

УДК 53.043

Д.А. Коваленко, В.В. Петров

### ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ЦИРКОНАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА И ИХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Описаны исследования морфологии поверхности и химического состава пленок цирконата-титаната свинца, сформированные на окисленных кремниевых подложках методом вч-реактивного распыления на установке «Плазма-80 СЭ». Исследования морфологии поверхности образцов пленок ЦТС проводились методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на зондовой нанолaborатории Ntegra. Статистические параметры морфологии поверхности определялись с помощью программы Gwyddion. В результате обработки трёхмерных изображений квадратных участков поверхности получен график функции распределения высоты профиля поверхности  $\rho=f(h)$  пленок. При помощи программы были рассчитаны значения фрактальной размерности  $D_f$  фрактальной поверхности ЦТС, которые лежат в диапазоне от 2,06 до 2,61. Также были рассчитаны значения среднеквадратичного параметра шероховатости поверхности ( $R_q$ ), которые варьируются от 0,9 до 44,6 нм, и построены профилограммы поверхности исследованных образцов, которые показывают наличие повторяющихся структур. Исследования химического и фазового составов методом РФЭС проводились на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре системы «K-Alpha». В качестве источника рентгеновского излучения использовалась  $K\alpha_{12}$ -линия Al ( $h\nu = 1486,6$  эВ). Вакуум в камере анализатора, во время проведения эксперимента, был не хуже  $2,5 \times 10^{-9}$  мбар. РФЭС показали, что химическая формула исследованных образцов сегнетоэлектрических пленок ЦТС на окисленных кремниевых подложках выглядит следующим образом:  $Pb(Ti_{0,49}Zr_{0,51})O_3$ .

Цирконат-титанат свинца; сегнетоэлектрики; высокочастотное реактивное распыление; АСМ; РФЭС; морфология поверхности, химический состав.

D.A. Kovalenko, V.V. Petrov

### RESEARCH OF MORPHOLOGY OF THE SURFACE OF FERROELECTRIC FILMS OF LEAD ZIRCONATE-TITANATE AND THEIR CHEMICAL COMPOSITION

In article the researches of morphology of a surface and chemical composition of films of lead zirconate-titanate formed on the oxidized silicon substrates by method HF-jet dispersion on installation "Plasma-80 SE" are described. Researches of morphology of a surface of samples of PZT films were conducted by method of the atomic force microscopy (AFM) on probe nanolaboratory Ntegra. Statistical parameters of morphology of a surface decided of the Gwyddion program. As a result of processing of three-dimensional images of square sites of a surface of films the function graph of distribution of height of a profile of a surface  $\rho=f(h)$  is received. Fractal dimension ( $D_f$ ) were calculated by means of the program and were in the range from 2,06 to 2,61. Also square parameter of a roughness of a surface ( $R_q$ ) were calculated and vary from 0,9 to 44,6 nm. Profile of a surface of films of the samples are constructed, which show existence of the repeating structures. Researches of chemical and phase structures by X-ray photoelectron spectroscopy method were carried out on a x-ray photoelectron spectrometer of system "K-Alpha".  $K\alpha_{12}$ -line Al ( $h\nu = 1486,6$  eV) was used as a source of a X-ray radiation. The vacuum in an analyzer chamber was not worse  $2,5 \times 10^{-9}$  mbar during experiment. X-ray photoelectron spectroscopy showed that the formula of the samples of ferroelectric PZT films on the oxidized silicon substrates are  $Pb(Ti_{0,49}Zr_{0,51})O_3$ .

Lead zirconate titanate; ferroelectric materials; high-frequency reactive sputtering; AFM; X-ray photoelectron spectroscopy; morphology of a surface; chemical structure.

**Введение.** К числу наиболее эффективных сегнетоэлектриков относятся пьезо-керамические материалы системы цирконата-титаната свинца (ЦТС), представляющие собой твёрдые растворы цирконата свинца  $PbZrO_3$  и титаната свинца  $PbTiO_3$  [1, 2], которые могут быть получены не только в виде объёмных материалов, но и в виде тонких плёнок. Двухкомпонентная система  $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$  является основой значительной части современных пьезоэлектрических материалов. Пьезоэлектрические свойства системы ЦТС в значительной мере зависят от величины соотношения  $Zr/Ti$  в твёрдом растворе [3–5]. Таким образом, контролирование стехиометрического состава сегнетоэлектрических плёнок ЦТС является одной из основных задач при исследовании свойств сегнетоэлектрических материалов.

Использование интегральной технологии микроэлектроники, позволяет формировать в одном процессе и функциональные элементы на основе сегнетоэлектрических плёнок и устройства обработки сигналов. В связи с этим более перспективными являются вакуумные методы получения тонких сегнетоэлектрических плёнок. Здесь с одной стороны, обеспечивается возможность управления характеристиками пленки за счет изменения температуры подложки, скорости осаждения, состава среды и других технологических параметров, а с другой – многообразие режимов и приемов получения слоев позволяет решить проблему технологической совместимости формирования многослойных структур [6–8].

