

УДК 531.768

Д.А. Коваленко, В.В. Петров, В.Г. Клиндухов**РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ЦИРКОНАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА**

Работа включает в себя комплексное исследование сегнетоэлектрических пленок ЦТС на кремниевых подложках, полученных высокочастотным реактивным распылением. Определены оптимальные параметры напыления. Проведены структурные и электрофизические исследования, которые показали зависимости структурных и электрофизических параметров образцов от технологических параметров напыления. Рост толщин пленок зависит от времени напыления и составляет 600 ± 60 нм/ч. Значения емкостей полученных образцов лежат в диапазоне 200–2000 пФ, а диапазон поляризаций образцов лежит в пределах $0,06 - 24$ мкКл/см². Значения рассчитанных пьезомодулей лежали в диапазоне $0,04 \cdot 10^{-12} - 140 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. Сформированы макеты сенсорных элементов и исследовано влияние на них динамических деформаций. Результаты исследований показали, что варьируя структурными параметрами сенсорного элемента датчика динамических деформаций на основе сегнетоэлектрических пленок ЦТС, можно оптимально подбирать диапазон чувствительности. На основе созданных сенсорных конструкций собран рабочий макет датчика вибрации и ускорения.

Сегнетоэлектрик; высокочастотное реактивное распыление; сенсорный элемент; датчик динамических деформаций; структурные исследования; электрофизические исследования; пьезомодуль; поляризация.

D.A. Kovalenko, V.V. Petrov, V.G. Klindukhov**DESIGN OF THE GAUGE OF DYNAMIC DEFORMATIONS ON THE BASIS OF FERROELECTRIC FILMS TSIRKONATITANATA OF LEAD**

The article includes complex research of ferroelectric films of PZT on the silicon substrates landed by high-frequency reactive pulverization. Optimum parameters of evaporation are determined. Structural and electrophysical researches are done. It showed dependences of structural and electrophysical parameters of samples on technological parameters of evaporation. Growth of thickness of a film is directly proportional to time of dispersion and makes 600 ± 60 nm/h. Capacities of the received samples lie in the range from 200 to 2000 pF. Results of research showed that values of polarization of samples lie in the range of $0,6 - 24$ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$. Calculated values of piezoelectric modulus lie in the range of $0,4 \cdot 10^{-12} - 140 \cdot 10^{-12}$ C/N. Prototypes of sensor elements are created and influence on them dynamic deformations is probed. Results of researches showed that it is possible to select optimal sensitivity range by variation of structural parameters of a sensory element of the detectors of dynamic deformations based on ferroelectric films. The working prototype of the detector of vibration and acceleration based on the created sensor constructions is done.

Ferroelectric material; high-frequency reactive pulverization; sensor element; detector of dynamic deformations; structural researches; electrophysical researches; piezoelectric modulus; polarization.

Современные исследования показали, что благодаря свойствам сегнетоэлектрических пленок область их применения очень широка. В зависимости от конструкции сенсорного элемента на основе сегнетоэлектрических пленок можно создать различные типы датчиков [1].

Основным признаком сегнетоэлектрических материалов является наличие спонтанной поляризации, которая происходит в результате смещения иона Ti^{4+} (или замещающего его) в объеме элементарной ячейки из центрального положе-

ния, и деформации ячейки. При получении твердых растворов на основе таких кристаллов можно получать материал с широким диапазоном свойств. Например при изменении соотношения компонентов твердого раствора $BaTiO_3$ и $SrTiO_3$ диэлектрическая проницаемость изменяется от 2 000 до 12 000, а точка Кюри от 120 °С ($BaTiO_3$) до 250 °С ($SrTiO_3$) [2]. Из этих соображений в качестве материала для исследования нами был выбран цирконат-титанат свинца (ЦТС).

В лаборатории научно-образовательного центра «Микросистемная техника и мультисенсорные мониторинговые системы» (НОЦ «МСТ и МСМС») на установке высокочастотного реактивного распыления «Плазма – 80СЭ» были получены образцы сегнетоэлектрических пленок. В результате плазменного распыления на подложку высаживается пленка ЦТС в атмосфере кислорода. В качестве подложки мы использовали окисленный кремний. Основные технологические параметры напыления, а также нумерация образцов представлены в табл. 1. В табл. 1 представлены две партии полученных образцов (первая – № 1–9, вторая – № 10–15).

