отражающей «физику» процесса, чем традиционно применяемые. Параметры модели легко определяются экспериментально по кривой разгона.

Введение

В промышленности широко применяются поверхностные теплообменные аппараты, теплоносителем в которых является водяной пар. В