

# **ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛАСТИЧНОГО СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ**

А.А. Фельде, В.С. Мальцев, С.В. Сидорова

## **АННОТАЦИЯ**

Рассмотрена актуальность разработки эластичного датчика температуры на основе сегнетоэлектрического материала. Разработана технология изготовления чувствительного элемента сегнетоэлектрического гибкого датчика температуры. Проведено исследование влияния ионно-плазменной обработки на топологию эластичного материала. Экспериментально определена зависимость шероховатости эластомера от угла падения ионов и времени обработки. Показаны экспериментальные зависимости емкости чувствительного элемента от температуры.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК, ИОННАЯ ОБРАБОТКА, ПЛАЗМА, ЭЛАСТОМЕР, ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ, ВАКУУМ, ЕМКОСТЬ

## **THE ION PLASMA TREATMENT EFFECT ON ELASTIC FERROELECTRIC TEMPERATURE SENSOR CHARACTERISTICS**

A.A. Felde, V.S. Maltsev, S.V. Sidorova

## **ABSTRACT**

The development relevance of an elastic temperature sensor based on ferroelectric material is considered. A manufacturing technology for the sensitive element of a ferroelectric flexible temperature sensor has been developed. The ion plasma treatment effect on the elastic material topology has been studied. The elastomer roughness dependence on the angle of ions incidence and processing time is derived. Experimental dependences of the capacitance of the sensing element on temperature are shown.

## **KEYWORDS**

FERROELECTRIC, ION PROCESSING, PLASMA, ELASTOMER, TEMPERATURE SENSOR, VACUUM, CAPACITY

## **ВВЕДЕНИЕ**

Сегнетоэлектрики – это кристаллические диэлектрики, обладающие спонтанной электрической поляризацией, то есть электрическим дипольным моментом, в определенном диапазоне температур и в отсутствие внешних электрических полей. Спонтанная поляризация сегнетоэлектриков может существенным образом изменяться под влиянием внешних воздействий: электрических полей, давления, температуры и других внешних факторов [1, 2].

На основе сегнетоэлектриков, благодаря их уникальным свойствам, производят различные датчики, в том числе датчики температуры [3]. Интегрирование частиц сегнетоэлектрика в эластомер позволяет создать эластичный (гибкий) датчик, что увеличивает возможности его применения и обеспечивает плотное прилегание датчика к измеряемой поверхности.

Для проявления свойств сегнетоэлектрика в датчике температуры предложено проводить поляризацию в плазме эластомера с частицами титаната бария.

Целью работы является исследование влияния ионно-плазменной обработки в вакууме на характеристическую зависимость емкости от температуры чувствительного элемента.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Ионно-лучевая обработка и магнетронное распыление осуществляется на установке МВТУ-11-1МС (рис. 1), спроектированной и собранной на кафедре МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им.Н.Э. Баумана.



Рис. 1. Установка МВТУ-11-1МС

Установка оснащена источником магнетронного распыления (рис. 2, а) и автономным источником ионов (рис. 2, б).



а)

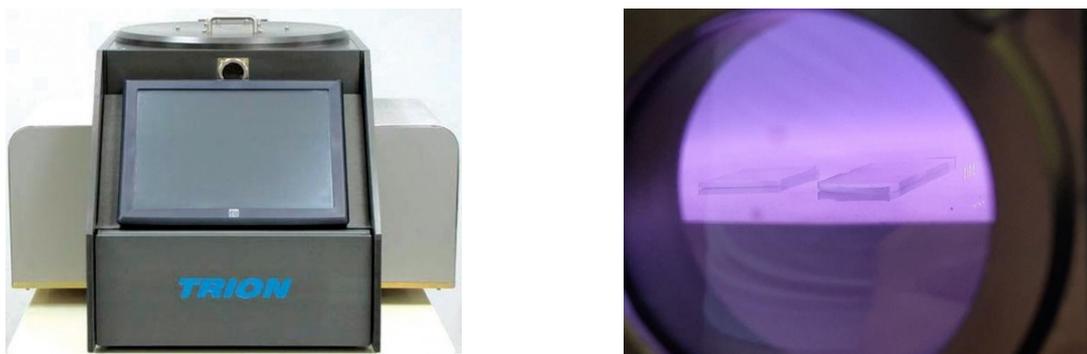


б)

а – процесс магнетронного распыления; б – ионно-лучевая обработка

Рис. 2. Технологические источники в работе

Плазменная обработка проводится на установке плазмохимического травления TRION (рис. 3).



а) б)  
а – вид установки; б – процесс плазменной обработки

Рис. 3. Установка TRION

Исследование топологии эластомера проведено с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver Next в полуконтактном режиме.

Для исследования характеристик чувствительного элемента датчика температуры был собран стенд (рис. 4), состоящий из LCR-станции и термопары с выводом данных на ноутбук.

