

УДК 537.333

Н. М. Галиярова, А. Б. Стреляева

СТРУКТУРА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНАТА-ТИТАНАТА СВИНЦА НА МЕЗО-, МИКРО- И НАНОУРОВНЯХ

Микроструктура пьезокерамики ЦТСНВ-1 (твердых растворов титаната-цирконата свинца с примесями натрия и висмута) изучена в области морфотропной фазовой границы тетрагональной и ромбоэдрической фаз. Исследования выполнены методами оптической и атомно-силовой микроскопии (АСМ). На основе анализа оптических изображений определены размеры и параметры формы зерен и пор, изучены их функции распределения. Выявлены корреляционные зависимости между площадями и периметрами, свидетельствующие о статистической подобии микроструктуры. Определены локальные и глобальные фрактальные размерности. Полученные значения значительно превышают топологическую размерность линии вследствие изломанности границ. Глобальная фрактальная размерность ЦТСНВ-1 соответствует модели треугольной салфетки Серпинского. Шероховатость поверхности зерен и дна пор, изломанность границ, доменная структура зерна изучены методами АСМ. Выявлены детали рельефа дна пор, измерена глубина межзеренных границ. Визуализирована доменная структура зерен со средней шириной доменов порядка 100 нм. На дне пор обнаружены зародыши доменов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сегнетоэлектрики, пьезокерамика, морфотропная фазовая граница, титанат-цирконат свинца (ЦТС), микроструктура, фракталы, зерна, домены, фрактальные размерности.

The microstructure of PZTNB-1 piezoceramics (the lead-zirconate-titanate solid solutions doped with sodium and bismuth) has been studied in the morphotropic phase boundary region of tetragonal and rhombohedral phases. The research has been carried out with the help of optic and atomic-force microscopy (AFM) methods. On the basis of the analysis of optic images the sizes and shape parameters of grains and pores were determined and their distribution functions were studied. The correlation dependences between squares and perimeters were revealed. They justify statistic similarity of the microstructure. Local and global fractal dimensionalities of grain boundaries were determined. The received values considerably exceed topological dimension of a line due to fracture of the boundaries. The global fractal dimensionality of PZTNB-1 corresponds to the model of triangular Serpinsky gasket. Roughness of grains surface and pores' bottom, fracture of rugged boundaries, domain structure of the grains have been studied by AFM method. The details of the relief of pores' bottom were revealed, the depth of grain interfaces was evaluated. The domain structure of grains with average width of domains about 100 nm has been visualized. The domain nucleuses were found on the pores' bottom.

К e y w o r d s: ferroelectrics, piezoceramics, morphotropic phase boundary, lead zirconate-titanate (PZT), microstructure, fractals, grains, domains, fractal dimensionalities.

Сегнетоэлектрическая керамика на основе титаната-цирконата свинца (ЦТС) имеет не только долгую и славную историю применения в электронике и микросистемной технике, но и огромные перспективы в развивающемся направлении компьютерных технологий с использованием элементов сегнетоэлектрической памяти [1, 2]. Модификация состава ЦТС малыми добавками других элементов позволяет получать материалы и устройства с необходимыми свойствами. В частности, исследуемая в настоящей работе сегнето-керамика ЦТСНВ-1 на основе ЦТС с добавками натрия и висмута, модифицированная стронцием, выделяется из других составов ЦТС исклю-

чительно большим пьезоэффектом. Даже небольшие колебания давления, создаваемые, например, тихим звуком, преобразуются пьезоэлектриком в электрический сигнал, особенно большой в ЦТСНВ-1, на чем и основано его применение в тензодатчиках и гидрофонах.

Вопросы практического применения ЦТС-содержащей пьезокерамики оказались тесно связанными с проблемами фундаментальной науки. Именно в керамике ЦТС были впервые открыты концентрационные фазовые переходы (ФП), вызываемые изменением соотношения титана и циркония. Механизмы ФП и изменение фазового состава в диапазоне концентраций, где происходит ФП, называемом морфотропной фазовой границей (МФГ), до настоящего времени находятся в центре внимания исследователей и являются предметом дискуссии [1—6]. В частности, разными методами, в том числе по данным структурного анализа, выявлена роль ближнего порядка [4—6]. Подобно другим ферроикам [7], в керамике ЦТС [8—13] обнаружены фрактальные закономерности в геометрии микроструктуры и макроскопических свойствах. Эти факты имеют отношение к аспектам практического применения, например к проблеме получения экстремальных и стабильных значений электрофизических параметров, требуемых современной электроникой. Сложный состав, затруднения в расшифровке структуры и определении параметров стимулировали продолжение фундаментальных исследований микроструктуры систем ЦТС. В настоящей работе исследование структуры ЦТСНВ-1 проведено на различных уровнях. Структура зерен и пор исследована на мезо- и микро- уровнях методом оптической микроскопии. Детали внутривзеренной структуры и межзеренных границ выявлены на микро- и наноразмерах методами атомно-силовой микроскопии (АСМ).

