

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭДС СЭНДВИЧНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛ-СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ

Иванов В.И.

ФГБОУ ВО Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск,
e-mail: ivanov@festu.khv.ru

Тонкая сэндвичная система металл-сегнетоэлектрик-металл может проявлять термоэлектрические свойства. Квазистационарный ток наблюдается в легированных кристаллах ниобата лития с двумя электродами из разных металлов. Величина квазистационарного тока резко возрастает при увеличении температуры кристалла и уменьшении его толщины. В данной работе предложена электродинамическая модель исследуемого явления. Модель предполагает, величина тока описанного термохимического источника возрастает при увеличении температуры из-за температурной зависимости электропроводности кристалла. Температурные зависимости электропроводности легированного кристалла интерпретируются в рамках модели прыжковой проводимости (модель Мотта). Экспериментальные зависимости находятся в хорошем согласии с модельными экстраполяциями. Полученные результаты можно использовать для разработки приемников излучения, а также при интерпретации экспериментальных результатов по изучению свойств сэндвичных пироэлектрических структур.

Ключевые слова: термовольтаический эффект, ниобат лития, сэндвичные структуры металл-сегнетоэлектрик-металл

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE EMF OF THE SANDWICH METAL-FERROELECTRIC-METAL STRUCTURE

Ivanov V.I.

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, e-mail: ivanov@festu.khv.ru

Thin sandwich metal-ferroelectric-metal system can exercise thermoelectric properties. The quasi-steady current was observed in doped lithium niobate crystals with two electrodes of different metals. The current value increases dramatically when you increase the temperature of the crystal and reduce its thickness. This paper proposed electrodynamic model of the investigated phenomena. The model assumes that current of the described thermochemical source increases with temperature due to the temperature dependence of the electrical conductivity of the crystal. Temperature dependences of electrical conductivity of doped crystal is interpreted within the model of hopping conductivity (Mott model). Experimental dependencies are in good agreement with the model extrapolations. The results obtained can be used to develop radiation receivers, as well as in the interpretation of experimental results on studying the properties of sandwiched metal-ferroelectric-metal structure.

Key words: thermovoltaic effect, lithium niobate, sandwiched metal-ferroelectric-metal structure.

В работах [1,3,4] описана термостимулированная ЭДС, возникающая только в высоколегированном железом кристалле ниобата лития с напыленными электродами из пары различных металлов. Знак термоэдс определяется положением электродов, нанесенных напылением в вакууме на противоположные грани кристалла, и не зависит от ориентации кристаллографических осей образца относительно электродов.

Исследование природы данного явления является актуальным, поскольку твердотельные электрохимические источники эдс являются наиболее востребованными источниками энергии для микроэлектрон-

ной промышленности [9-11].

В данной работе анализируется электродинамическая модель данного явления. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования термостимулированных токов в тонкослойной структуре металл – ниобат лития – металл.

В предлагаемой модели 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 $R_{кр}$.

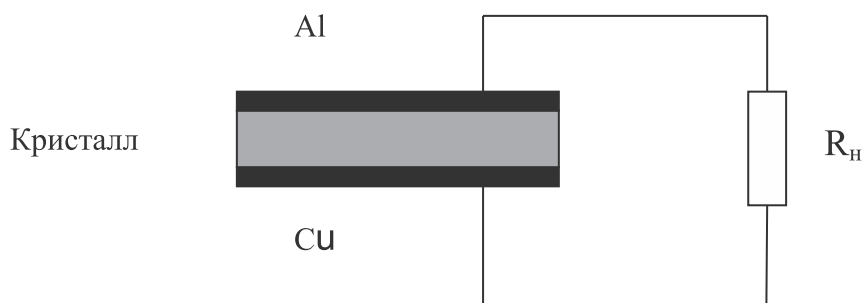


Рис. 1. Схема включения кристалла в измерительную цепь

В предлагаемой модели 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

$$P_{el} = (R_n S)^{-1} \partial U_n / \partial T, \quad [A \cdot K^{-1} \cdot cm^{-2}],$$

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_{el} 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 [2] температурная зависимость удельного сопротивления кристаллов ниобата лития, легированных железом с концентрацией более 0.3 вес. % (для которых в [2] 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. Из (3) получаем:

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

Окончательно имеем для тока на нагрузке и коэффициента P_{el} :

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

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

Сопоставление полученных аналитических зависимостей с экспериментальными позволяет проверить адекватность модели.