Очевидно, что электрофизические свойства сегнетоэлектрических плёнок главным образом зависят от структурных свойств (морфологии поверхности, кристалличности, плотности, кристаллографической ориентации и т.д.), которые в свою очередь зависят от технологических параметров формирования плёнок. Проведение структурных исследований образцов сегнетоэлектрических плёнок позволяет подобрать оптимальные режимы формирования сегнетоэлектрических плёнок ЦТС. Оптимальными электрофизическими параметрами обладают сегнетоэлектрические плёнки, шероховатости поверхности которых не превышает 35 нм [9–11].

Таким образом, целью данной работы является исследование морфологии поверхности и выявление зависимости ее параметров от режимов формирования сегнетоэлектрических плёнок цирконата-титаната свинца (ЦТС), а также исследование изменения стехиометрического состава компонентов мишени в процессе формирования тонких плёнок.

**Методика исследования.** Образцы сегнетоэлектрических плёнок ЦТС были получены методом высокочастотного реактивного распыления на установке «Плазма 80-СЭ» [12]. Стехиометрический состав мишени описывается выражением  $Pb(Ti_xZr_{1-x})O_3$ . Плёнки формировались на кремниевые пластины марки КЭФ-4,5, кристаллографической ориентации (111) и толщиной 200 мкм. Поверхность кремниевых подложек была окислена [13].

Исследование морфологии поверхности образцов плёнок ЦТС проводили в Научно-образовательном центре «Нанотехнологии» Южного федерального университета методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) [14] на зондовой нанолaborатории Ntegra (NT-MDT, Россия) в областях размером  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup> в полуконтактном режиме.

Из литературы известно, что при стехиометрический состав сегнетоэлектрических плёнок, формируемых методом ВЧ-реактивного распыления, повторяет стехиометрический состав мишени [12]. Исследования химического и фазового составов методом РФЭС проводились на рентгеновском фотоэлектронном спектрометре системы «K-Alpha» лаборатории кафедры физики конденсированного состояния Кабардино-Балкарского государственного университету (КБГУ). Данный прибор представляет из себя компактную, полностью интегрированную сис-

тему, работу которой полностью контролирует компьютер с программой Advantage. В качестве источника рентгеновского излучения используется  $K\alpha_{12}$ -линия Al ( $h\nu = 1486,6$  эВ). Вакуум в камере анализатора, во время проведения эксперимента, был не хуже  $2,5 \times 10^{-9}$  мбар.

**Результаты и обсуждение.**

**Исследование морфологии поверхности полученных пленок ЦТС.** Морфология поверхности исследуемых образцов была обработана по методу вложения Такенса в областях размером  $5 \times 5$  мкм<sup>2</sup>. Для анализа морфологии поверхности были выбраны образцы, технологические параметры формирования которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Технологические параметры и параметры морфологии поверхности сегнетоэлектрических пленок ЦТС на окисленных кремниевых подложках**

№	t, мин	N <sub>пд</sub> , Вт	P, Top	D <sub>f</sub>	K	R <sub>q</sub> , нм
1	1	270	0,51	2,06	1,01	0,9
2	5	270	0,51	2,12	1,02	1,5
3	10	270	0,51	2,29	1,06	8,5
4	30	270	0,51	2,43	1,08	10,8
5	30	290	0,51	2,51	1,21	25
6	30	290	0,4	2,51	1,16	22,1
7	30	290	0,6	2,56	1,15	26,1
8	30	300	0,51	2,52	1,19	26,7
9	60	290	0,51	2,57	1,22	28,8
10	120	290	0,51	2,61	1,3	36,6

Статистические параметры морфологии поверхности определялись с помощью программы Gwyddion. На рис. 1 представлены изображения, полученные с помощью АСМ – измерений, морфологии поверхности сегнетоэлектрических пленок ЦТС на окисленных кремниевых подложках. Проведенные исследования показали, что применение различных технологических режимов формирования сегнетоэлектрической пленки ЦТС приводит к существенному изменению морфологии их поверхности.

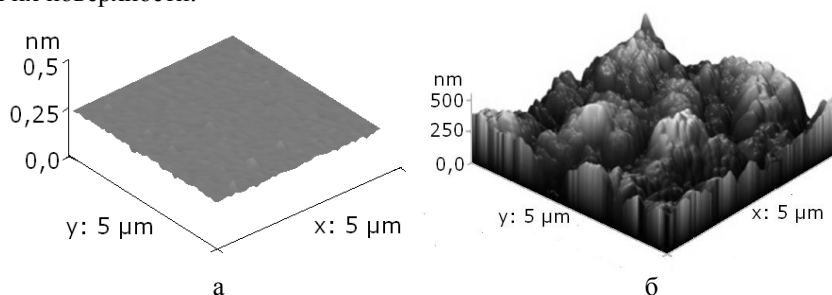


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности сегнетоэлектрических пленок ЦТС полученных при различных технологических условиях (табл. 1): а) №1, б) №10.

