

КООРДИНАТНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЕРМОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В ЛЕГИРОВАННЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ

Брюханова Т.Н.¹, Иванов В.И.², Лебедев В.А.², Ливашвили А.И.²

¹ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет» (680035 Хабаровск, Тихоокеанская 136), e-mail: livbru@mail.ru

²ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия (680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47), e-mail: tmeh@festu.khv.ru

Пироэлектрические кристаллы широко используются для регистрации излучения. Обычно применяется покрытие электрода, поглощающее излучение. Однако схема с поглощением излучения в объеме кристалла в ряде случаев имеет преимущества. Такие приемники излучения отличаются, например, повышенным быстродействием. Однако в случае узких по сравнению с размерами кристалла лазерных пучков существенными становятся процессы теплопроводности вблизи краев чувствительного элемента. В данной работе представлено исследование координатной зависимости пироэлектрического отклика в системе металл—сегнетоэлектрик—металл. Проведенный теоретический анализ показывает, что вблизи электродов величина пироэлектрического отклика может значительно превышать его значение для объемной части кристалла. Полученные результаты можно использовать для разработки координатно-чувствительных пироприемников, а также при интерпретации экспериментальных результатов по изучению свойств сэндвичных пироэлектрических структур.

Ключевые слова: пироэлектрический эффект, координатно-чувствительные приемники, ниобат лития

A SPECTRAL DEPENDENCE OF PHOTO-RESPONSE IN A METAL-FERROELECTRIC-METAL SANDWICH STRUCTURE

Bryukhanova T.N.¹, Ivanov V.I.², Lebedev V.A.², Livashvily A.I.²

¹Asia-Pacific State University, Khabarovsk, e-mail: livbru@mail.ru

²Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, e-mail: tmeh@festu.khv.ru

Pyroelectric crystals are widely used for registration of the radiation. The electrode coating is usually applied for the radiation absorbing. However, the scheme with the absorption of radiation in the volume of crystal has advantages in a number of cases. These photodetectors are different, for example, high temporary characteristics. However, the processes of thermal conductivity near the edges of the sensor become essential in the case of narrow compared with the size of the crystal laser beams. In this paper we study the pyroelectric response coordinate dependence of the system metal-ferroelectric-metal. Our theoretical analysis shows that the magnitude of the pyroelectric response near the electrodes can significantly exceed its value for the crystal volume. The obtained results can be used for the development of coordinate-sensitive detectors, as well as in the interpretation of the experimental results on studying the properties of sandwich pyroelectric structures.

Keywords: pyroelectric effect, coordinate-sensitive detectors, lithium niobate

Наиболее часто используемыми пироэлектрическими приемниками излучения являются приемники продольного типа, когда излучение направлено вдоль пироэлектрической оси кристалла и поглощается одним из электродов, нанесенных на грани кристалла (электроды перпендикулярны полярной оси) [1, 3-6]. Приемники поперечного типа используются реже. В таких приемниках излучение проходит между электродами нормально полярной оси, они обладают меньшей чувствительностью по сравнению с приемниками продольного типа [8-10].

Однако в случае регистрации достаточно мощного излучения, например лазерного, данные приемники излучения имеют определенные достоинства: отпадает необходимость в изготовлении тонких (порядка нескольких микрометров) пластинок; из-за поглощения

излучения в объеме кристалла процессы теплопередачи практически не играют никакой роли при регистрации импульсного лазерного излучения [7].

В зависимости от величины коэффициента поглощения материала приемники поперечного типа можно разделить на приемники проходящего излучения и приемники полного поглощения. Приемники полного поглощения обычно не используются для регистрации непрерывного мощного лазерного излучения из-за малой радиационной стойкости кристаллов и их разрушения. Если же коэффициент поглощения небольшой, то можно регистрировать непрерывное лазерное излучение большой мощности.

Цель работы

Целью данной работы является расчет координатной зависимости пироэлектрического отклика приемника проходящего излучения для случая, когда диаметр лазерного луча мал по сравнению с размерами приемной грани кристалла.

Модель задачи

Для построения модели рассмотрим монокристалл, полярная ось которого перпендикулярна граням, с которых снимается напряжение U (пироэлектрический отклик) в точках 1 и 2 (рис. 1).

Световой луч, проходя через кристалл, нагревает его на величину ΔT , что приводит к изменению поляризации P на величину ΔP в объеме, занимаемом лучом.