Для анализа модели использовалась линейная аппроксимация экспериментальных зависимостей величины P_{el} от геометрии и температуры кристалла, концентрации легирующей примеси.

Рассмотрим зависимость P_{el} от площади одного из двух электродов, нанесенных на противоположные грани кристалла - Рис.2. Приводя (6) к линейной функции, получаем следующее выражение:

$$S = P_{el}^{-0,5} (E_0 \rho' L)^{0,5} R_n^{-1} - \rho_k L R_n^{-1},$$

Экспериментальные данные (Рис.2а) в линеаризованных координатах согласно формуле (7) показаны на Рис.2б. Прямая соответствует численной аппроксимации выражения (7) по методу наименьших квадратов.

Величина удельного сопротивления определенного из рисунков 2-3 составляет $7 \cdot 10^9 - 10^{10}$ Ом·см соответственно, что по порядку величины близко к значениям, полученным в работе [328] - $10^9 \div 10^{10}$ 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 $E_0 = 10^3$ В.

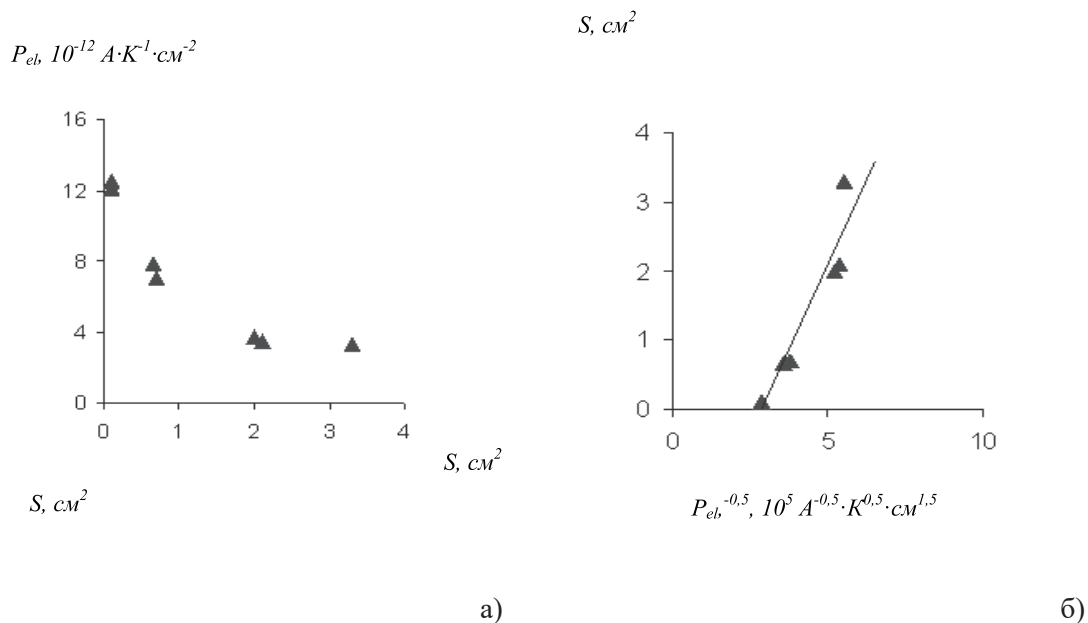


Рис. 2. Экспериментальная зависимость коэффициента P_{el} от площади электрода S ($L=1$ мм; 0,3 вес.% Fe; электроды Al-Cr) - 2а; линейная аппроксимация согласно формуле (7) - 2б. Критерий $R^2=0,95$; $E=0,0013$ В.

