

А. М. Пугачев¹, А. А. Соколов^{1}*

Механические элементы в пьезоэлектрических приемниках излучения

¹ Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: SokolovAA@iae.nsk.su

Аннотация. Пленочные пьезоэлектрические приемники излучения чувствительны в широком спектральном диапазоне, обладают высокой чувствительностью и могут работать без охлаждения. Пленочные пьезоприемники являются перспективными ввиду их малых размеров и высокой чувствительности. Последняя, в частности, обусловлена тем, что пленка при поглощении излучения нагревается исключительно сильно ввиду ее малой общей теплоемкости. В работе исследовались пленки Strontium-Barium Niobate – $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN), выращенные плазменным напылением на слое оксида индия-олова (indium-tin-oxide – ИТО) на кремниевой подложке. Эти структуры используются в пьезоэлектрических электронно-оптических преобразователях нового поколения. Авторами обнаружена исключительно высокая чувствительность некоторых из исследованных пленок. Предложено объяснение наблюдаемому явлению: возникновение подвижных элементов в системе «подложка – нижний электрод – сегнетоэлектрик – верхний электрод». Как пример, отрыв верхнего электрода от сегнетоэлектрика или отрыв нижнего электрода от подложки.

Ключевые слова: пьезоэлектрик, тонкие пленки, микроэлектромеханика

А. М. Pugachev¹, А. А. Sokolov^{1}*

Mechanical Elements in Pyroelectric Radiation Receivers

¹Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: SokolovAA@iae.nsk.su

Abstract. Film pyroelectric sensors are sensitive in a wide spectral range, have high sensitivity and can operate without cooling. Film pyroelectric sensors are effective due to their small size and high sensitivity. The sensitivity, in particular, is due to those films are heated extremely strong when they absorb the radiation. We investigate a Strontium-Barium Niobate – $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN) films grown by plasma spraying on a layer of indium tin oxide (ITO) on a silicon substrate. Those structures are used in a new generation of pyroelectric electron-optical converters. The authors found an exceptionally high sensitivity of some of the studied films. An explanation of the observed phenomenon is proposed: the appearance of movable elements in the system "substrate – lower electrode – ferroelectric – upper electrode". As an example, the separation of the upper electrode from the ferroelectric or the separation of the lower electrode from the substrate.

Keywords: pyroelectric, thin films, microelectromechanics

Введение

Пьезоэлектрический эффект объемных материалов обусловлен тем, что спонтанная поляризация материала зависит от температуры: $\vec{P}(T) \neq 0$. Пьезоэлектрический ток:

$$j_p = S \frac{dP}{dt} = S \frac{\partial P}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \gamma S \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где S – площадь образца под электродом; γ – пироккоэффициент [1].

Заметим, что в понятие пироэлектрического коэффициента никак не входит толщина образца: ток одинаков как для массивного кристалла, так и для тонкой пленки. При этом пленка при поглощении излучения нагревается исключительно сильнее ввиду ее малой общей теплоемкости. Емкость образца ухудшает возможности детектирования сигнала, и для пленки емкость велика ввиду ее малой толщины. Некоторые сегнетоэлектрики имеют исключительно большую (~1000) диэлектрическую проницаемость, что еще больше увеличивает емкость чувствительного элемента.

Для синусоидального по времени нагрева:

$$j_p = \gamma S \frac{\partial T}{\partial t} = \gamma S \cdot \Delta T \cdot \frac{\partial \sin(\omega t)}{\partial t} = \gamma S \omega \cdot \Delta T \cdot \cos(\omega t), \quad (2)$$

где ΔT – половина размаха температуры; j – половина размаха тока.

Методы и материалы

Нами измерялся пироккоэффициент в пленках Strontium-Barium Niobate – $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN), различной толщины, напыленных на различные подложки с различными электродами. На рис. 1 показан пример пленки SBN с четырьмя разными временами напыления и, соответственно, разными толщинами.