1. *Данные оптической микроскопии (мезо- и микроуровни).* Микроструктура пьезокерамики ЦТСНВ-1 исследована при увеличениях от $\times 950$ до $\times 4000$ с помощью оптических микроскопов NeoPhot-21, MMR-2R и Olympus DP-12. Определялись размеры и форма зерен и пор на ее поверхности, параметры формы, функции распределения параметров.

При увеличении $\times 950$ выявлена зеренная структура поверхности и поверхностная пористость. Структура поверхности представлена, в основном, конгломератами зерен. Отдельные зерна видны внутри пор и на поверхности конгломератов (рис. 1, *а*), но форма их не выявлена. При увеличении $\times 1250$ хорошо видны отдельные зерна, имеющие форму сглаженных многоугольников (рис. 1, *б*). Зеренная структура на разных участках поверхности в обоих случаях выглядит примерно одинаково и представляет интерес с точки зрения фрактального анализа.

Действительно, по разным полям зрения и при разных увеличениях выявлено статистическое подобие элементов микроструктуры. Подобие выражается степенной зависимостью между площадями S и периметрами P в соответствии с формулой Мандельброта [14]:

$$P = c\delta^{1-D} S^{D'/2}, \quad (1)$$

где δ — масштаб эталона измерения; D' — локальная и D — глобальная фрактальная размерность; c — коэффициент пропорциональности.

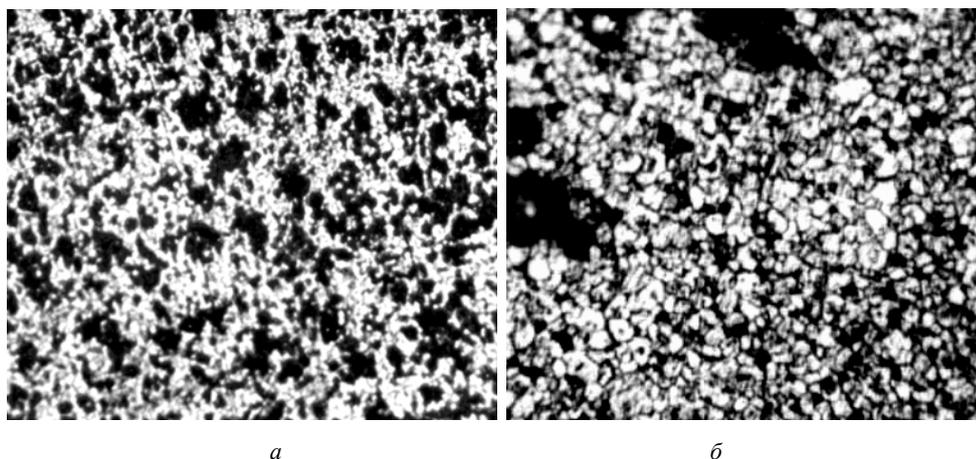


Рис. 1. Поверхность пьезокерамики ЦТСНВ-1 при увеличениях $\times 950$ (а) и $\times 1250$ (б)

Периметры и площади зерен и пор выявлены программными средствами и измерены в пикселях с заданным масштабным множителем. По зависимости $S(P)$ [1] определялась локальная фрактальная размерность.

Для целей сравнения аналогичное исследование выполнено для пьезокерамики ЦТС-19, которая, в отличие от ЦТСНВ-1, при комнатной температуре является преимущественно тетрагональной, а ФП в ромбоэдрическую фазу переходит при температуре более низкой, чем в ЦТСНВ-1.

В табл. представлены параметры микроструктуры и фрактальные размерности.

Данные микроструктурного анализа пьезокерамик ЦТСНВ-1 и ЦТС-19 при разных увеличениях

	Параметры	ЦТСНВ-1		ЦТС-19	
		Зерна	Поры	Зерна	Поры
1	Средний размер d , мкм	4,05	10,2	4,6	10,2
2	Фрактальная размерность D' ($\times 4000$)	1,601	—	1,443	—
3	Фрактальная размерность D' ($\times 1250$)	1,560	1,245	1,423	1,258
	Фрактальная размерность D' ($\times 950$)	1,344	—	1,380	—
4	Параметр асимметрии $SF = d_{\max}/d_{\min}$ ($\times 950$)	3,257	2,274	3,460	2,412
5	Фактор формы $FF = P^2/4\pi S$ ($\times 950$)	1,396	0,827	1,676	0,741

Размеры пор ЦТСНВ-1 и ЦТС-19 в среднем одинаковы (10,2 мкм), их фрактальные размерности близки ($D' = 1,252 \pm 0,006$).

Средние размеры зерен ЦТСНВ-1 меньше, чем зерна ЦТС-19. Имеются между ними и морфологические различия.