Рентгенофазовый анализ (РФА) показал прямую зависимость количественного содержания кристаллического ЦТС в структуре пленки от парциального давления кислорода в камере (рис. 1). С помощью интерференционного микроскопа МИИ-4 были исследованы толщины пленок. Рост толщины пленки прямо пропорционален времени напыления и составляет 600 ± 60 нм/ч, таким образом, диапазон толщин полученных пленок составил 300–1000 нм. Также были получены снимки поверхности при 500-кратном оптическом увеличении (рис. 2), которые показали, что размер доменов лежит в диапазоне 4–40 мкм.

Исследование емкостей полученных образцов первой партии показало, что емкость пленки зависит от толщины пленки. Резкий рост емкости наблюдается до толщин, равных примерно 600 нм, затем наблюдается слабый прирост. В связи с этим был сделан вывод о том, что целесообразно проводить напыление по времени до 60 мин. Поэтому вторая партия образцов была получена при времени напыления 30 и 60 мин. Значения емкостей полученных образцов лежат в диапазоне от 200–2000 пФ и показаны в табл. 2.

Таблица 1

Основные параметры процесса напыления образцов

№	t, мин	$P_{\text{газ}}, \text{Па}$	$U_{\text{эл}}, \text{В}$	$U_{\text{ф}}, \text{В}$	$I_{\text{с}}, \text{мА}$	$I_{\text{к}}, \text{А}$	$N_{\text{пр.}}, \text{Вт}$	$N_{\text{отр.}}, \text{Вт}$
1	90	0,4	0,73	1,05	1	0,49	270	8
2	60	0,4	0,74	1,04	1	0,49	270	7
3	30	0,4	0,74	1,08	1	0,5	270	8
4	90	0,44	0,73	1,23	1	0,49	270	8
5	60	0,44	0,73	1,32	1	0,49	270	9
6	30	0,44	0,73	1,35	1	0,49	270	8
7	90	0,51	0,7	1,44	1	0,5	270	6
8	60	0,51	0,71	1,41	1	0,5	270	8
9	30	0,51	0,7	1,45	1	0,49	270	6
10	60	0,55	0,72	1,52	1	0,49	290	8
11	30	0,55	0,7	1,51	1	0,5	290	6
12	60	0,6	0,73	1,55	2	0,48	290	6
13	30	0,6	0,72	1,56	2	0,49	290	7
14	60	0,64	0,72	1,62	2	0,48	290	6
15	30	0,64	0,74	1,6	2	0,47	290	7

Таблица 2

Значения емкостей полученных образцов

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8
Емкость, пФ	205	194	143	305	296	220	498	487
№ образца	9	10	11	12	13	14	15	
Емкость, пФ	406	935	712	1543	967	1897	1098	

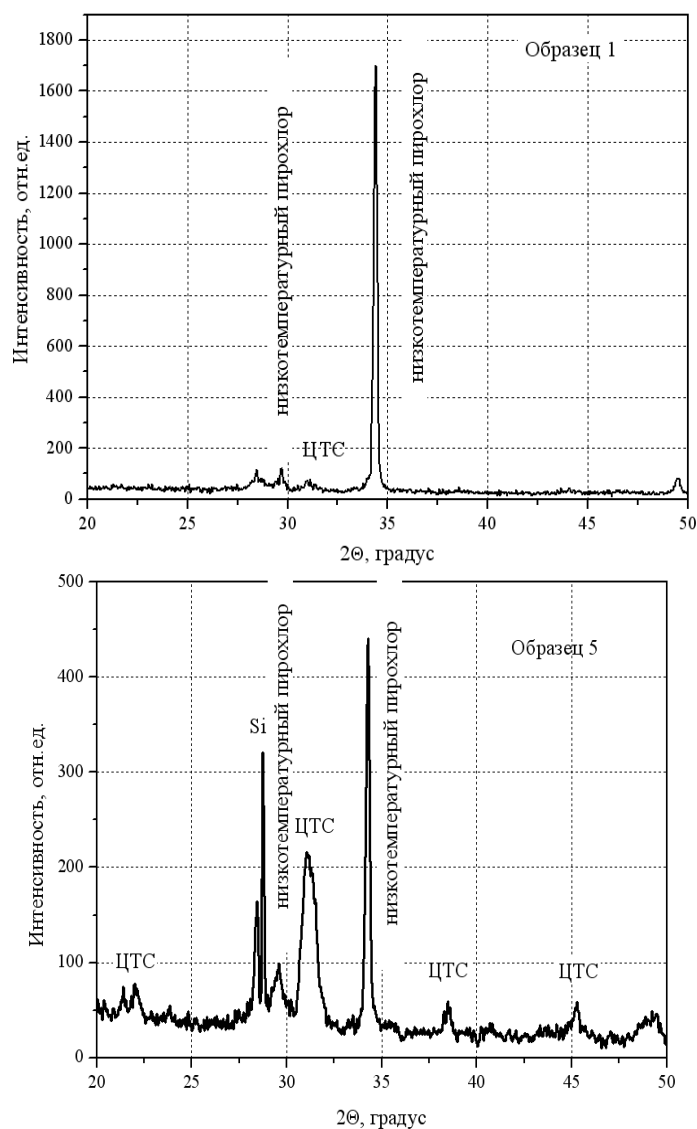
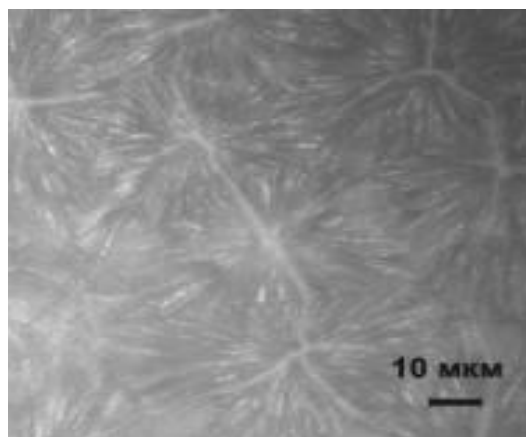