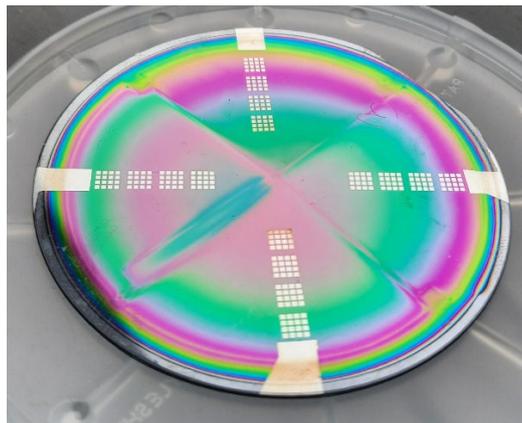


Рис. 1. Пример исследуемой пленки SBN

Измерения проводились на установке, показанной на рис. 2 [2]. Частота модуляции элементом Пельтье составляла 0,1 Гц, что обеспечивало равномерный

прогрев образца и исключало влияние емкости на результаты измерений. Металлический заземленный корпус экранировал от наводок и исключал влияние случайного освещения на результаты измерений.

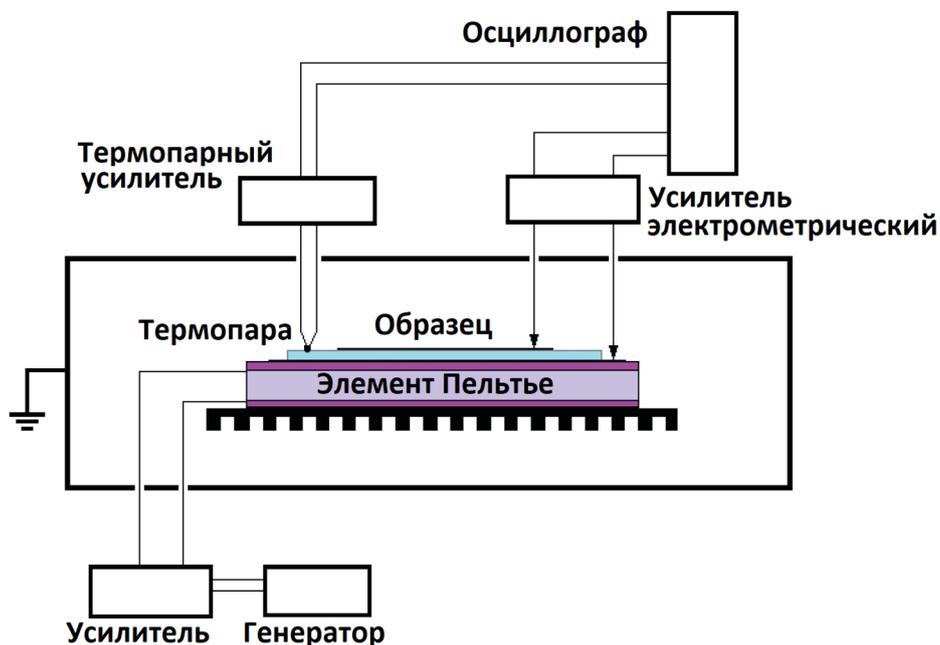


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Температура контролировалась термопарой, установленной вблизи исследуемой области образца.

Для детектирования пироэлектрического сигнала использовался токовый усилитель, рис. 3 [3]. Входное сопротивление такого усилителя пренебрежимо мало, что является защитой от пробоя и, кроме того, позволяет корректно измерять сигнал от пленок с «небесконечным» внутренним сопротивлением.

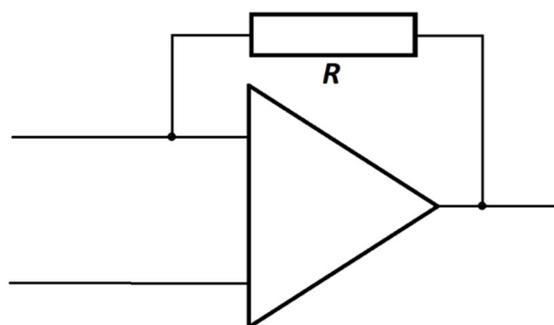


Рис. 3. Токовый электрометрический усилитель для детектирования сигнала от пленки. Первый каскад. R – резистор в обратной связи

Результаты

В результате измерений выяснилось, что для некоторых тонких (сотни нанометров) пленок SBN наблюдается аномально высокий пирокоэффициент, на два порядка выше, чем на соседних контактах. При этом кроме пироэффекта на этих же пленках наблюдается исключительно большой фотогальванический эффект [1] – выработка тока при освещении. Более толстые пленки обладают только пироэлектрическим эффектом, но аномально высокого пиросигнала в них нет.