При помощи программы Gwyddion рассчитана фрактальная размерность (D<sub>f</sub>). С использованием программы были обработаны 65536 точек изображения поверхности каждого образца для построения функции. Морфология поверхности пленок отражает процессы, протекающие при формировании структуры материала, а ее геометрические особенности отображает величина фрактальной размерности D<sub>f</sub>. Фрактальная размерность D<sub>f</sub> позволяет отличать системы, характеризующиеся

сложным хаотическим и одновременно детерминированным поведением от систем с чисто случайным поведением. Программа Gwyddion реализует различные виды фрактального анализа: триангуляции, метод спектра мощности, метод подсчёта кубов и вариационный [15, 16]. Результаты расчётов фрактальной размерности, полученные методом триангуляции, оказались наиболее близкими к среднему арифметическому значению  $D_f$ , рассчитанных по четырём методам. Также в программе Gwyddion были рассчитаны площадь поверхности и коэффициент увеличения площади поверхности  $K$ , как отношение площади поверхности к площади проекции.

В результате вычислений значения фрактальной размерности  $D_f$  фрактальной поверхности ЦТС получаются равными от 2,06 до 2,61 (табл. 1). Интерпретация фрактальной размерности  $D_f$  заключается в том, что исследуемые поверхности сегнетоэлектрических плёнок ЦТС на окисленных кремниевых подложках, судя из таблицы 3.1, при времени формирования до 10 мин близки к двумерным структурам ( $D_f = 2,06-2,12$ ), а после – к трёхмерным ( $D_f = 2,29-2,61$ ) [17]. Это подтверждает предположение о том, что рост плёночных структур ЦТС происходит по слоисто-остравковому механизму.

Реальная поверхность состоит из беспорядочно расположенных выступов и впадин. Исследование АСМ является одним из основных методов измерения шероховатости [18]. Среднеквадратичный параметр шероховатости поверхности ( $R_q$ ) описывает отклонения реальных поверхностей от номинально гладких и определяется по формуле:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |Z^2(x_i, y_j)|}, \quad (1)$$

где  $x$  и  $y$  – длина и ширина образца размером, содержащий  $N \times M$  точек,  $i = 0, 1 \dots M$ ,  $j = 0, 1 \dots N$ ,  $Z$  – расстояние от точки профиля до средней линии.

Значения среднеквадратичный параметр шероховатости поверхности для различных образцов варьировались в диапазоне 0,9–36,6 нм, которые представлены в таб. 1. Данные таблицы показывают, что после 60 мин формирования сегнетоэлектрических плёнок происходит резкое увеличение шероховатости.

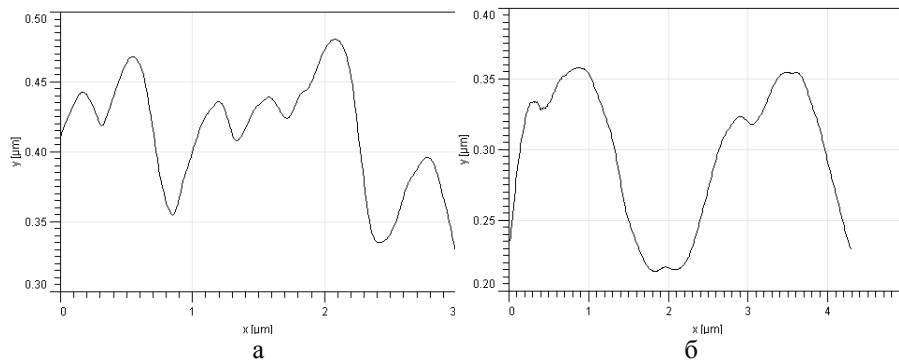


Рис. 2. Профилограммы образцов сегнетоэлектрических плёнок ЦТС сформированных на окисленных кремниевых пластинах при технологических параметрах: а –  $t=60$  мин,  $P=0,51$ ,  $N_{np}=290$ ; б –  $t=30$  мин,  $P=0,6$ ,  $N_{np}=290$

Также с помощью программы Gwyddion были построены профили поверхности сегнетоэлектрических плёнок ЦТС (рис. 3.4). Из профилей поверхностей разных образцов видно то, что данные профили хоть и отличаются друг от друга в зависимости от технологических режимов формирования той или пленки, но тем не менее имеют в своей основе имеют однотипные структуры. В результате можно сделать вывод о том, что процесс формирования сегнетоэлектрических плёнок ЦТС на окисленных крем-

ниевых подложках происходит равномерно по всей поверхности, позволяя получать однородные сегнетоэлектрические пленки ЦТС. Аналогичные периодически повторяющиеся структуры были получены и при использовании других методов формирования сегнетоэлектрических структур [7, 8], предположительно это является с отражением доменной структуры сегнетоэлектрических пленок ЦТС.

