

УДК 537.226.4

СТРУКТУРА КОМПОЗИЦИЙ PZT-LNO-SI ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.

Дарья Ивановна Туркина ⁽¹⁾, Александра Владимировна Атанова ⁽²⁾

*Студент 4 курса ⁽¹⁾, аспирантка 4 года ⁽²⁾,
кафедра «Материаловедение» ⁽¹⁾*

*Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана, 105005,
Москва, Россия ⁽¹⁾,*

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 119333, Москва, Россия ⁽²⁾

Научный руководитель: О.М. Жигалина,

доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Материаловедение»

Создание микроэлектронных устройств нового поколения требует создания материалов с особыми физическими свойствами, например, сегнетоэлектрическими, пьезоэлектрическими, пирозэлектрическими и оптическими. Как правило, функциональные материалы в таких устройствах используются в составе тонкопленочных композиций, в которых каждый слой играет определенную роль: электрод, функциональный слой, диффузионный барьер и т.д. В частности, для создания сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти и различных микроэлектромеханических систем используются композиции на основе цирконата-титаната свинца (PZT), заключенного между двумя электродами [1]. Новый электрод LaNiO_3 (LNO) является перспективной альтернативой Pt-электроду, т.к. композиции PZT-LNO обладают более хорошими усталостными свойствами и при этом проявляют высокие сегнетоэлектрические свойства [2]. Однако структура LNO оказалась очень чувствительной к технологии получения, и на данный момент вырастить высококачественные пленки довольно сложно. Пленки LNO, полученные методом химического осаждения из растворов, обычно имеют пористую неориентированную структуру вместо желаемой столбчатой (рис. 1) [3]. В связи с этим, актуальной проблемой является изучение процессов кристаллизации пленок.

В работе была рассмотрена зависимость структуры и свойств образцов от условий их кристаллизации. Исследуемые образцы представляли собой тонкие пленки LNO или композиции на основе слоев PZT и LNO, сформированные методом химического осаждения из растворов на кремниевых подложках. Для этого LNO и PZT послойно наносили на Si-подложку с последующим кристаллизационным отжигом.

Исследования проводили методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), просвечивающей растровой электронной микроскопии с широкоугловым детектором темного поля (HAADF STEM), электронной дифракции и энергодисперсионного анализа с использованием микроскопа TermoFisher Scientific Tecnaï Osiris (200кВ). Поперечные сечения композиций для исследования в ПЭМ изготавливали методом фокусированных ионных пучков с использованием растрового электронного микроскопа TermoFisher Scientific Scios.

Для начала мы рассмотрели конденсаторную структуру LNO-PZT-LNO-Si, где обнаружили различия в структуре нижнего и верхнего электродов. Нижний электрод LNO имел толщину 120-150 нм, слой PZT – 365-390 нм, а верхний электрод LNO – 70-80 нм. Довольно большой разброс в толщинах каждого из слоев связан с образованием специфического рельефа в слое LNO. Зерна PZT имеют преимущественно столбчатую форму, хотя также наблюдали зерна, растущие от нижней границы раздела PZT-LNO, но

не достигающие до верхней границы пленки (рис. 2). Мы предположили, что такое различие структуры электродов связано с вынужденной термической обработкой, которой подвергался нижний электрод при осаждении слоев PZT и верхнего LNO.