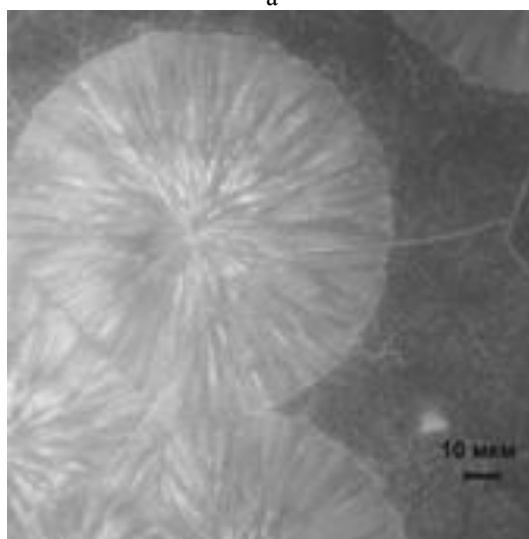
Рис. 1. Спектры, полученные в результате рентгенофазового анализа

Для исследования электрофизических свойств полученных образцов сенсоров, по схеме Соуэра–Тауэра (рис. 3) был собран стенд для измерения петель диэлектрического гистерезиса [3]. Сенсорный элемент представлял собой консольную балку

(рис. 4). В месте наибольших концентраций напряжений, возникающих при деформации (прогибе) сенсорного элемента, расположена система электродов, снимающих величину индуцированного заряда внутри пленки. Результаты исследования показали, что диапазон поляризаций образцов лежит в пределах $0,06\text{--}24\text{ мкКл/см}^2$. Значения рассчитанных пьезомодулей лежали в диапазоне $0,04 \cdot 10^{-12}\text{--}140 \cdot 10^{-12}\text{ Кл/Н}$.



а



б

Рис. 2. Фотографии участков поверхности образцов, полученные при 500-кратном оптическом увеличении (а – образец 2; б – образец 5)

Чувствительность и частотный диапазон датчиков вибрации и ускорения определяется совокупностью следующих параметров:

- ◆ электрические параметры (емкость на низкой частоте);
- ◆ механические параметры (частота механического резонанса и механическая добротность);
- ◆ параметры, связывающие электрическую и механическую стороны и характеризующие процесс преобразования электрической энергии в механическую (и наоборот, механическую в электрическую).