**Исследование химического состава полученных пленок ЦТС.** Работы со всеми образцами проводились при комнатной температуре 20 °С. Использовалась электронная пушка для нейтрализации заряда. Спектры снимались без предварительной очистки поверхности образца. Сначала был снят обзорный спектр выбранной точки на образце, и получены интегральные значения концентраций компонентов, составляющих поверхностный слой пленки. Сечение пучка было выбрано 400 мкм для улучшения отношения сигнал-шум на детекторах электронов. Обзорный спектр был снят методом развертки по энергиям в режиме фиксированной энергии пропускания полу-сферического анализатора (PassEnergy ~ 200eV). Сканирование производилось в диапазоне 0÷1400 эВ с помощью рентгеновского монохроматора с шагом 1 эВ. В таблице, прилагаемой к обзорному спектру, приведены интегральные концентрации элементов на поверхности пленки (Atomic %), обнаруженных и вычисленных при обзорном сканировании. В таблице также приводятся энергия пика элемента, ширина на полувысоте (FWHM), площадь под кривой с вычетом фоновой составляющей (Area (P) CPS.eV) и энергия пика (Peak BE) [19, 20].

В ходе исследований пленок были сняты спектры высокого разрешения основных составляющих компонентов полученных в обзорном спектре: O, Ti, Zr и Pb. Сканирование производилось с шагом 0,1 эВ и производилось усреднение кривой при многократном повторении (5 сканирований). Энергия пропускания при снятии спектров отдельных элементов выбиралась 50 эВ. Фоновая составляющая вычиталась методом Ширли [21].

Титан в основном находится в состоянии  $Ti^{4+}$ , что подтверждается энергией связи составляющей пика на 458,5 эВ, а также, величиной параметра Вагнера  $\alpha' = EK + EB = 414 \text{ eV} + 458,5 \text{ eV} = 872,5 \text{ эВ}$ . Остальная часть атомов титана представлена в состоянии  $Ti^{2+}$ , которому отвечает пик с энергией 456,48 эВ. Спектральный анализ состояний титана представлен на рис. 3. В табл. 2. представлен количественный анализ состояний титана в исследованной пленке ЦТС.

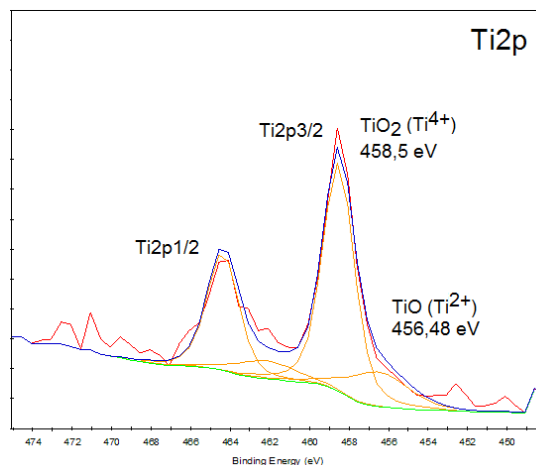


Рис. 3. Спектральный анализ состояний титана в пленке ЦТС.

Цирконию соответствует пик дублета  $Zr3d5$  с энергией 182,4 эВ, что соответствует состоянию  $Zr^{4+}$ . Полуширина, на полувисоте данного пика равная 1,6 эВ, говорит о том, что нахождение атомов циркония в металлическом, или в других оксидных состояниях маловероятно и состав оксида циркония по всей вероятности стехиометричен. Спектральный анализ состояний циркония представлен на рис. 4.

Таблица 2

Количественный анализ состояний титана в исследованной пленке ЦТС

Name	Start BE	Peak BE	End BE	Height CPS	FWHM eV	Area (P) CPS.eV	Atomic %	Q
$Ti^{4+}$	474.58	458.53	448.58	3812.57	1.906	8506.03	78.10	1
$Ti^{2+}$	474.58	456.48	448.58	583.73	3.515	2388.06	21.90	1

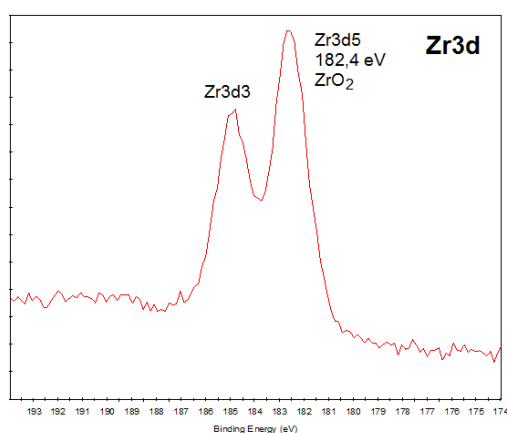


Рис. 4. Спектральный анализ состояний циркония в пленке ЦТС

Из энергий связи пиков дублета линии  $Pb4f$  можно с уверенностью сказать, что более 80 % атомов свинца окислена и находится в состоянии  $Pb^{2+}$  с энергией связи пика 138,52 эВ. Незначительная часть свинца находится в металлическом виде с пиком на 136,86 эВ. Спектральный анализ состояний свинца представлен на рис. 5. В табл. 3 представлен количественный анализ состояний свинца в исследованной пленке ЦТС.