Кристаллы SBN толщиной 0,5 – 1 мм показывают пирокоэффициент, совпадающий с известным из литературы.

Кроме пироэлектрического тока в пленках SBN, смещенного по фазе относительно нагрева на $\pi/2$, наблюдаются и «термостимулированные» токи, синфазные нагреву.

Обсуждение

Аномально высокий пироэлектрический сигнал в тонких пленках SBN можно объяснить тем, что в них влияние поверхности велико, пленка напряженная, вплоть до ее отрыва от подложки в некоторых случаях. Верхний электрод, при этом, может «прорасти» сквозь пироэлектрический слой. Иногда это приводит к замыканию, отсутствию сигнала. Но может – и к концентрации электрического поля на неоднородностях проводящей поверхности (электрода).

Кроме того, механические напряжения в нагреваемой пленке могут вызывать вторичный пироэлектрический эффект [1] ввиду того, что SBN является пьезоэлектриком.

Почему этот эффект наблюдается не на всех контактных площадках?

В [4] обсуждался вопрос о том, как могут в подобных структурах (с подвижным «верхним» электродом) возникать электромеханические волны. Тогда те площадки, который механически смещены (оторваны от подложки) могут переносить заряд подобно электрофорной машине. В этом случае «пироэлектрический» сигнал может быть очень велик.

Авторы [5] специально вырастили периодическую структуру, обладающую механической подвижностью. Такая структура при нагреве (охлаждении) изменяет свою геометрию, и «пироэлектрический» эффект в виде изменения поляризации при изменении температуры может быть обусловлен уже не изменениями в элементарной ячейке, а в изменении геометрии этой специально выращенной структуры.

Заключение

В работе обнаружен аномально высокий пирокоэффициент в некоторых точках исследуемых образцов. Предложено объяснение наблюдаемому явлению: возникновение подвижных элементов в системе «подложка – нижний электрод – сегнетоэлектрик – верхний электрод. Как пример, отрыв верхнего электрода от сегнетоэлектрика или отрыв нижнего электрода от подложки.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Госзадания ИАиЭ СО РАН FWNG-2021-0004 «Развитие методов оптической спектроскопии для задач материаловедения и биологической физики» и FWNG-2021-0014 «Разработка наноэлектромеханических структур на основе сегнетоэлектрических пленок». Часть экспериментов была проведена в центре множественного доступа «Спектроскопия газов и конденсированных сред высокого разрешения» в ИАиЭ СО РАН (Новосибирск, Россия).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы – Мир. 1981 г, 736 с.
2. Иванов С.Д., Косцов Э.Г. Тепловые приемники неохлаждаемых многоэлементных тепловизионных матриц. Ч. II Новые нетеплоизолированные элементы // Автометрия, 2016. – Т. 52, № 1. – С. 104 – 115. DOI: 10.15372/AUT20160113.
3. Вьюхин В. Н. Измеритель малых токов с автономным питанием // Приборы и техника эксперимента, 2021. – № 4. – С. 152–153. DOI: 10.31857/S0032816221040273.
4. Иванов С.Д., Соколов А.А. Двумерные электромеханические волны в МЭМС структурах с нанозазором // Автометрия, 2023. Т 59, № 3, с. 19–23 DOI: 10.15372/AUT20230303
5. Vitaliy S. Tumashev, Vladimir A. Seleznev/ A New Technique of Au Nanopattern Formation for Metal-Assisted Chemical Etching of Silicon // 2021 IEEE 22nd INTERNATIONAL CONFERENCE OF YOUNG PROFESSIONALS IN ELECTRON DEVICES AND MATERIALS (EDM). DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507704.

© А. М. Пугачев, А. А. Соколов, 2023