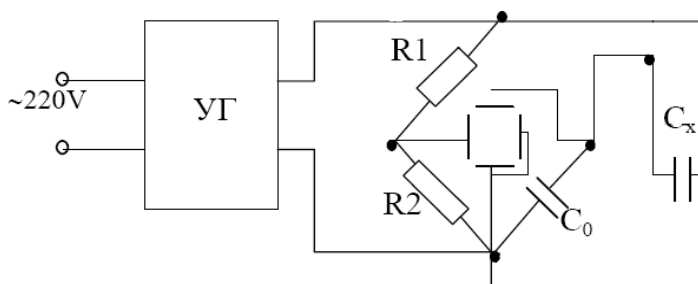


Рис. 3. Схема Сойера–Тауэра для исследования диэлектрического гистерезиса

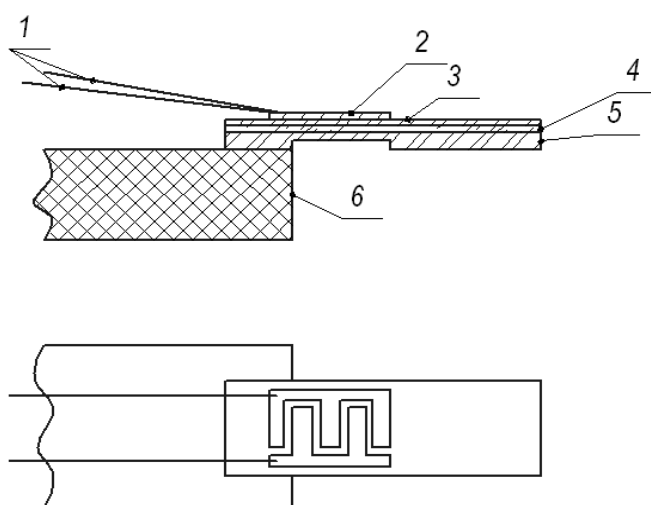


Рис. 4. Конструкция сенсорного элемента балочного типа: 1 – провода; 2 – контактные площадки; 3 – пленка ЦТС; 4 – оксид кремния; 5 – кремний

На основе вышесказанного нами были проведены исследования по увеличению чувствительности за счет изменения структуры балочного элемента. Для этого в месте наибольших концентраций напряжений, возникающих при деформации (прогибе) сенсорного элемента, с обратной стороны кремниевой подложки анизотропным травлением было сформировано утончение подложки с 200 мкм (основная толщина кремниевой подложки) до 100 мкм. Сформированные новые структуры были исследованы на аналогичные по силе динамические деформации. В результате произведенных расчетов величины пьезомодулей лежали в диапазоне $0,07 \cdot 10^{-12} - 240 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, что примерно на 60–70 % выше по сравнению с образцами, чьи структуры не подвергались травлению.

Таким образом, принято рассматривать чувствительные элементы не только со стороны электрической составляющей, но и со стороны совокупности механической и электрической составляющих [4]. Общая эквивалентная электромеханическая схема приведена на рис. 5.

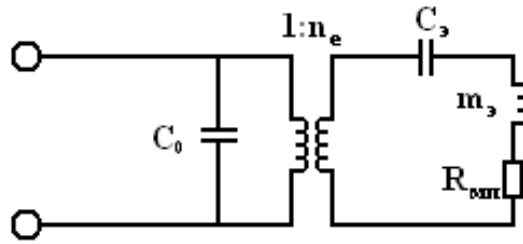


Рис. 5. Эквивалентная электромеханическая схема: C_3 , m_3 , R_3 – эквивалентные гибкость, масса и сопротивление механических потерь колебательной системы; n_e – коэффициент электромеханической трансформации; C_0 – емкость заторможенного, неколеблущегося конденсатора

Далее на основе вышеописанных сенсорных элементов был собран макет датчика вибрации и ускорения. Преобразование и усиление заряда в сенсоре при воздействии синусоидальной вибрации осуществляется зарядочувствительным услителем, схема которого приведена на рис. 6.

Импульсы входного тока I_d , возникающие при изменении заряда $q_{вх}$ в сегнетоэлектрической пленке преобразуются в изменение напряжения на стоке полевого транзистора входного каскада усилителя. Большое входное сопротивление усилительного каскада на полевом транзисторе ($R_1=1$ ГОм) не шунтирует сенсор. Далее сигнал поступает на вход инвертирующего усилителя-интегратора, собранного на операционном усилителе DA.