Остановимся на различиях, выявленных при увеличении $\times 950$. Заметно отличаются величины фактора формы $FF = P^2/4\pi S$, равные 1,396 для ЦТСНВ-1 и 1,676 для ЦТС-19. Меньшие значения FF для ЦТСНВ-1 означают, что зерна для этого состава являются более округлыми. Параметры асимметрии SF зерен ЦТСНВ-1 также меньше, чем для ЦТС-19. Меньше

для микроструктуры ЦТСНВ-1 и фрактальная размерность D' , что означает меньшую изрезанность границ зерен в сравнении с ЦТС-19.

Однако по мере увеличения разрешения (до $\times 1250$ и $\times 4000$) локальные фрактальные размерности D' зерен возрастают, и теперь для ЦТСНВ-1 достигаются большие значения, чем для ЦТС-19 (см. табл.). Возрастание D' связано с выявлением деталей структуры, а именно: формы и изрезанности границ зерен и пор (рис. 2, *а*, *б*). На рис. 2, *а* и *б* отчетливо выявлена форма зерен, имеющая вид неправильных многоугольников (полигонов). Такая форма характерна для зерен керамики, полученной методом горячего прессования. Даже визуально можно констатировать большую изрезанность границ зерен ЦТСНВ-1 и степень шероховатости их поверхности, что количественно отражает большая величина фрактальной размерности.

Отметим, что заметный рост фрактальных размерностей D' имеет место в диапазоне от $\times 950$ до $\times 1250$, а при дальнейшем увеличении от $\times 1250$ (рис. 1, *б*) до $\times 4000$ (рис. 2, *а*) величины D' возрастают незначительно (см. табл.). Для ЦТСНВ-1 увеличение D' находится в пределах $D' = 1,58 \pm 0,02$, а для ЦТС-19 — в пределах $D' = 1,43 \pm 0,01$. Небольшой диапазон изменений D' означает, что в этом диапазоне увеличений выявлены все детали микроструктуры, доступные наблюдению, и полученные значения $D = 1,58$ и $1,43$ можно считать глобальными фрактальными размерностями исследованных зеренных структур ЦТСНВ-1 и ЦТС-19.

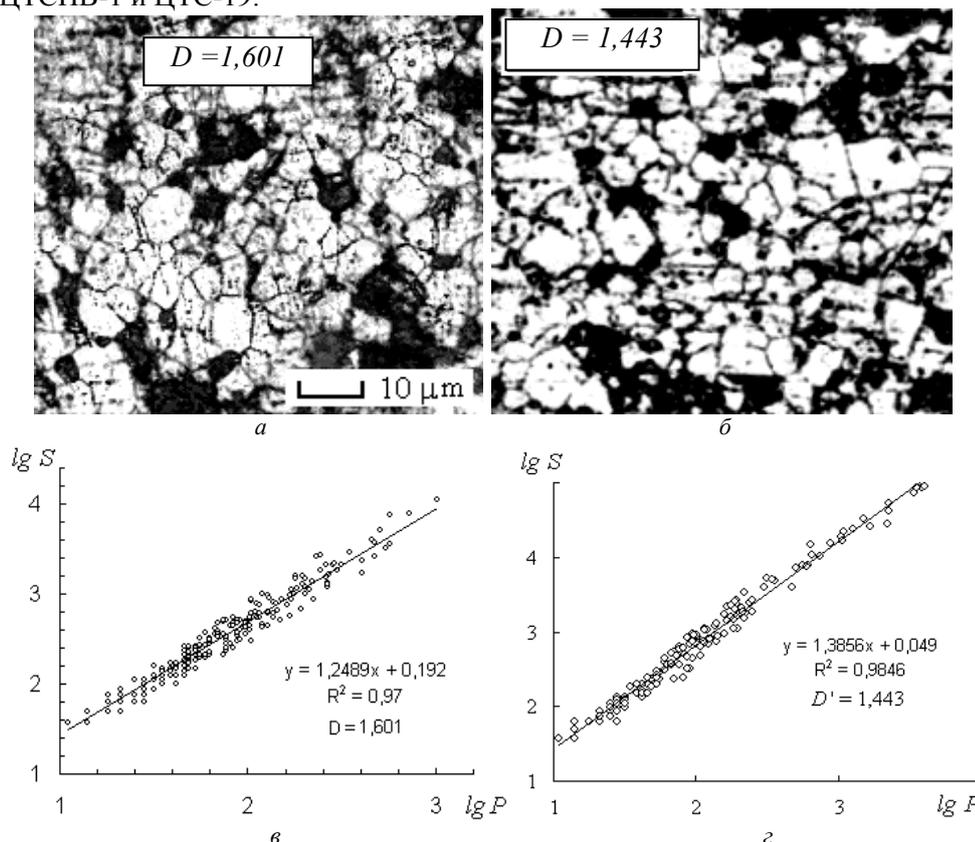


Рис. 2. Зеренная структура пьезокерамики ЦТСНВ-1 (*а*) и ЦТС-19 (*б*) при увеличении $\times 4000$ и соответствующие зависимости между площадями и периметрами в двойном логарифмическом масштабе (*в*, *з*)