Для параллельного пучка лучей задачу вычисления пироэлектрического отклика можно свести к задаче вычисления разности потенциалов электрического поля, создаваемого двумя близкорасположенными нитями:

$$U = \tau \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \left| \ln \left[\frac{y_0}{y_0 + \beta} \frac{d - (y_0 + \beta)}{d - y_0} \right] \right|. \quad (1)$$

где τ – линейная плотность зарядов на нитях; ϵ_0 – электрическая постоянная; β – расстояние между нитями, соответствующее смещению зарядов; d – высота кристалла (расстояние между точками 1 и 2 на рис. 1). Формула (1) справедлива для бесконечно длинного кристалла [4].

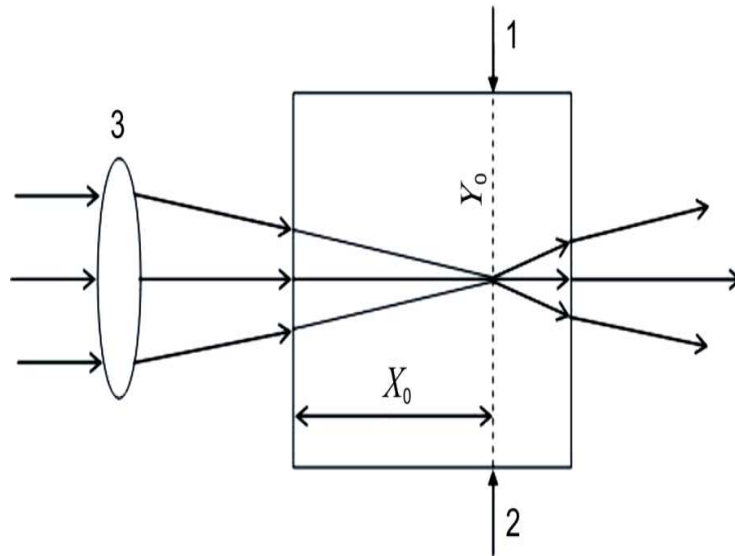


Рис. 1. Схема эксперимента: X_0 и Y_0 – параметры, характеризующие положение точечных электродов 1, 2 и высоту луча 3 соответственно

В более сложном случае (например, в случае сходящегося в фокусе светового пучка или кристалла, ограниченного по длине) можно разбить световой луч в кристалле на элементы длиной Δx , столь малые, что в каждом из элементов пучок можно считать параллельным и применить формулу (2) для каждого из них (с учетом геометрии задачи).

Разлагая выражение под знаком логарифма в (1) в ряд по малому параметру β/y_0 и учитывая, что τ связано с пьезоэлектрическим эффектом, получим выражение для отклика от каждого отдельного элемента:

$$U_i = \gamma_i \left(\frac{K_i W_{i-1} t}{c\rho} \right) \left(\frac{1}{2\pi\epsilon_0 y_0 (1 - y_0/d)} \right) F(\alpha_i, \alpha_{i+1}), \quad (2)$$

где $K_i = k(\Delta x_i)$ и W_i – коэффициент поглощения и мощность излучения соответственно в i -м элементе кристалла; t – время облучения кристалла импульсом света; c – удельная теплоемкость кристалла; ρ – плотность кристалла; $F(\alpha_i, \alpha_{i+1}) = 1/2(\cos \alpha_i - \cos \alpha_{i+1})$ – геометрический множитель, характеризующий положение каждого i -го элемента относительно электродов 1 и 2; $\gamma_i = \Delta P_i / \Delta T_i$ – пьезоэлектрический коэффициент для i -го элемента кристалла.

Сумма вкладов (2) дает результирующий отклик

$$U = \sum_{i=1}^n U_i, \quad (3)$$

где n – число элементов, на которые разбивается луч в кристалле.

Как видно из (2) и (3), пирозлектрический отклик U не зависит от площади поперечного сечения S_i луча. Однако изменение температуры T обратно пропорционально S_i :

$$\Delta T_i = \frac{k_i W_{i-1} t}{c \rho S_i}. \quad (4)$$

В выражении (4) учтено, что $\gamma \frac{k(x) W t}{c \rho} = \Delta P S$, с другой стороны

$$\Delta P S = \tau \beta. \quad (5)$$

Равенство (5) выражает собой замену поляризации элемента объема $\Delta V = S \Delta x$ линейной поляризацией элемента кристалла длиной Δx .

Множитель $[y_0(1 - y_0/d)]^{-1}$ симметричен относительно половины высоты кристалла $y_0 = d/2$, т. е. перемещение луча «вверх» (к точке 1) и «вниз» (к точке 2) приводит к одинаковому отклику. Аналогичным свойством симметрии обладает геометрический множитель F (α_i, α_{i+1}).

Если кристалл идеальный, то пирозлектрический отклик не зависит от сечения луча. Физически это связано с тем, что рост температуры, вызывающий изменение поляризации ΔP , обратно пропорционален сечению S . Иными словами, при уменьшении поперечного сечения лазерного пучка диполи становятся более активными, но их количество становится меньше. В итоге пирозлектрический ток в идеальном кристалле также не зависит от места фокусировки луча.