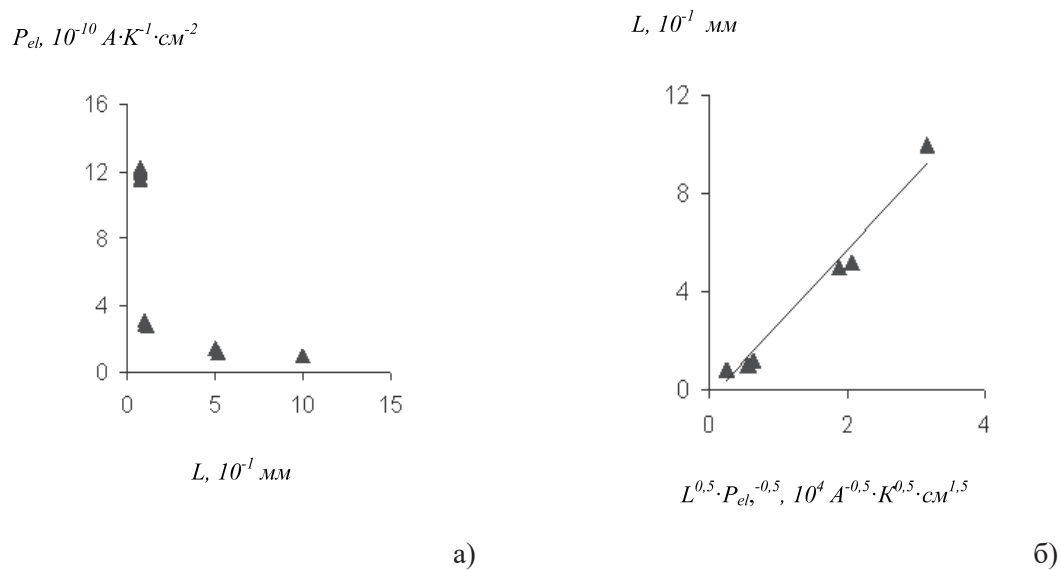


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента P_{el} от толщины кристалла L ($S=5$ мм²; 0,3 вес.% Fe; электроды Al-Cr) - 3а; линейная аппроксимация согласно формуле (8) Критерий $R^2=0,99$; $E=0,0085$ В

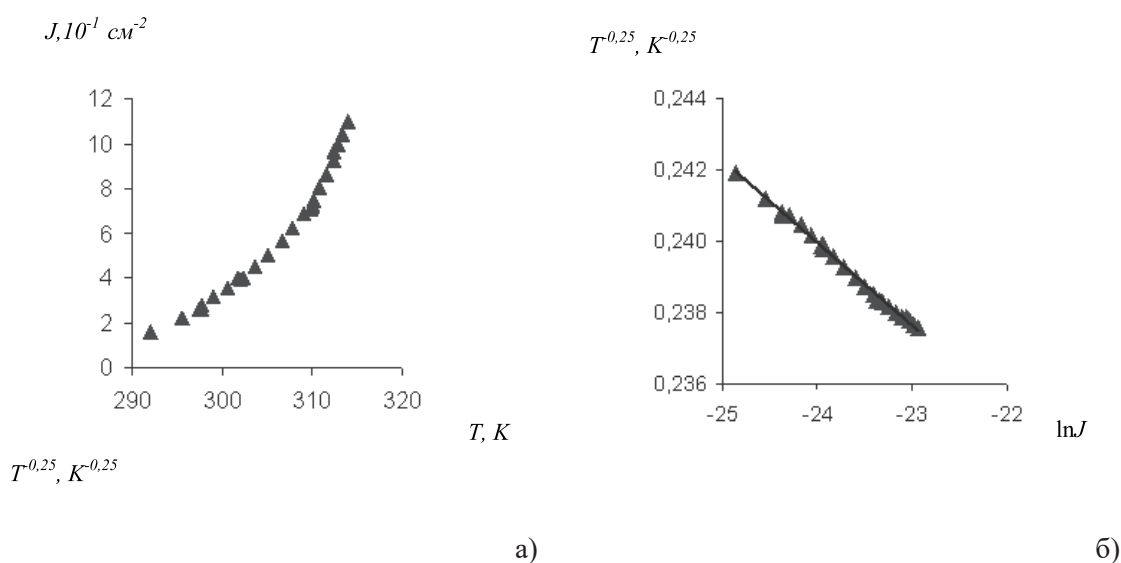


Рис. 4. Экспериментальная зависимость плотности тока от температуры кристалла (LiNbO_3 ; Fe – 0,43 вес.%, $10 \times 5 \times 1 \text{ мм}^3$, Y – срез; Al – Cr) и линейная аппроксимация согласно формуле (9); Критерий $R^2 = 0,99$