Отметим также, что глобальная фрактальная размерность $D = 1,58$, найденная экспериментально для ЦТСНВ-1, равна фрактальной размерности поверхностного геометрического фрактала — салфетки Серпинского 1,5849... Для пор ЦТСНВ-1 и ЦТС-19 экспериментальные значения фрактальных размерностей границ $D' = 1,245$ и $D' = 1,258$ (см. табл.) в пределах погрешности равны размерности фрактальной линии Кох 1,2618...

Представляло интерес сравнить при достигнутом увеличении $\times 4000$ параметры формы зерен выявленных структур. Сначала были исследованы распределения зерен по параметрам формы (рис. 3). Наиболее вероятным значением фактора формы ЦТСНВ-1 и ЦТС-19 оказалось значение фактора формы FF , близкое к единице. Оно выделено на рис. 3 зеленым цветом. Фактор формы $FF = 1$ соответствует зернам круглой формы.

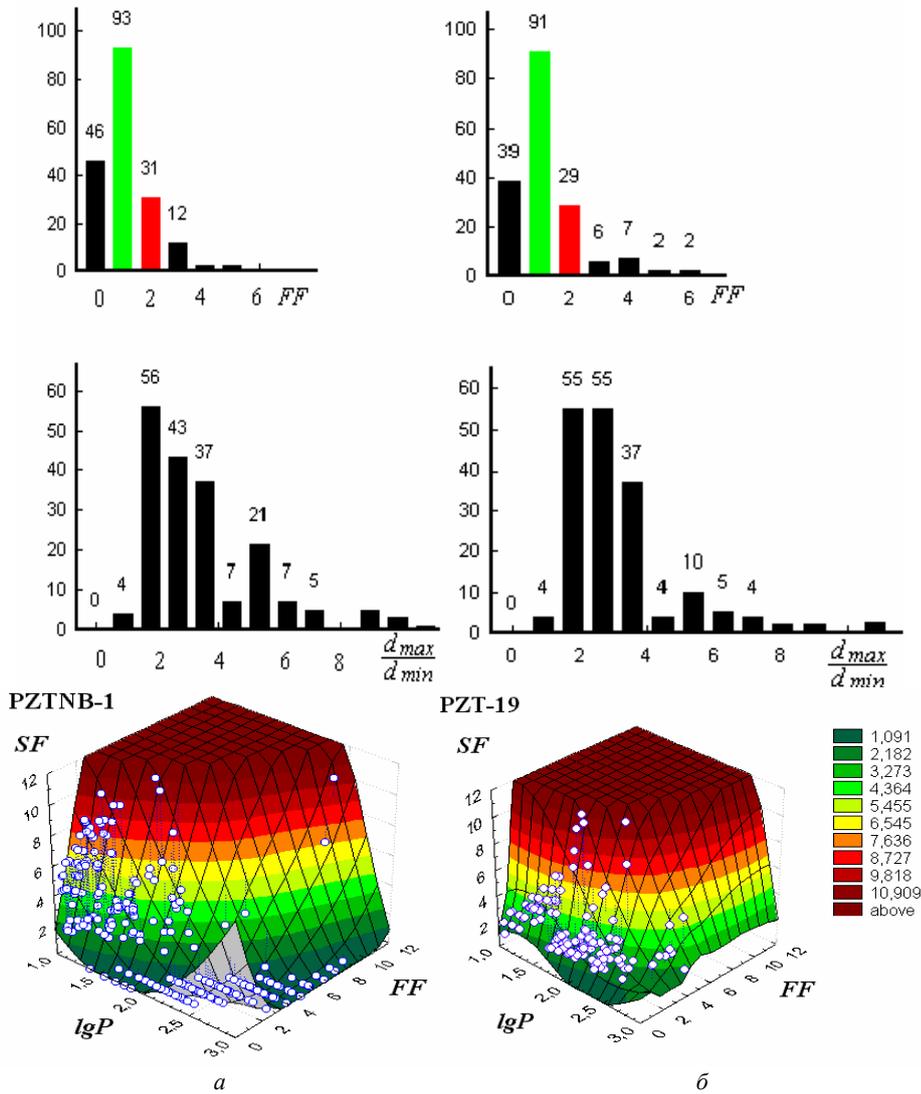


Рис. 3. Распределения факторов формы FF и асимметрии $SF = d_{max}/d_{min}$ (вверху) и сопоставление их с периметрами границ зерен (внизу) пьезокерамик ЦТСНВ-1 (а) и ЦТС-19 (б) для их бинаризованных изображений при увеличении $\times 4000$