Множитель $[y_0(1 - y_0/d)]^{-1}$ в знаменателе (2) при приближении луча к верхней или нижней грани кристалла приводит к возрастанию отклика U , что интерпретировалось в работе как «краевой эффект». Наблюдавшийся затем спад отклика на гранях 1 и 2 кристалла легко объясняется выходом части светового пучка за пределы кристалла.

На рисунке 2 приведены рассчитанные зависимости пироэлектрического отклика от расстояния между одним из электродов и местом попадания лазерного луча на приемную грань кристалла для точечных электродов в зависимости от геометрии сканирования.

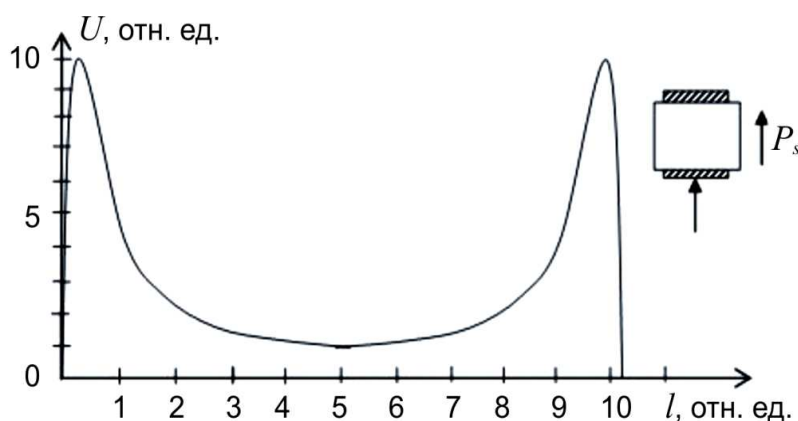


Рис. 2. Зависимость пироэлектрического отклика от расстояния между одним из электродов приемника и местом

Видно, что при прохождении лазерного луча вблизи одного из электродов наблюдается значительное увеличение пироэлектрического отклика.

Заключение

Таким образом, из результатов исследования видно, что вблизи электродов величина пироэлектрического отклика может значительно превышать значение для объемной части кристалла.

Полученные результаты можно использовать для разработки координатно-чувствительных пироприемников [10], а также при интерпретации экспериментальных результатов по изучению свойств сэндвичных пироэлектрических структур [2-4, 8-10].

Список литературы

1. Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. Термоэлектрические свойства несимметричной сэндвичной структуры металл — ниобат лития — металл // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 311. — № 2. — С. 102–

105.

2. Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Марченков Н.В. Термостимулированная ЭДС в сэндвичной структуре металл — ниобат лития — металл // Информатика и системы управления. — 2005. — № 1 (09). — С. 55–60.
3. Здоровцев Г.Г., Карпец Ю.М., Лебедев В.А. Температурная зависимость электропроводности легированных кристаллов ниобата лития // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 9-7. — С. 1512–1516.
4. Иванов В.И. Термостимулированные токи в несимметричной сэндвичной структуре металл—сегнетоэлектрик—металл: монография; Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. — 67 с.
5. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. Тепловые приемники излучения на основе тонкослойных структур металл—сегнетоэлектрик—металл: монография; Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. — 80 с.
6. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. Термоэдс в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2001. — № 1. — С. 96–97.
7. Иванов В.И., Климентьев С.В., Корчевский В.В. Использование динамического пироэффекта в термовольтаическом приемнике излучения // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2010. — № 2. — С. 013–018.
8. Карпец Ю.М., Максименко В.А. Фотоиндуцированное рассеяние света в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Rh}$ // Оптический журнал. — 2004. — Т. 71. — № 9. — С. 6–7.
9. Карпец Ю.М., Строганов В.И., Марченков Н.В., Емельяненко А.В. Спектр-структура излучения, рассеянного фоторефрактивным кристаллом // Оптика и спектроскопия. — 1989. — Т. 67. — № 12. — С. 982.
10. Ivanov V. I., Karpets Yu. M., Kliment'ev S. V. Thermo-EMF in doped lithium niobate crystals with electrodes made of different metals // Russian Physics Journal. — 2001. — V. 44. — № 1. — P. 119–121.

Рецензенты:

Карпец Ю.М., д.ф.-м.н., профессор по кафедре физики, профессор кафедры «Физика и теоретическая механика» ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск;

Криштоп В.В., д.ф.-м.н., профессор по кафедре физики, проректор по учебной работе ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения Министерства транспорта РФ», г. Хабаровск.