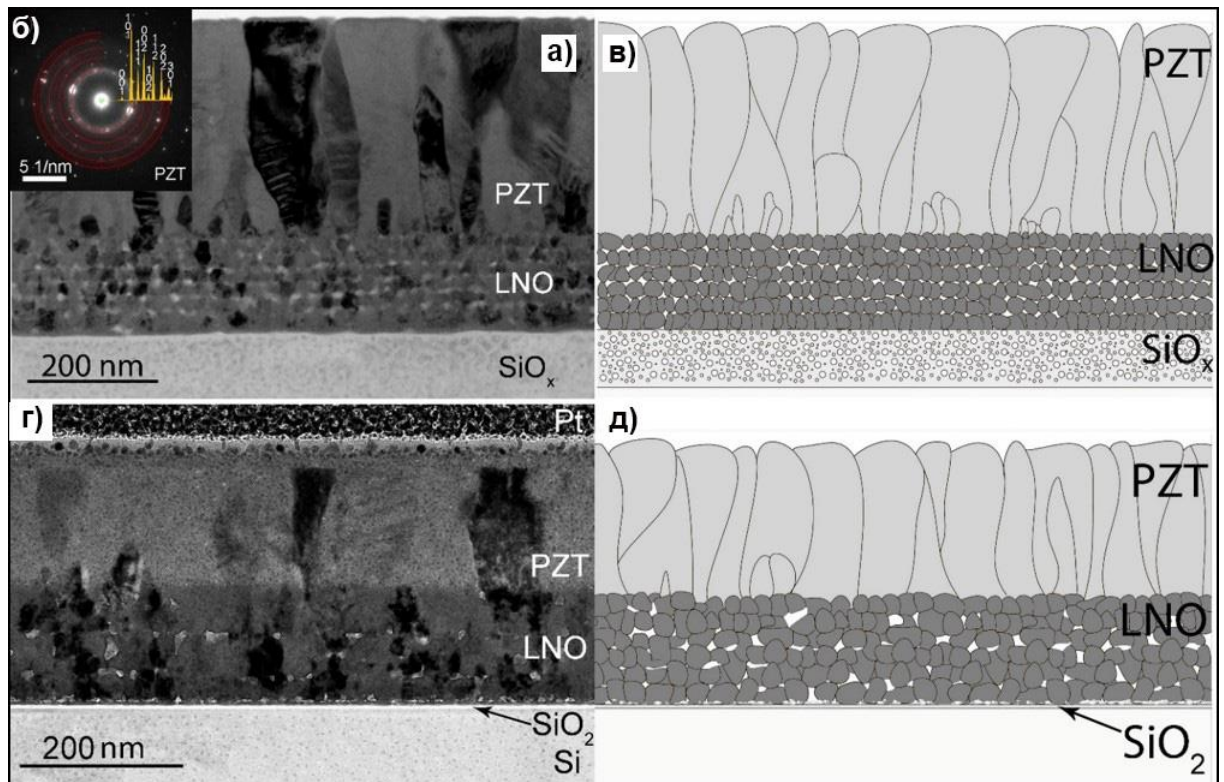


Рис. 1. Светлопольные ПЭМ изображения (а, г), электроннограмма (б) и схемы структур (в, д) для композиций PZT-LNO-SiO_x-Si (а-в) и PZT-LNO-Si (г-д) [3]

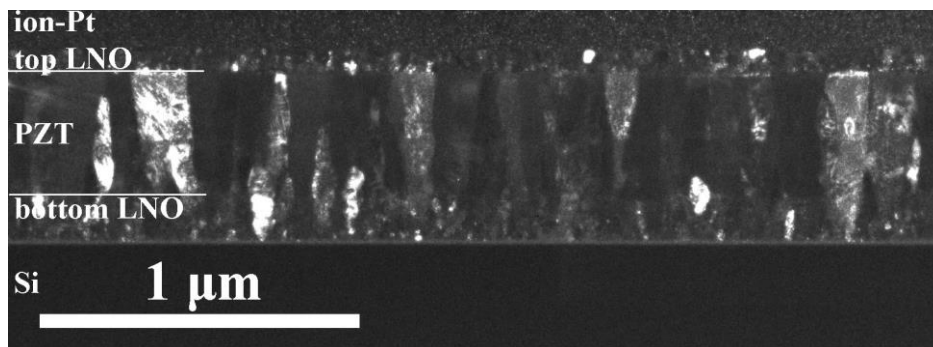


Рис. 2. Темнопольное ПЭМ-изображение образца LNO-PZT-LNO-Si

Для изучения причины различий мы подготовили и исследовали серию образцов LNO-Si с увеличенным временем кристаллизации (10 мин) и вариацией времени окончательного гомогенизирующего отжига 0/30/60/90 минут. Кроме того, для изучения механизмов кристаллизации была подготовлена серия образцов с вариацией времени кристаллизации каждого слоя 2/5/7/10/20 минут. Кроме того, мы осадили слой PZT на наиболее качественный электрод для оценки влияния структуры нижнего слоя на сегнетоэлектрик.