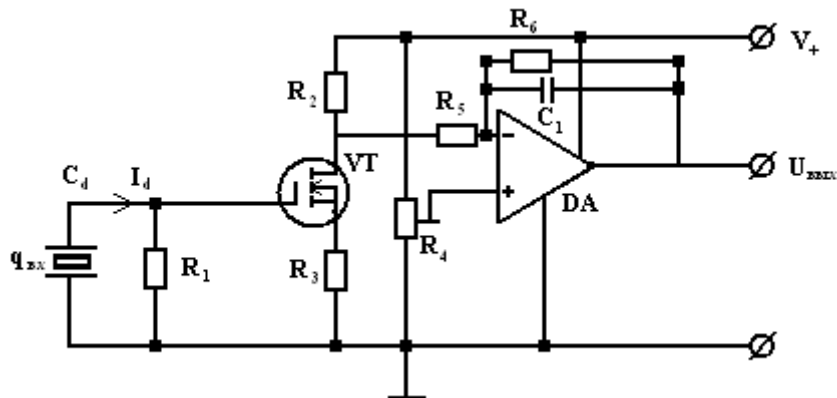


Рис. 6. Схема зарядочувствительного усилителя датчика вибрации

В результате было проведено комплексное исследование сегнетоэлектрических пленок ЦТС на кремниевых подложках, полученных высокочастотным реактивным распылением. Определены оптимальные параметры напыления. Проведены структурные и электрофизические исследования, которые показали зависимости структурных и электрофизических параметров образцов от технологических параметров напыления. Сформированы макеты сенсорных элементов и исследовано влияние на них динамических деформаций. Результаты исследований показали, что, варьируя структурными параметрами сенсорного элемента датчика динамических деформаций на основе сегнетоэлектрических пленок ЦТС, можно оптимально подбирать диапазон чувствительности. На основе созданных сенсорных конструкций собран рабочий макет датчика вибрации и ускорения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мухортов В.М., Юзюк Ю.И.* Гетероструктуры на основе наноразмерных сегнетоэлектрических пленок: получение, свойства и применение. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. – 224 с.
2. *Лайнс М., Гласе А.* Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. – М.: Мир, 1998. – 736 с.
3. *Печерская Е.А., Метальников А.М., Вареник Ю.А., Бобошко А.В.* Метод измерения тока переключения и диэлектрических параметров сегнетоэлектриков // Нано- и микросистемная техника. – 2012. – № 1. – С. 24-26.
4. *Земляков В.Л.* Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: Монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. – 180 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Зори.

Коваленко Дмитрий Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: kovalenko.mitya@yandex.ru; г. Таганрог ул. Морозова 4/1, кв. 27; тел.: 89896116166; кафедра химии и экологии; ведущий инженер.

Петров Виктор Владимирович – e-mail: vvpetrov@sfedu.ru; г. Таганрог, ул. Греческая, 12; тел.: 89185416873; директор института управления в экономических, экологических и социальных системах Южного федерального университета (ИУЭЭиСС ЮФУ).

Клиндухов Валерий Григорьевич – г. Таганрог, ул. Нахимова, 14; тел.: 89185321159; кафедра химии и экологии; руководитель методического отдела.

Kovalenko Dmitry Alexandrovich – Southern Federal University; e-mail: kovalenko.mitya@yandex.ru; 4/1, Morozova, apt. 27, Taganrog, Russia; phone: +79896116166; the department of chemistry and ecology; leading engineer.

Petrov Victor Vladimirovich – e-mail: vvpetrov@sfedu.ru; 12, Grecheskaya street, Taganrog, Russia; phone: +79185416873; the director of Institute of Management in Economic, Ecological and Social Systems of the Southern Federal University (IMEESS SFEDU).

Klindukhov Valery Grigoryevich – 14, Nakhimova street, Taganrog, Russia; phone: +79185321159; the department of chemistry and ecology; head of methodical department.

УДК 621.314.1

В.В. Корохов, Е.В. Корохова, О.Н. Секунова

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

Для энергоснабжения двигателя рулевой машины спускаемого аппарата предложен литий-тионилхлоридный источник тока, имеющий в своем составе DC/DC-преобразователь. Выбор химического источника тока обусловлен его высокими энергетическими характеристиками, высокой надежностью и способностью находиться в состоянии готовности продолжительное время. В качестве преобразователя выбран обратноходовой DC/DC-преобразователь, построенный по классической схеме, который характеризуется нечувствительностью к короткому замыканию нагрузки, возможностью регулирования выходного напряжения в широких пределах, небольшим количеством элементов и невысокой стоимостью, и обеспечивает выходное напряжение источника тока в диапазоне, необходимом для бесперебойной работы рулевых машин. DC/DC-преобразователь построен на базе микросхемы TDA4605, что позволило обеспечить простоту его конструкции, высокую надежность и достаточное качество электроэнергии на выходе источника тока. Рассчитаны и приведены основные конструктивные параметры основного узла DC/DC-