Сравнение распределений по параметрам формы и размерам периметров зерен привело к выводу, что края распределений с фактором формы $FF < 1$ на рис. 3 относятся не к зернам, а к мелким дефектам микроструктуры, при этом значения $FF > 4$ относятся к крупным конгломератам зерен. Исключая эти диапазоны, обнаруживаем всего два вероятных значения фактора формы (на рис. 3 они выделены соответственно зеленым и красным цветами): упомянутое значение $FF \sim 1$ для круглых зерен и значение $FF \sim 2$, смысл которого предстояло выяснить. Для этого диапазона получены средние значения $FF = 2,24$ для ЦТСНВ-1 и $FF = 2,17$ для ЦТС-19.

Дальнейший анализ показал, что полученные значения близки к факторам формы тех же геометрических фракталов — треугольной салфетки Серпинского и снежинки Кох первого поколения, для которых $FF = 2,20$. Факты наблюдаемых совпадений позволяют предположить общие причины образования самоподобных фрактальных объектов данных типов. Такой причиной могут быть механические процессы изготовления керамики, включая стадии помола, перемешивания, прессования и обработки поверхности.

2. *Данные АСМ микроскопии (микро- и наноуровни).* Следующий уровень разрешения микроструктуры ЦТСНВ-1 реализован на атомных силовых микроскопах AIST SmartSPM™ и NanoEducator. Для одной из съемок увеличение, выбранное для получения АСМ-изображения (рис. 4, б), практически совпало с увеличением, полученным на оптическом микроскопе Olympus DP-12 (рис. 4, а — оригинал; рис. 2, а — исследуемое изображение в градациях серого). На АСМ-изображении также выявлена форма зерен в виде неправильных многогранников. Зерна-многогранники объединены в компактные блоки из 3...7 зерен вокруг общего центра, формирующие вокруг поры или включения подобие иерархической структуры, как правило, из 5-, 6- и 7-гранников.

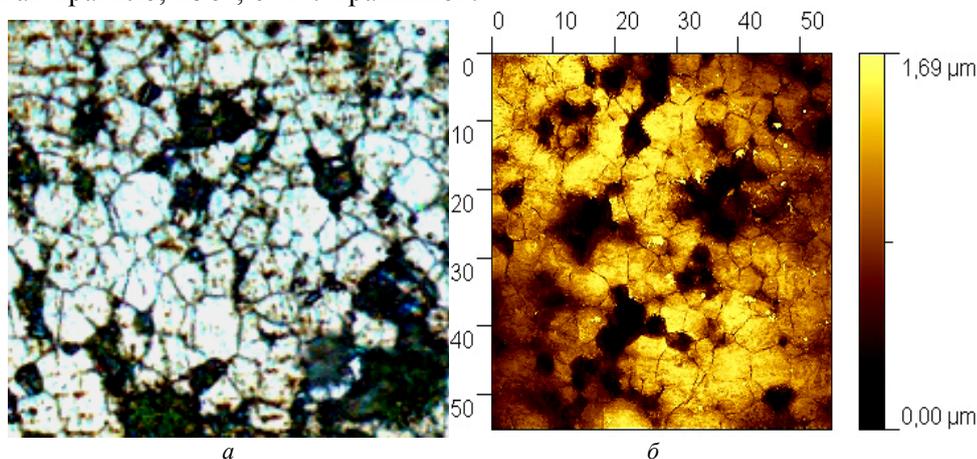


Рис. 4. Сравнение изображений зерен пьезокерамики ЦТСНВ-1, полученных на оптическом микроскопе Olympus DP-12 (а) и АСМ AIST SmartSPM™ (б)

По АСМ-изображению (рис. 4, б) глубина рельефа на выделенном участке составляет 1,7 мкм. По яркости изображения приблизительно оценена шероховатость зерен порядка 0,2 мкм и глубина межзеренных границ до 1 мкм.

На рис. 5 представлена топограмма участка со скоплением пор.