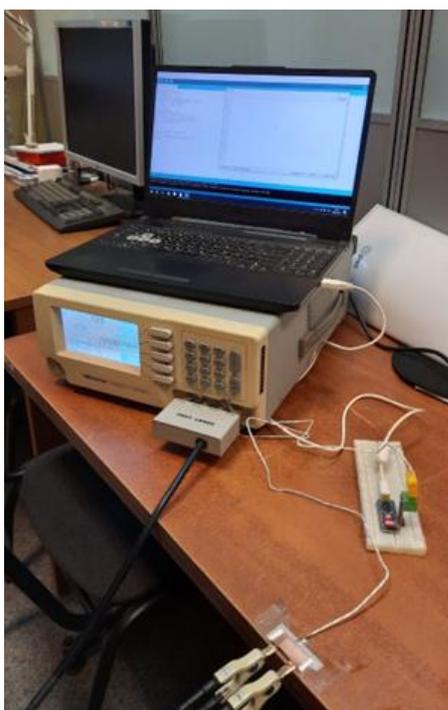


Рис. 4. Измерительный стенд

По результатам измерений строятся графики зависимости емкости чувствительного элемента от температуры.

## ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предложено формирование датчика в соответствии со структурной схемой (рис. 5, а). Полученные экспериментальным путем зависимости емкости от температуры будут сравниваться с теоретической зависимостью на рис. 5, б.

Эластомер состоит из силикона и порошка титаната бария, электроды медные (для использования в медицинских целях – титановые) [4].

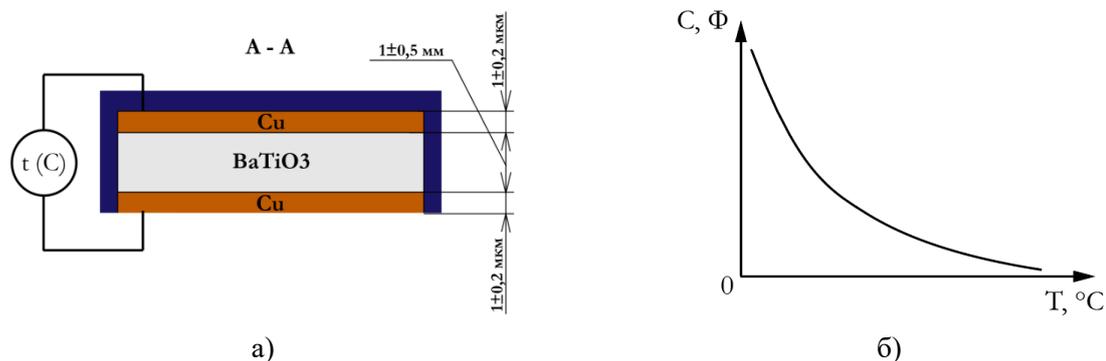


Рис. 5. Чувствительный элемент датчика температуры (а) и характеристическая зависимость емкости от температуры (б)

Технологию изготовления чувствительного элемента датчика температуры можно разделить на два этапа: изготовление эластомера и формирование на нем электродов. В первый этап входит смешивание компонентов в необходимых пропорциях, литье смеси в форму, ее дегазация и полимеризация и подготовка образцов к дальнейшему нанесению. На втором этапе эластомер проходит трехступенчатую очистку в ультразвуковой ванне. Далее в вакуумной камере проходят последовательно операции ионной обработки и магнетронного распыления, образцы переворачивают и эти операции повторяются с другой стороны. Финишной подготовкой чувствительного элемента является активация свойств сегнетоэлектрика. Далее – контроль полученных характеристик с помощью измерительного стенда.

Проведен эксперимент, сравнивающий ионно-лучевую и плазменную обработки эластомера [5]. Шероховатость после ионной обработки уменьшилась, а при плазменной увеличилась. При этом в обоих случаях поверхность стала более развитой. Лучше себя показала ионно-лучевая обработка, поэтому дальнейшие исследования связаны с ней.

Предложено провести математическое моделирование зависимости шероховатости поверхности эластомера от угла падения ионов и времени обработки (рис. 6).