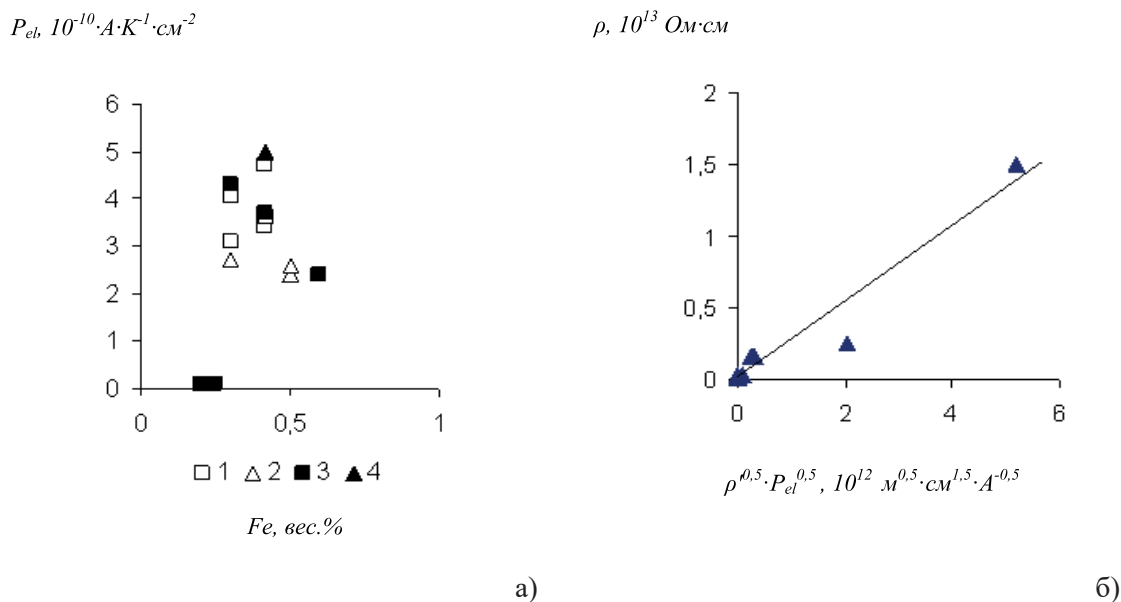


Рис. 5. Экспериментальная зависимость коэффициента P_{el} от концентрации примеси железа в кристалле ниобата лития для разных срезов и материалов контактов (1 – Al – Cr, Z – срез; 2 – In – Cr, Z – срез; 3 – Al – Cr, Y – срез; 4 – In – Cr, Y – срез) и линейная аппроксимация зависимости ρ от $\rho^{0,5} \cdot P_{el}^{0,5}$ согласно формуле (). Критерий $R^2 = 0,93$

Аналогично, линеаризуя зависимость P_{el} от толщины кристалла (Рис.3а.), получаем:

$$L = L^{0,5} P_{el}^{-0,5} (E_0 \rho_k^{-1})^{0,5} \rho_k^{-1} - R_n S \rho_k^{-1}, \quad (8)$$

Соответствующий график представлен на Рис.3б

На рисунке 4 показана экспериментальная зависимость плотности термостимулированного тока от температуры кристалла. Данную зависимость можно так же аппроксимировать линеаризованной функцией, полученной из формулы (5.15):

$$T^{0,25} = -T_0^{0,25} \ln J + T_0^{0,25} \ln(E_0 R_n S^{-1}), \quad (9)$$

Из рисунков 2-4 видно, что экспериментальные зависимости достаточно близки к линейным, что свидетельствует в пользу предлагаемой модели.

Концентрационная зависимость коэффициента P_{el} (Рис.5) так же может быть обусловлена зависимостью ρ' - и ρ - от процентного содержания легирующей примеси.

Таким образом проведенное сравнение экспериментальных данных и численных расчетов на основе электретной модели демонстрирует неплохое 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 термоэлектретной ЭДС требует точных экспериментальных значений ρ' и ρ исследуемых образцов.