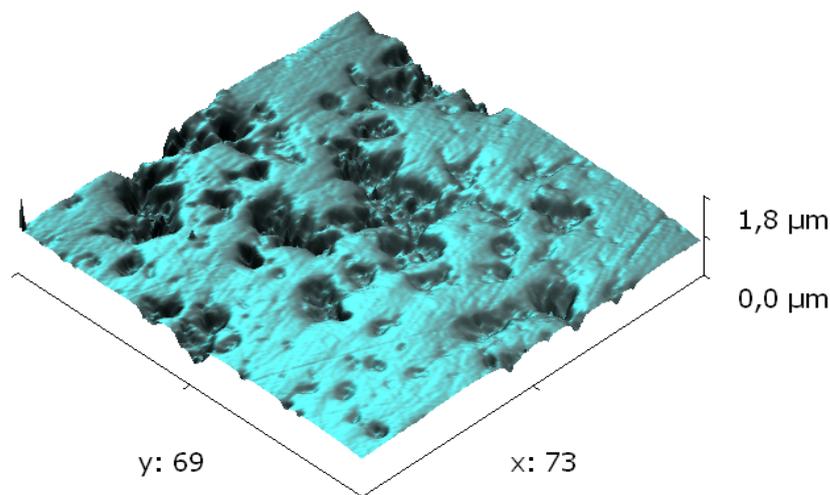


Рис. 5. АСМ-изображение пор в пьезокерамике ЦТСНВ-1. AIST SmartSPM™

Отчетливо видны неглубокие поры разного диаметра с ростовыми зародышами на дне. Выявлена мелкая шероховатость поверхности керамики. На «дне» пор (рис. 5) обнаружены скопления образований субмикронного размера, имеющие форму сталагмитов. Учитывая, что микроструктура выявляется протравливанием поверхности смесью кислот, причем доменные структуры разной полярности травятся с разной скоростью, можно полагать, что выявленные образования представляют собой остатки зародышей доменных структур.

На скане, представленном на рис. 6, *а*, проведено исследование рельефа в области скопления пор и зерен вдоль линии 1. Локальные колебания рельефа поверхности зерен невелики (на рис. 6, *а* — не более 40 нм), а глубина пор на порядок выше (~ 400 нм). Из рис. 6, *б* следует также, что боковые стенки пор не всегда вертикальные и гладкие.

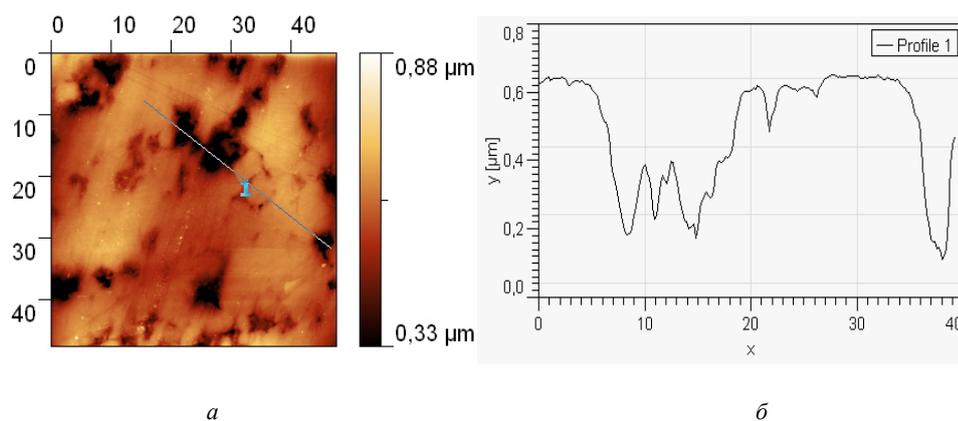


Рис. 6. АСМ-изображение фрагмента поверхности пьезокерамики ЦТСНВ-1 (*а*) и профиля рельефа на линии 1 (*б*). AIST SmartSPM™

Пространственные изображения исследуемых структур, полученные на АСМ NanoEducator, представлены на рис. 7. По мере увеличения масштаба детализирована структура зерен (рис. 7, а, б), а на рис. 7, в выявлена доменная структура зерна в виде рядов доменов.

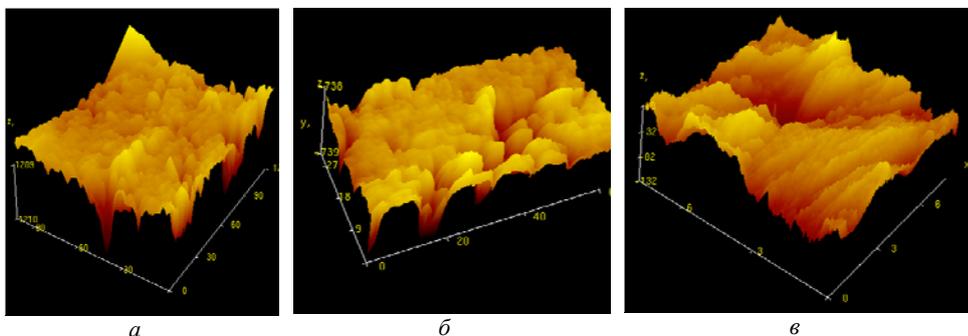


Рис. 7. АСМ-изображения поверхности керамики ЦТСНВ-1 по мере разрешения структуры поверхностного слоя (NanoEducator). Размеры сканов, мкм: а — 120×120; б — 60×60; в — 9×9.

Ряды доменов в соседних зернах разного размера на рис. 7, в отличаются по ширине и высоте.

