

УДК 621.3.049.77.002.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА ТОНКИХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НИОБАТА БАРИЯ–СТРОНЦИЯ ПРИ ИХ НАГРЕВЕ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРОМ

© 2022 г. А. М. Пугачев<sup>1</sup>, \*, А. А. Соколов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

\*E-mail: arg@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 01.06.2022 г.

После доработки 15.06.2022 г.

Принята к публикации 22.06.2022 г.

Изучен пирозлектрический отклик тонких сегнетоэлектрических пленок ниобата бария–стронция  $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$  (SBN- $x$ ) при их нагреве импульсным лазером. Показано, что по пирозлектрическому отклику можно определить величину спонтанной поляризации пленки и распределение пирокоэффициента по глубине образца. Исследованы пленки SBN-50, выращенные плазменным напылением на слое оксида индия–олова, который был нанесен на кремниевую подложку.

DOI: 10.31857/S0367676522100179

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что по временной зависимости пирозлектрического тока при импульсном нагреве сегнетоэлектрической пленки можно с высокой точностью определить не только величину спонтанной поляризации в образце, но и пространственное распределение доменов внутри образца [1, 2]. Доменная структура определяет пространственное распределение пирозлектрического коэффициента по глубине пленки, а задача определения распределения пирокоэффициента по глубине представляет из себя решение уравнения Фредгольма I рода:

$$J_p = \int k_p(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} dx. \quad (1)$$

Здесь  $J_p$  – пирозлектрический ток,  $T$  – температура,  $t$  – время,  $x$  – координата,  $k_p(x)$  – пирокоэффициент.

Несмотря на то, что в общем случае эта задача является некорректной, она решается при дополнительных предположениях о виде резольвенты [4–7]. Так, авторы [1, 2] искали решение в виде кусочно-линейных функций, авторы [5, 6] – в виде усеченного ряда Фурье, авторы [7] – как интерполяционный многочлен Лагранжа. В частности, решение можно искать в классе полиномов Чебышева [8]. Обычно при выборе класса функций, в котором ищется решение, исходят из того, чтобы этот класс хорошо приближал гладкие функции. Однако, знание о распределении пирокоэффициента по глубине, полученное из физических

соображений, может существенно уменьшить количество параметров задачи, а, главное, что эти параметры будут иметь физический смысл.

Экспериментально для определения зависимости пирокоэффициента от глубины авторами в [1] регистрировалась временная зависимость пирозлектрического отклика от импульсного нагрева поверхности пленки ниобата бария–стронция  $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$  (SBN-50), а в работах [4–7] – зависимость пирозлектрического отклика от частоты при синусоидальной модуляции нагревающего луча лазера (laser intensity modulation method – LIMM).

В рассмотренных работах предполагалось, что пирокоэффициент зависит только от глубины, а нагрев образца идет в пределах одного домена. Это условие часто не выполняется для объемных кристаллов [3, 9, 10]. В случае нагрева большого числа доменов задача о нахождении пирозлектрического сигнала остается одномерной. В этом случае следует рассматривать пирокоэффициент, усредненный на единицу площади.

В [3] показано, что в одноосных монокристаллах домены прорастают клиньями. Для массивных образцов угол клина фиксирован. Для пленок этот угол может быть другим. Однако, можно предположить, что этот угол одинаков для всех доменов в пленке, как и в кристалле [9]. Усредненный по площади пирокоэффициент будет линейно зависеть от глубины, причем наклон в этой зависимости определяется углом роста доменов.



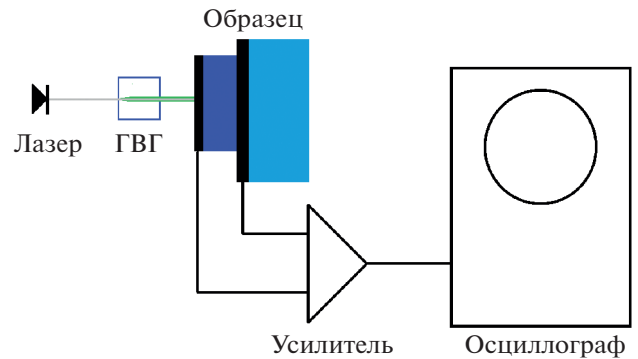
**Рис. 1.** Схематическое изображение исследуемого образца. Поглощающий электрод – пироэлектрик – электрод ИТО – подложка.

В случае не полностью проросших доменов будет плавный переход от наклонной зависимости к константе. Будем искать решение в виде кусочно-линейной функции с одним наклонным участком и одним или двумя участками с нулевым наклоном. Таким образом, в нашей задаче остается два параметра: угол и глубина прорастания доменов. В [1] авторы подобным образом описали искомую функцию.