В данной работе предложена термохимическая модель исследуемого явления, обусловленного полем контактной разности потенциалов на границах раздела металл – сегнетоэлектрик. Предполагается, что появление тока вызвано появлением разности потенциалов в области контакта электрод – кристалл. В случае одинаковых материалов электродов контактные разности потенциалов равны и противоположно направлены. Тогда результирующая ЭДС равна нулю.

Полученные результаты можно использовать для разработки приемников излучения [5-8], а также при интерпретации экспериментальных результатов по изучению свойств сэндвичных пироэлектрических структур [12-15].

Список литературы

1. Алексеева Л.В. Термоэлектрический элемент на основе сэндвичной структуры металл-сегнетоэлектрик-металл / Л.В. Алексеева, Е.А. Антонычева, В.И. Иванов, И.А. Коростелёва, И.В. Повх // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 9. – С. 9-13
2. Здоровцев Г.Г. Температурная зависимость электропроводности легированных кристаллов ниобата лития / Г.Г. Здоровцев, Ю.М. Карпец, В.А. Лебедев // Фундаментальные исследования. - 2014. - № 9-7. - С. 1512-1516.
3. Здоровцев Г.Г. Термостимулированная ЭДС в сэндвичной структуре металл – ниобат лития – металл / Г.Г. Здоровцев, В.И. Иванов, Н.В. Марченко // Информатика и системы управления. – 2005. – № 1 (09). – С. 55-60.
4. Здоровцев Г.Г. Термоэлектрические свойства несимметричной сэндвичной структуры металл-ниобат лития-металл / Г.Г. Здоровцев, В.И. Иванов, Ю.М. Карпец, С.В. Климентьев // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 102-105.
5. Здоровцев Г.Г. Характеристики приемника излучения на основе структуры металл-сегнетоэлектрик-металл / Г.Г. Здоровцев, В. И. Иванов, С.В. Климентьев, В.В. Криштоп // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – № 8. – С. 45-46.
6. Иванов В.И. Использование динамического пироэффекта в термовольтаическом приемнике излучения / В.И. Иванов, С.В. Климентьев, В.В. Корчевский // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 2 (17). – С. 13-18.
7. Иванов В.И. Критерий качества пироэлектрических материалов / В.И. Иванов, Ю.М. Карпец // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 8. – С. 100-101.
8. Иванов В.И. Тепловые приемники излучения на основе тонкослойных структур металл – сегнетоэлектрик – металл: монография / В.И. Иванов, Ю.М. Карпец, С.В. Климентьев. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 80 с.
9. Иванов В.И. Термостимулированные токи в несимметричной сэндвичной структуре металл – сегнетоэлектрик – металл: монография / В.И. Иванов, Ю.М. Карпец, С.В. Климентьев. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. – 67 с.
10. Иванов В.И. Термоэдс в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов / В.И. Иванов, Ю.М. Карпец, С.В. Климентьев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2001. – № 1. – С. 96-97.
11. Казанин М.М. Термовольтаический эффект в поликристаллическом SmS / М.М. Казанин, В.В. Каминский, С.М. Соловьев // ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – В. 21. – С. 16–18.
12. Канаев И.Ф. Аномально сильное влияние электродов на фотогальванический ток в кристаллах LiNbO₃/ И.Ф. Канаев, В.К. Малиновский // Автометрия. – 1995. – № 5. – С. 3-9.
13. Карпец Ю.М. Фотоиндуцированное рассеяние света в кристаллах LiNbO₃:Rh / Ю.М. Карпец, В.А. Максименко // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71. – № 9. – С. 6-7.
14. Косоротов В.Ф. Пироэлектрический эффект и его применения / В.Ф. Косоротов, Л.С. Кременчугский, В.Б. Самойлов, Л.В. Щедрина // под ред. Кременчугского Л.С. АН УССР. Ин-т физики. – Киев: Наукова думка, 1989. – 224 с.
15. Ivanov V.I. Thermo-emf in doped lithium niobate crystals with electrodes made of different metals / V.I. Ivanov, Yu.M. Karpets, S.V. Kliment'ev // Russian Physics Journal. – 2001. – V. 44. – № 1. – P. 119-121.