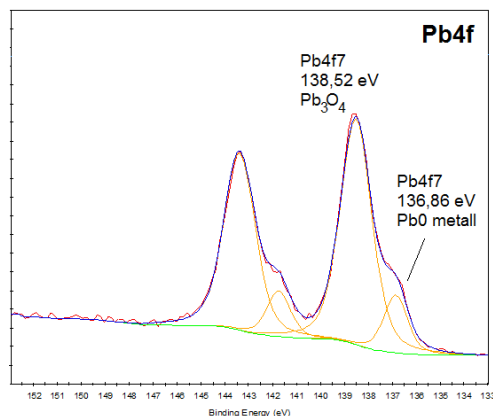


Рис. 5. Спектральный анализ состояний свинца в пленке ЦТС

Таблица 3

**Количественный анализ состояний титана в исследованной пленке ЦТС**

Name	Start BE	Peak BE	End BE	Height CPS	FWHM eV	Area (P) CPS.eV	Atomic %	Q
Pb <sup>2+</sup>	152.93	138.52	132.98	12085.69	1.562	22095.85	83.72	1
Pb	152.93	136.86	132.98	3084.43	1.191	4301.25	16.28	1

Две интенсивные линии кислорода 530,36 и 532,62 эВ соответствуют кислороду в оксидах металлов (54,84 %) и кислороду в соединении О-Н в составе адсорбированных на поверхности пленки молекул воды. Спектральный анализ состояний кислорода представлен на рис. 6.

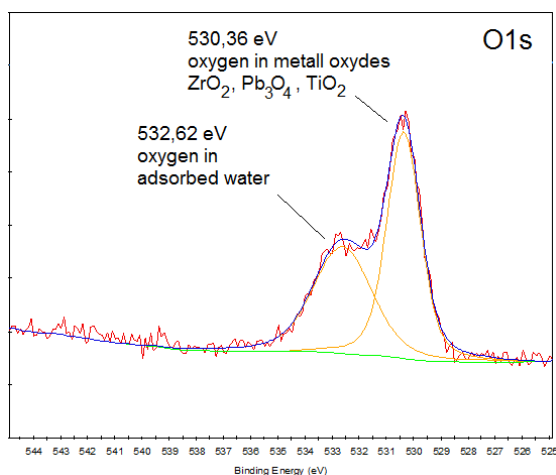


Рис. 6. Спектральный анализ состояний кислорода в пленке ЦТС

На рис. 7 представлен обзорный спектр, снятый с поверхности пленки ЦТС. В табл. 4 представлены результаты количественного анализа основных элементов, входящих в состав ЦТС.

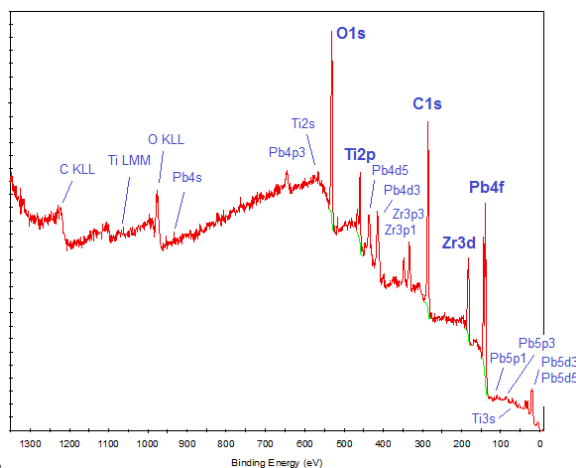


Рис. 7. Обзорный спектр, снятый с поверхности сегнетоэлектрической пленки ЦТС

Таблица 4

## Количественный анализ основных элементов, входящих в состав ЦТС

Name	Start BE	Peak BE	End BE	Height CPS	FWHM eV	Area (P) CPS.eV	Atomic %	Q
Pb4f	148.08	138.85	131.58	61447.63	3.313	374830.34	8.65	1
O1s	539.08	531.31	523.08	68305.70	3.948	291486.18	69.1	1
Ti2p	468.58	458.92	450.08	25407.46	3.293	140420.94	10.95	1
Zr3d	194.08	183.55	174.58	29609.75	4.479	148541.01	11.3	1

Химическая формула ЦТС –  $Pb(Ti_{1-x},Zr_x)O_3$ . Таким образом, определение стехиометрического состава сводится к количественному (процентному) определению соотношения пары элементов Ti/Zr. Из табл. 4 видно, что количественное соотношение Ti/Zr 10,95 %/11,3 %, таким образом, стехиометрические коэффициенты Ti и Zr 0,49 и 0,51 соответственно. Это говорит о том, что химическая формула исследованных образцов сегнетоэлектрических пленок ЦТС на окисленных кремниевых подложках выглядит следующим образом:  $Pb(Ti_{0,49},Zr_{0,51})O_3$ .