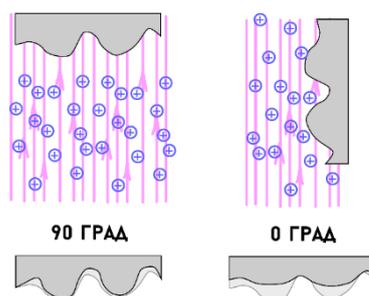
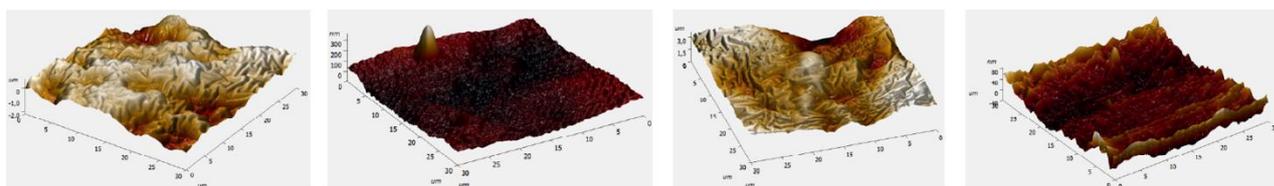


Рис. 6. Схема обработки эластомера под углом 90 градусов (слева) и 0 градусов (справа)

На АСМ получены изображения обработанных образцов (рис. 7), по которым определяется их шероховатость (выходной параметр).



а) б) в) г)

а – 5 мин, 90°; б – 5 мин, 0°; в – 10 мин, 90°; г – 10 мин, 0°

Рис. 7. АСМ-изображения

По АСМ-изображениям видно большую разницу между образцами после обработки под углом 90° и 0°. Поверхность, обработанная под углом 0°, имеет однородную структуру с незначительными выступами. При этом видны и небольшие различия от времени обработки.

$$Y = 600 + 94X_1 + 534X_2 + 119X_1X_2,$$

где  $Y$  – шероховатость, нм;

$X_1$  – время обработки, б/р;

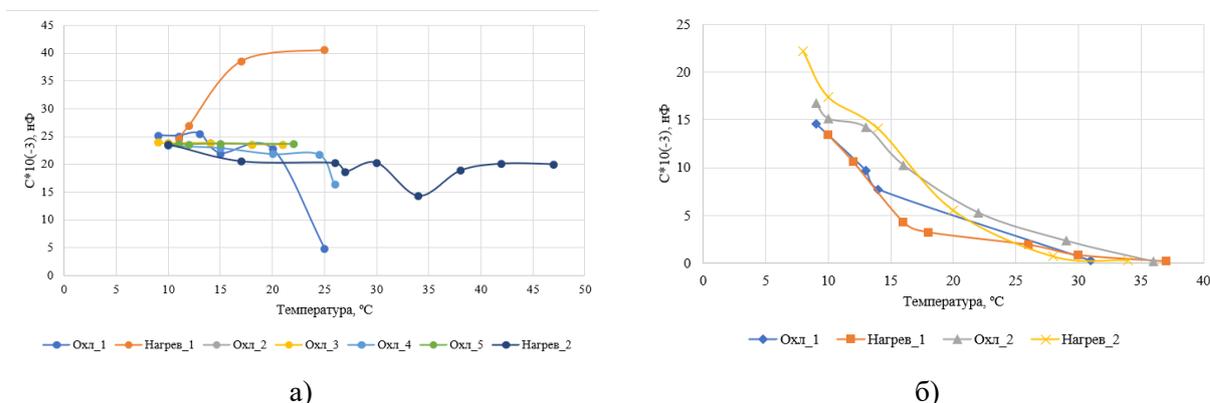
$X_2$  – угол падения ионного луча, б/р.

Уравнение показало большую значимость угла обработки, чем времени. На основании полученного уравнения были подобраны режимы ионной обработки [6].

Тонкопленочное медное покрытие нанесено методом магнетронного распыления с предварительной ионной обработкой. Без обработки покрытие не сплошное, обладает плохой адгезией. После обработки имеет хорошие адгезионные свойства, поэтому предварительная обработка поверхности необходима. Подобраны ее режимы: поток аргона 2 sccm, ток 30 мА, время 1 минута.

Проведено исследование зависимости характеристик чувствительного элемента после ионной обработки и плазменной. Проведено несколько циклов нагрева и охлаждения и построены зависимости емкости образцов от изменения температуры (рис. 8).

После ионной обработки не отслеживаются закономерные кривые, показания емкости прямолинейны или хаотичны. Однако, зависимости после плазменной обработки сходятся с теоретической кривой.



а)

б)

Рис. 8. Экспериментальные зависимости емкости от температуры после ионной обработки (а) и после плазменной (б)

Зависимости средних показателей емкости от температуры при нагреве и охлаждении представлены на рис. 9. Показания не совпадают полностью, но коррелируются между собой.