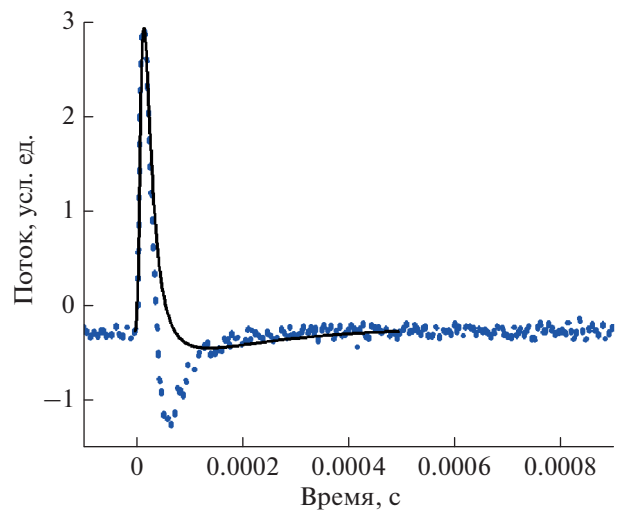
## ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве образца использовалась пленка SBN-50, выращенная ВЧ напылением на слой оксида индия–олова ИТО, который, в свою очередь, нанесен на кремниевую подложку (см. рис. 1). На поверхность пленки термическим напылением наносился тонкий Сг электрод. Вторым электродом служит слой ИТО. Верхний и нижний электроды нужны для регистрации пироэлектрического тока, а подложка – для механической прочности. Толщина пленки по данным сканирующей электронной микроскопии составляет 2 мкм.

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки. Для нагрева использовался лазер DTL-429 QT с длиной волны 1064 нм, длительностью импульса  $6 \cdot 10^{-9}$  с и частотой следования до 1000 Гц. Энергия импульса возбуждающего излучения, падающего на электрод, составляла не более 100 мДж. Для наведения лазера в нужную точку использовалась вторая гармоника от лазерного излучения. Пироэлектрический сигнал усиливался и регистрировался на цифровом осциллографе Rigol DS 1102C.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки.



**Рис. 3.** Расчетная кривая (сплошная линия) для постоянного пирокоэффициента по глубине пленки и экспериментальная (точки) зависимость пироэлектрического тока от времени.

Измерения производились сквозь электрод. Это давало возможность увидеть распределение пирокоэффициента по глубине образца в конкретной точке под электродом, поскольку время распространения вглубь образца много меньше времени растекания тепла по поверхности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Лазерный импульс нагревает тонкий электрод на поверхности сегнетоэлектрической пленки, которая обладает пироэлектрическими свойствами (см. рис. 1). Тепло растекается вглубь образца и, по мере прогрева пленки, возникает пироэлектрический ток, который регистрируется на осциллографе. Поскольку времена регистрации меньше времени равномерного нагрева, сигнал несет в себе информацию о распределении пирокоэффициента по глубине.

Для объяснения полученных данных было проведено моделирование растекания тепла в структуре, представленной на рис. 1. На рис. 3 приведен пироэлектрический отклик, представляющий из себя интеграл по глубине образца производной температуры от времени (уравнение 1) в приближении постоянного пирокоэффициента по глубине пленки. Видно, что в эксперименте пироэлектрический отклик имеет более короткий выброс в отрицательную область, что говорит о том, что в SBN есть встречные домены.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализована методика измерения пироэлектрического отклика пленки SBN под действием лазерного импульса. Показано, что по пироэлектрическому отклику можно определить величину спонтанной поляризации пленки и распределение пирокоэффициента по глубине образца. Предложенная методика обладает большой чувствительностью и высоким пространственным разрешением.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анцыгин В.Д., Косцов Э.Г., Соколов А.А.* // Автометрия. 1986. № 2. С. 30.
2. *Соколов А.А., Иванов И.Д.* // Автометрия. 2022. Т. 58. № 2. С. 54.
3. *Shur V.Ya.* // *Ferroelectrics*. 2006. V. 340. P. 3.
4. *Lang S.B., Das-Gupta D.K.* // *J. Appl. Phys.* 1986. V. 59. No. 6. P. 2151.
5. *Lang S.B.* // *Ferroelectrics*. 1991. V. 118. P. 343.
6. *Bauer S., Ploss B.* // *J. Appl. Phys.* 1990. V. 68. No. 12. P. 6361.
7. *Biryukov S.V., Sotnikov A., Weihnacht M.* // *Ferroelectrics*. 2011. V. 185. No. 1. P. 281.
8. *Adibi H., Assari P.* // *Math. Probl. Engin.* 2010. Art. No. ID 138408.
9. *Shur V.Ya., Kosobokov M.S., Maskaev A.V. et al.* // *Acta Mater.* 2021. V. 219. Art. No. 117270.
10. *Shur V.Ya., Rumyantsev E.L., Shishkin E.L.* // *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 77. No. 22. P. 3636.
11. *Ivanov S.D., Kostsov E.G.* // *IEEE Sens. J.* 2020. V. 20. No. 16. P. 9011.

## Study of the pyroelectric response of thin ferroelectric strontium barium niobate films during their heating by a pulsed laser

A. M. Pugachev<sup>a</sup>, \*, A. A. Sokolov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

\*e-mail: [apg@iae.nsk.su](mailto:apg@iae.nsk.su)

We have studied the pyroelectric response of thin ferroelectric films of strontium barium niobate  $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$  (SBN- $x$ ) with heating by a pulsed laser. The distribution of the pyroelectric coefficient over the depth of the ferroelectric was determined from the response. SBN-50 films grown by plasma spraying on an indium-tin-oxide layer deposited on a sapphire substrate studied.