**Заключение.** В ходе исследования были получены асм-изображения поверхности сегнетоэлектрических пленок ЦТС. Получены графики функции распределения высоты профиля поверхности  $\rho=f(h)$  пленок. Рассчитаны значения фрактальной размерности  $D_f$  фрактальной поверхности ЦТС получаются равными от 2,06 до 2,61, которые показывают, что при времени формирования до 10 мин пленки ЦТС близки к двумерным структурам ( $D_f = 2,06-2,12$ ), а после – к трехмерным ( $D_f = 2,29-2,61$ ). Также рассчитаны значения среднеквадратичного параметра шероховатости поверхности ( $R_q$ ) различных образцов пленок ЦТС, которые показывают, что после 60 мин формирования сегнетоэлектрических пленок происходит резкое увеличение шероховатости ( $>30$ нм). Таким образом, оптимальным временем формирования сегнетоэлектрических пленок ЦТС методом ВЧ-реактивного распыления является время не более 60 мин. Из профилей поверхностей разных образцов видно, что пленки имеют в своей основе однотипные структуры, что связано с доменной структурой образцов.

Исследования показали, что химическая формула исследованных образцов сегнетоэлектрических пленок ЦТС на окисленных кремниевых подложках выглядит следующим образом:  $Pb(Ti_{0,49},Zr_{0,51})O_3$ . Таким образом в ходе вч-реактивного распыления с парциальным давлением кислорода в камере, лежащим в диапазоне 0,4-0,6 Торр, возможен дрейф стехиометрического состава мишени на 1–2 %. Данное смещение, судя из литературных источников [1], существенно не повлияет на электрофизические и структурные свойства сегнетоэлектрических пленок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Третьяков Ю.Д., Лепис Х. Химия и технология твердофазных материалов. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 256 с.
2. Izyumskaya N., Alivov Y.-I., Cho S.-J., Morko H., Lee H., Kang Y.-S. Processing, structure, properties, and applications of PZT thin films // Critical Reviews in Solid State and-Materials Sciences. – 2007. – Vol. 32. – P. 111-202.
3. Woodward D.I., Knudsen J., Reaney I.M. Review of crystal and domain structures in the  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$  solid solution // Phys.Rev. B. – 2005. – Vol. 72. – P. 104-110.
4. Shirane B.G., Suzuki K., Takeda A. Phase-transitions in solid solutions of  $PbZrO_3$  and  $PbTiO_3$  (II). X raystudy // J. Phys. Soc. Japan. – 1952. – Vol. 7. – P. 12-18.
5. Богомолов А.А., Сергеева О.Н., Киселев Д.А., Каптелов Е.Ю., Пронин И.П. Особенности пирозлектрических свойств тонких пленок цирконата-титаната свинца, содержащих избыток оксида свинца // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып. 11. – С. 42-50.



6. *Losego M.D., Jimison L.H., Ihlefeld J.F., Maria J.-P.* Ferroelectric response from lead zirconate titanate thin films prepared directly on low-resistivity copper substrates // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 86. – P. 172-906.
7. *Polla D.L.* Microelectromechanical systems based ferroelectric thin films // *Microelectronic Engineering.* – 1995. – Vol. 29. – P. 51-58.
8. *Whatmore R.W.* Ferroelectrics, microsystems and nanotechnology // *Ferroelectrics.* – 1999. – Vol. 225. – P. 179-192.
9. *Сенкевич С.В.* Особенности кристаллизации и сегнетоэлектрических свойств тонких поликристаллических пленок цирконата-титаната свинца, полученных двухстадийным методом: дис. ... канд. тех. наук (01.04.07). – Санкт-Петербург, 2011. – 166 с.
10. *Клето Г.И., Мартынюк Я.В., Савчук А.И., Стребежев В.Н., Обедзинский Ю.К.* Наноразмерные сегнетоэлектрические пленки для интегральных запоминающих элементов // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии.* – 2009. – Т. 7, № 1. – С. 65-71.
11. *Сенкевич С.В.* Применение атомно-силовой микроскопии для контроля поверхности тонких пленок с целью оптимизации процессов их формирования // *Материалы V Международной научно-технической школы-конференции.* – 2008. – С. 160-163.
12. *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.
13. *Коваленко Д.А., Петров В.В., Клиндухов В.Г.* Разработка датчика динамических деформаций на основе сегнетоэлектрических пленок цирконата-титаната свинца // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 4 (153). – С. 184-190.
14. *Galiyarova N.M., Bey A.B.* Fractal microstructure, dielectric & conductivity spectra of PZT piezoceramics // *Physics of Electronic Materials (2nd International Conference Proceedings).* Kaluga May 24-27. 2005. – Vol. 2. – P. 80-83.
15. *Van Put A., Vertes A., Wegrynek D., Treiger B., Van Grieken R.* Quantitative characterization of individual particle surfaces by fractal analysis of scanning electron microscope images // *Fresenius J Analen Chem.* – 1994. – P. 440-447.
16. *Zahn W., Zösch A.* The dependence of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy // *Fresenius J Analen Chem.* – 1999. – P. 168-172.
17. *Торхов Н.А.* Формирование структуры собственного оксида на поверхности n-GaAs при естественном окислении на воздухе // *Физика и техника полупроводников.* – 2003. – Т. 37. – Вып. 10. – С. 1205-1213.
18. *Bony A.* Study of nano-roughness for silica-on-silicon technology by Scanning Electron Microscopy and light scattering // *Doctorate degree thesis, Université Louis Pasteur,* 2004.
19. *Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy / ed. J.T.Grant, D.Briggs // IM Publications,* 2003.
20. *Crist B.V.* Handbooks of monochromatic XPS spectra. Vol. 2. Commercially pure binary oxides and a few common carbonates and hydroxides. / Ed by B.V. Crist // *XPS International LLC,* 2005.
21. *Shirley D.A.* High-Resolution X-Ray Photoemission Spectrum of the Valence Bands of Gold // *Phys. Rev. B.* – 1972. – Vol. 5, No. 12. – P. 4709-4714.