Для первой серии образцов со слоями LNO-Si показано, что увеличение времени кристаллизации с 5 до 10 минут приводит к формированию столбчатой структуры во всех образцах. Однако, при отсутствии гомогенизирующего отжига на поверхности

образца остается аморфный слой толщиной порядка 20 нм. При 30, 60 и 90 минутах гомогенизирующего отжига пленки полностью кристаллизуются и аморфного слоя не наблюдается.

Во второй серии образцов (LNO-Si) исследовалась зависимость образования столбчатых зерен от времени кристаллизации (2/5/7/10/20 минут) каждого слоя пленки. Выявлено, что в образце со временем кристаллизации 2 минуты (рис. 3, а), слои не успевают кристаллизоваться полностью: в некоторых областях образуются равноосные зерна со средним размером 14 ± 8 нм и пленки имеют неориентированную поликристаллическую структуру, другие области остаются аморфными. При послойной кристаллизации 5 и 7 минут многие столбчатые зерна прорастают пленку насквозь. Их размеры 44 ± 19 нм и 38 ± 10 нм соответственно. Но также присутствует много равноосных зерен со средними размерами 13 ± 6 нм для образцов с кристаллизацией по 5 минут и 13 ± 6 нм для образцов с кристаллизацией по 7 минут. При послойной кристаллизации 10 и 20 минут (рис. 3, б) мы наблюдаем столбчатые зерна со средней толщиной 30 ± 8 нм и 32 ± 11 нм соответственно.

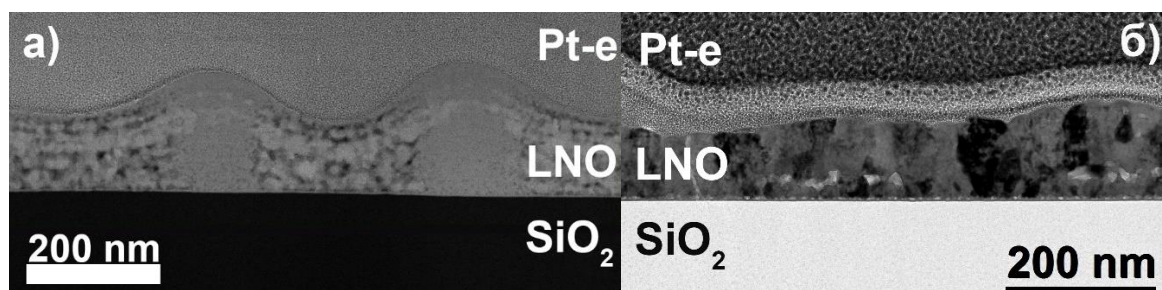


Рис. 3. Структура образцов второй серии LNO с послойной кристаллизацией:
а) 2 минуты и б) 20 минут.

Для контроля электрических свойств пленки LNO мы измеряли поверхностное электрическое сопротивление у образцов второй серии. Полученные значения поверхностного сопротивления пленок схожи между собой и составляют в среднем $85,5\text{--}90,5$ Ом/см². Поверхностное сопротивление пленок, кристаллизованных 2 мин, очень велико и составляет $1078\text{--}2862$ Ом/см².

Литература:

1. N. Izyumskaya, Y. I. Alivov, S. J. Cho, H. Morkoç, H. Lee, and Y. S. Kang, "Processing, structure, properties, and applications of PZT thin films," *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 32, no. 3–4, pp. 111–202, 2007, doi: 10.1080/10408430701707347.
2. A. S. Films, Y. Liang, H. Lee, H. Ryu, and H. Sun, "Effects of (100) -Textured LaNiO 3 Electrode on Crystallization and Properties of Sol-Gel-Derived," no. 100, 1995.
3. O. M. Zhigalina, A. V. Atanova, D. N. Khmelenin, N. M. Kotova, D. S. Seregin, and K. A. Vorotilov, "Structural Features and Mutual Influence of the Layers in PZT–LNO–SiO_x–Si and PZT–LNO–Si Compositions," *Crystallogr. Reports*, vol. 64, no. 6, pp. 961–967, 2019, doi: 10.1134/S1063774519060282.