Выводы

1. Методами оптической микроскопии изучена микроструктура и поверхностная пористость образцов пьезокерамики ЦТСНВ-1 в сравнении с керамикой ЦТС-19. Определены параметры формы и асимметрии зерен, проанализированы их функции распределения, выполнен фрактальный анализ.

2. Выявлено самоподобие микроструктур исследуемых пьезокерамик при разных увеличениях. На мезоуровне (от 10...100 мкм) при увеличениях ×950 выявлен основной мотив зеренной структуры, определяемый конгломератами зерен с параметром асимметрии от 2 до 5, в среднем 3,3...3,4 мкм. На микроуровне при увеличениях ×1250 и ×4000 выявлена форма зерен в виде полигонов, определены локальные и глобальные фрактальные размерности. Фрактальные размерности границ зерен и пор значительно превышают топологическую размерность линии, что свидетельствует об изрезанности границ.

3. Установлено, что для границ полигональных зерен пьезокерамики ЦТСНВ-1 глобальная фрактальная размерность $D = 1,58$ совпадает с фрактальной размерностью треугольной салфетки Серпинского, а фрактальные размерности границ пор соответствуют модели снежинки Кох. Значения факторов формы также согласуются с указанными моделями.

4. На микро- и наноуровнях методами атомно-силовой микроскопии исследован рельеф поверхности зерен и дна пор, измерена глубина пор и межзеренных границ. Выявлена доменная структура зерна шириной порядка 100 нм и отдельные сталагмитоподобные зародыши доменов на дне пор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куприянов М. Ф., Константинов Г. М., Ланич А. Е. Сегнетоэлектрические морфотропные переходы. Ростов н/Д: РГУ, 1992. 246 с.
2. Topolov V. Yu., Bowen Ch. R. Electromechanical Properties in Composites Based on Ferro-electrics. London : Springer series, 2008. 189 p.

3. Особенности температурных зависимостей диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТСНВ-1 в области морфотропного фазового перехода / Н. М. Галиярова, С. В. Горин, Я. В. Гришин, Л. Д. Гришина, А. В. Шильников // Изв. АН СССР. Сер. : Неорганические материалы. 1992. Т. 28. № 9. С. 1943—1947.

4. Проблема порядка-беспорядка в сегнетоэлектрических твердых растворах на основе системы $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ / Н. Б. Редичкина, М. Ф. Куприянов, Ю. Дудек, К. Г. Абдулвахидов // Изв. АН. Сер. : Физические материалы. 1995. Т. 59. № 9. С. 85—88.

5. Фазовая x — T диаграмма реальных твердых растворов $(1-x)PbZrO_3 - xPbTiO_3$ ($0,37 \leq x \leq 0,57$) / Л. А. Резниченко, Л. А. Шилкина, О. Н. Разумовская, Э. А. Ярославцева, С. И. Дудкина, О. А. Демченко, Ю. И. Юрасов, А. А. Есис, И. Н. Андриушина // ФТТ. 2009. Т. 50. Вып. 8. С. 1469—1475.

6. Фазовые переходы в системе твердых растворов на основе ЦТС / Э. В. Петрович, Ю. В. Кабипов, Н. Б. Кофанова, Б. М. Педичкин, М. Ф. Куприянов // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 29—34.

7. *Galiyarova N. M., Gorin S. V., Dontsova L. I.* Fractality and dielectric spectra of ferroic materials // Mat. Res. Inn. 1999. V. 3. № 1. P. 30—41.

8. *Галиярова Н. М., Бей А. Б.* Фрактальные свойства и диэлектрические гистерезис пьезокерамики ЦТСНВ-1 // Изв. РАН. Сер. : Физические материалы. 2003. Т. 67. № 8. С. 1182—1184.

9. *Галиярова Н. М., Бей А. Б.* Фрактальные свойства микроструктуры пьезокерамики ЦТСНВ-1 // Вестник ВолгГАСА. Сер. : Естественные науки. 2004. № 3 (10). С. 68—73.

10. Fractal Dimensionalities and Microstructural Parameters of Piezoceramic PZTNB-1 / N. M. Galiyarova, A. B. Bey, E. A. Kuznetsov, Y. I. Korchmariyuk // Ferroelectrics. 2004. V. 307. P. 205—211.

11. *Galiyarova N. M., Bey A. B.* Fractal microstructure, dielectric & conductivity spectra of PZT piezoceramics // Physics of Electronic Materials (2nd International Conference Proceedings). 2005. Kaluga. Russia. May 24—27. 2005. V. 2. P. 80—83.

12. *Галиярова Н. М., Стреляева А. Б., Тимирязев А.* Наноразмерные процессы в сегнетоэлектрической пьезокерамике на основе титаната-цирконата свинца // Нанотехнологии и наноматериалы: современное состояние и перспективы развития в условиях Волгоградской области : материалы Всерос. науч.-техн. конф., г. Волгоград, 10—11 декабря 2008 г. ВолГУ, 2008. — С. 10—25.