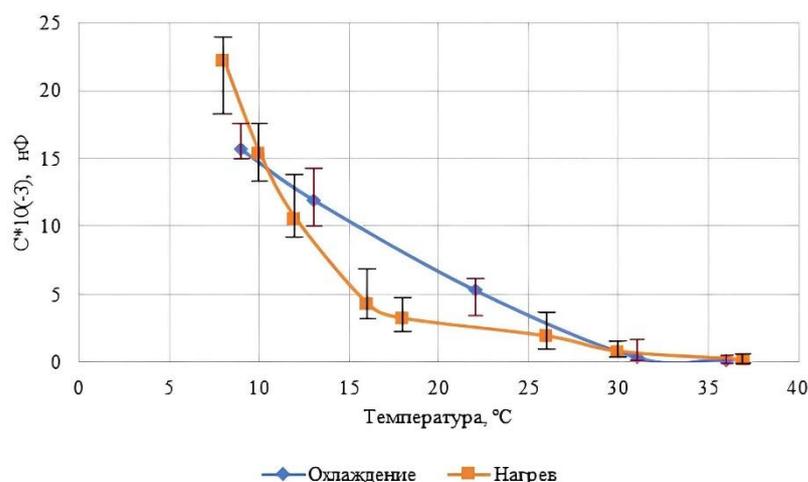


Рис. 9. Средние зависимости емкости от температуры при нагреве и охлаждении

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя полученные результаты, можно сделать ряд выводов. Определена последовательность технологических операций, необходимых для изготовления чувствительного элемента датчика температуры, включающая в себя два этапа: изготовление эластомера и формирование электродов.

Исследовано влияние ионной и плазменной обработки на морфологию поверхности эластичного материала: она становится более развитой, но при ионной шероховатость уменьшается с 3,55 до 3,15 мкм, а при плазменной – увеличивается с 3,55 до 4,75 мкм.

Для улучшения адгезии слоя металлизации к поверхности эластомера рекомендуется проводить ионную обработку в режиме стабилизации по току при 30 мА, потоке рабочего газа (аргон) 2 sccm в течение 1 минуты. Получено уравнение регрессии, показывающее, что шероховатость поверхности эластомера зависит от времени и угла падения ионов при ионной обработке, а также от их взаимодействия.

Ионная обработка оказалась неэффективной для активации сегнетоэлектрических свойств, так как зависимость емкости от температуры хаотична. После плазменной обработки при мощности 250 Вт, потоке аргона 20 sccm и давлении 26 Па в течение 6 минут зависимость емкости от изменения температуры с 5° до 40°C чувствительного элемента совпадает с теоретической кривой. Изменения емкости при нагреве и охлаждении коррелируются.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы разработана технология изготовления чувствительного элемента датчика температуры. Показано влияние ионно-плазменных процессов на характеристики чувствительного элемента. Обработка ионным лучом не оказывает влияния на поляризацию чувствительного элемента, поэтому нецелесообразно использовать ее в этих целях. Плазменная обработка влияет на чувствительность датчика в зависимости от режима процесса, что подтверждает возможность применения плазменной обработки для поляризации сегнетоэлектрика.

Получены тестовые образцы чувствительного элемента и в дальнейшем планируется провести серию экспериментов по определению чувствительности датчика в зависимости от плазменной обработки и спроектировать портативную электронную схему для датчика.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Yoshihiro Sekine, Ryohei Akiyoshi, Shinya Hayami. Recent advances in ferroelectric metal complexes. *Coordination Chemistry Reviews* 469 (2022)
2. Дж. Барфут. Введение в физику сегнетоэлектрических явлений. Издательство «Мир» (1970)
3. Shin S. H. et al. Ferroelectric zinc oxide nanowire embedded flexible sensor for motion and temperature sensing. *ACS applied materials & interfaces* (2017)
4. Фельде А. А., Купцов А. Д. Эластичный датчик температуры с тонкопленочными электродами. [Электронный ресурс] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 3 – 7 апреля, 2023, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: ООО «КванторФорм», 2023.– URL: [studvesna.ru?go=articles&id=3782](http://studvesna.ru?go=articles&id=3782) (дата обращения: 16.04.2024)
5. А. А. Фельде, П. А. Ежова, С. В. Сидорова. Необратимые процессы в природе и технике: Труды Двенадцатой Всероссийской конференции. В 2-х томах, Москва, 31 января – 03 2023 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (2023)
6. Одиннадцатая Российская студенческая научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технология»: материалы конференции (18-20 апреля 2023 г.); Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ (2023)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Фельде Анастасия Александровна – студент 1 курса магистратуры (ORCID: 0009-0008-4051-4774). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. e-mail: [nastja-bloom@mail.ru](mailto:nastja-bloom@mail.ru)

Мальцев Владислав Сергеевич – студент 2 курса магистратуры (ORCID:<https://orcid.org/0009-0009-3294-8326>). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. e-mail: [malzev.vladislav.99@gmail.com](mailto:malzev.vladislav.99@gmail.com)

Сидорова Светлана Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры (ORCID: 0000-0002-3002-1246). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: [sidorova\\_bmstu@mail.ru](mailto:sidorova_bmstu@mail.ru)