## REFERENCES

1. *Tret'yakov Yu.D., Lepis Kh.* Khimiya i tekhnologiya tverdogaznykh materialov [Chemistry and technology of solid state materials]. Moscow: Izd-vo MGU, 1985, 256 p.
2. *Izyumskaya N., Alivov Y.-I., Cho S.-J., Morko H., Lee H., Kang Y.-S.* Processing, structure, properties, and applications of PZT thin films, *Critical Reviews in Solid State and-Materials Sciences,* 2007, Vol. 32, pp. 111-202.
3. *Woodward D.I., Knudsen J., Reaney I.M.* Review of crystal and domain structures in the  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$  solid solution, *Phys.Rev. B,* 2005, Vol. 72, pp. 104-110.
4. *Shirane B.G., Suzuki K., Takeda A.* Phase-transitions in solid solutions of  $PbZrO_3$  and  $PbTiO_3$  (II). X ray study, *J. Phys. Soc. Japan,* 1952, Vol. 7, pp. 12-18.
5. *Bogomolov A.A., Sergeeva O.H., Kiselev D.A., Kaptelov E.Yu., Pronin I.P.* Osobennosti piroelektricheskikh svoystv tonkikh plenok tsirkonata-titanata svintsya, sodержashchikh izbytok oksida svintsya [Features of the pyroelectric properties of thin films of lead zirconate titanate containing an excess of oxide of lead], *Pis'ma v ZhTF [Technical Physics Letters],* 2005, Vol. 31, Issue 11, pp. 42-50.

6. Losego M.D., Jimison L.H., Ihlefeld J.F., Maria J.-P. Ferroelectric response from lead zirconate titanate thin films prepared directly on low-resistivity copper substrates, *Appl. Phys. Lett.*, 2005, Vol. 86, pp. 172-906.
7. Polla D.L. Microelectromechanical systems based ferroelectric thin films, *Microelectronic Engineering*, 1995, Vol. 29, pp. 51-58.
8. Whatmore R.W. Ferroelectrics, microsystems and nanotechnology, *Ferroelectrics*, 1999, Vol. 225, pp. 179-192.
9. Senkevich S.V. Osobennosti kristallizatsii i segnetoelektricheskikh svoystv tonkikh polikristallicheskikh plenok tsirkonata-titanata svintsya, poluchennykh dvukhstadiynym metodom: dis. kand. tekhn. nauk [Features of crystallization and ferroelectric properties of thin polycrystalline films of lead zirconate-titanate obtained by two-stage method. Cand. of eng. sc. diss] (01.04.07). Sankt-Peterburg, 2011, 166 p.
10. Kleto G.I., Martynyuk Ya.V., Savchuk A.I., Strebezhev V.N., Obedzinskiy Yu.K. Nano-razmernye segnetoelektricheskie plenki dlya integral'nykh zapominayushchikh elementov [Nanoscale ferroelectric films for integrated storage elements], *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotekhnologii* [Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotekhnologii], 2009, Vol. 7, No. 1, pp. 65-71.
11. Senkevich S.V. Primenenie atomno-silovoy mikroskopii dlya kontrolya poverkhnosti tonkikh plenok s tsel'yu optimizatsii protsessov ikh formirovaniya [The use of atomic force microscopy to monitor the surface of thin films to optimize the processes of their formation], *Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy shkoly-konferentsii* [Proceedings of the V International scientific school-conference], 2008, pp. 160-163.
12. Mukhortov V.M., Yuzyuk Yu.I. Geterostruktury na osnove nanorazmernykh segnetoelektricheskikh plenok: poluchenie, svoystva i primeneniye [Heterostructures based on nanoscale ferroelectric films: production, properties and application]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTS RAN, 2008, 224 p.
13. Kovalenko D.A., Petrov V.V., Klindukhov V.G. Razrabotka datchika dinamicheskikh deformatsiy na osnove segnetoelektricheskikh plenok tsirkonata-titanata svintsya [Design of the gauge of dynamic deformations on the basis of ferroelectric films tsirkonattitanata of lead], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 4 (153), pp. 184-190.
14. Galiyarova N.M., Bey A.B. Fractal microstructure, dielectric & conductivity spectra of PZT piezoceramics, *Physics of Electronic Materials (2nd International Conference Proceedings). Kaluga May 24-27. 2005*, Vol. 2, pp. 80-83.
15. Van Put A., Vertes A., Wegrynek D., Treiger B., Van Grieken R. Quantitative characterization of individual particle surfaces by fractal analysis of scanning electron microscope images, *Fresenius J Analen Chem.*, 1994, pp. 440-447.
16. Zahn W., Zösch A. The dependance of fractal dimension on measuring conditions of scanning probe microscopy, *Fresenius J Analen Chem.*, 1999, pp. 168-172.
17. Torkhov N.A. Formirovaniye struktury sobstvennogo oksida na poverkhnosti n-GaAs pri estestvennom okislenii na vozdukh [The formation of the structure of native oxide on the surface of n-GaAs under natural oxidation in air], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductors], 2003, Vol. 37, Issue 10, pp. 1205-1213.
18. Bony A. Study of nano-roughness for silica-on-silicon technology by Scanning Electron Microscopy and light scattering, *Doctorate degree thesis, Université Louis Pasteur, 2004*.
19. *Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy*, Ed. J.T. Grant, D. Briggs, IM Publications, 2003.
20. Crist B.V. Handbooks of monochromatic XPS spectra. Vol. 2. Commercially pure binary oxides and a few common carbonates and hydroxides, Ed by B.V. Crist. XPS International LLC, 2005.
21. Shirley D.A. High-Resolution X-Ray Photoemission Spectrum of the Valence Bands of Gold, *Phys. Rev. B*, 1972, Vol. 5, No. 12, pp. 4709-4714.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Н. Белов.