13. *Галиярова Н. М., Стреляева А. Б.* Фликкер-шум в области морфотропной фазовой границы пьезокерамики PZTNB-1 // Нанотехнологии — производству-2008: Труды Международной науч.-практ. конф. М. : Концерн «Наноиндустрия» ; Изд. «Янус-К», 2009. С. 283—287.

14. *Mandelbrot B. B.* The Fractal Geometry of Nature. San Francisco : W. H. Freeman, 1982. 460 p.

1. *Kupriyanov M. F., Konstantinov G. M., Panich A. E.* Segnetoelektricheskie morfotropnye perekhody. Rostov n/D : RGU, 1992. 246 s.

2. *Topolov V. Yu., Bowen Ch. R.* Electromechanical Properties in Composites Based on Ferroelectrics. London : Springer series, 2008. 189 p.

3. Особенности температурных зависимостей диэлектрической проницаемости пьезокерамики TsTSNV-1 в области морфотропного фазового перехода / Н. М. Галиярова, С. В. Горин, Я. В. Гришин, Л. Д. Гришина, А. В. Шильников // Изв. АН СССР. Сер. : Неорганические материалы. 1992. Т. 28. № 9. С. 1943—1947.

4. Проблема порядка-беспорядка в сегнетоэлектрических твердых растворах на основе системы $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ / Н. Б. Редичкина, М. Ф. Куприянов, Ю. Дудек, К. Г. Абдулвахидов // Изв. АН. Сер. : Физические материалы. 1995. Т. 59. № 9. С. 85—88.

5. Фазовая x — T диаграмма реальных твердых растворов $(1-x)PbZrO_3 - xPbTiO_3$ ($0,37 \leq x \leq 0,57$) / Л. А. Резниченко, Л. А. Шилкина, О. Н. Разумовская, Э. А. Ярославцева, С. И. Дудкина, О. А. Демченко, Ю. И. Юрасов, А. А. Есис, И. Н. Андриушина // ФТТ. 2009. Т. 50. Вып. 8. С. 1469—1475.

6. Фазовые переходы в системе твердых растворов на основе TsTS / Э. В. Петрович, Ю. В. Кабипов, Н. Б. Кофанова, Б. М. Педичкин, М. Ф. Куприянов // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 12. С. 29—34.

7. *Galiyarova N. M., Gorin S. V., Dontsova L. I.* Fractality and dielectric spectra of ferroic materials. Mat. Res. Inn. 1999. V. 3. № 1. P. 30—41.

8. *Галиярова Н. М., Бей А. Б.* Фрактальные свойства и диэлектрические гистерезис пьезокерамики TsTSNV-1 // Изв. РАН. Сер. : Физические материалы. 2003. Т. 67. № 8. С. 1182—1184.

9. *Галиярова Н. М., Бей А. Б.* Фрактальные свойства микроструктуры пьезокерамики TsTSNV-1 // Вестник ВолгГАСА. Сер. : Естественные науки. 2004. № 3 (10). С. 68—73.

10. Fractal Dimensionalities and Microstructural Parameters of Piezoceramic PZTNB-1 / N. M. Galiyarova, A. B. Bey, E. A. Kuznetsov, Y. I. Korchmariyuk // Ferroelectrics. 2004. V. 307. P. 205—211.

11. *Galiyarov N. M., Bey A. B.* Fractal microstructure, dielectric & conductivity spectra of PZT piezoce-ramics // *Physics of Electronic Materials (2nd International Conference Proceedings)*. 2005. Kaluga. Russia. May 24—27. 2005. V. 2. P. 80—83.

12. *Galiyarova N. M., Strelyaeva A. B., Timiryazev A.* Nanorazmernye protsessy v segnetoelektricheskoy pezoeramike na osnove titanata-tsirkonata svintsa // *Nanotekhnologii i nanomaterialy: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya v usloviyakh Volgogradskoy oblasti : materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf., g. Volgograd, 10—11 dekabrya 2008 g. VolGU, 2008.* — S. 10—25.

13. *Galiyarova N. M., Strelyaeva A. B.* Flikker-shum v oblasti morfotropnoy fazovoy granitsy p'ezokeramiki PZTNB-1 // *Nanotekhnologii — proizvodstvu-2008: Trudy Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konferentsii. M. : Kontsern «Nanoindustriya» ; Izd. «Yanus-K», 2009.* S. 283—287.

14. *Mandelbrot B. B.* *The Fractal Geometry of Nature.* San Francisco : W. H. Freeman, 1982. 460 p.

© *Галиярова Н. М., Стреляева А. Б., 2012*

*Поступила в редакцию
в мае 2012 г.*

Ссылка для цитирования:

Галиярова Н. М., Стреляева А. Б. Структура модифицированной пьезокерамики на основе цирконата-титаната свинца на мезо-, микро- и наноуровнях // *Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 2 (22).*