**Коваленко Дмитрий Александрович** – Южный федеральный университет; e-mail: kovalenko.mitya@yandex.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; кафедра техносферной безопасности, экологии и химии; ведущий инженер.

**Петров Виктор Владимирович** – e-mail: vvp2005@inbox.ru; директор Института управления в экономических, экологических и социальных системах; д.т.н.; профессор.

**Kovalenko Dmitry Alexandrovich** – Southern Federal University; e-mail: kovalenko.mitya@yandex.ru; 2, Chekhova street, Taganrog, 347900, Russia; the department of technosphere safety, ecology and chemistry; leading engineer.

**Petrov Victor Vladimirovich** – e-mail: vvp2005@inbox.ru; the director of Institute of management in economic, ecological and social systems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 541.13:621.382.323.001.57

**Л.П. Милешко, Ю.Н. Варзарев, А.В. Махаринец**

### **МОДЕЛЬ МОП ТРАНЗИСТОРА С ФОСФАТНОЙ АНОДНОЙ ОКСИДНОЙ ПЛЕНКОЙ КРЕМНИЯ В КАЧЕСТВЕ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА**

*Целью данной работы являлось построение и проверка математической модели МОП транзистора со встроенным каналом n-типа, применяемого в радиотехнических цепях и изготовленного с использованием одностадийной диффузии фосфора в кремний из ФАОП с различной величиной легирования. Задачей данного исследования было получение модели, которая даст приемлемое совпадение с экспериментальными данными, и расчет параметров транзистора по этой модели. Новизной данной работы является использование математической модели, разработанной для МОП транзисторов с индуцированным каналом, для описания работы МОП транзисторов со встроенным каналом, после ее небольшой модификации. Произведенная проверка подтвердила возможность такого использования. Построена модель МОП транзистора со встроенным каналом n-типа, созданного при помощи диффузии фосфора в кремний из анодных оксидных пленок. Рассчитаны параметры полевого транзистора: удельная емкость подзатворного диэлектрика, удельная крутизна и ток стока. Показано, что данная модель дает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. Вследствие минимизации операций техпроцесса изготовления таких транзисторов, ожидается повышенная повторяемость их параметров, пониженный коэффициент шума (минимальное количество высокотемпературных обработок позволяет снизить количество дефектов структуры кремния). Предложенный вариант модели может быть использован для изготовления транзисторов для работы в радиотехнических цепях, особенно в режиме усиления малых сигналов, например, в малошумящих усилителях. В этом случае региональность модели не играет роли, поскольку в таких схемах транзисторы не выходят из режима насыщения, а простота модели позволит быстро получить результат.*

*Модель МОП транзистора; подзатворный диэлектрик; фосфатные анодные оксидные пленки кремния*

**L.P. Mileshko, Yu.N. Varzaryov, A.V. Makharinets**

### **MODEL OF MOSFET WITH PHOSPHATE ANODIC OXIDE SILICON FILM AS A GATE DIELECTRIC**

*The purpose of this study is construction and verification of mathematical model of MOSFET with integrated n-type channel, than can be used in radio circuits, and is manufactured using a one-step diffusion of phosphorus into the silicon from phosphoric anodic oxide film with different values of doping. The objective of this study was to obtain a model that will give a reasonable agreement with the experimental data and to calculate parameters of transistor according to this model. The novelty of this work is the use of a mathematical model developed for the MOS transistors with induced channel, to describe the work of MOSFETs with integrated channel, after a slight modification. Examination confirmed the possibility of such use. A model of the MOSFET with integrated n-channel created by diffusion of phosphorus in the silicon from anodic oxide films*