

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Борздов, В. М. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В.М. Борздов [и др.]. – Мн.: БГУ, 2007. – 175 с.
2. Starikov, E. Hydrodynamic and Monte Carlo simulation of steady-state transport and noise in n^+-n-n^+ submicrometre silicon structures / E. Starikov [et al.] // Semicond. Sci. Technol. – 1996. – № 11. – P. 865–872.
3. Muscato, O. Electro-thermal behaviour of a sub-micron silicon diode / O. Muscato, V. Di Stefano // Semicond. Sci. Technol. – 2013. – №. 28. – P. 1–10.
4. Varani, L. Numerical modeling of TeraHertz electronic devices / L. Varani [et al.] // J. Comput. Electron. – 2006. – №. 5. – P. 71–77.
5. Persano Adorno, D. Monte Carlo simulation of harmonic generation in GaAs structures operating under large-signal conditions / D. Persano Adorno, M. C. Capizzo, M. Zarcone // J. Comput. Electron. – 2007. – №. 6. – P. 27–30.
6. Perez, S. Microscopic analysis of generation-recombination noise in semiconductors under dc and time-varying electric fields / S. Perez [et al.] // J. Appl. Phys. – 2000. – Vol. 88, № 2. – P. 800–807.
7. Martin, M. J. Analysis of current fluctuations in silicon pn^+ and p^+n homojunctions / M. J. Martin, J. E. Velazques, D. Pardo // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79, № 9. – P. 6975–6981.
8. Reklaitis, A. Monte Carlo investigation of current voltage and avalanche noise in GaN double-drift impact diodes / A. Reklaitis, L. Reggiani // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 97. – P. 043709-1–043709-8.

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

Н. А. Босак¹, М. В. Бушинский², А. Н. Чобот²,
Л. В. Баран³, В. В. Малютина-Бронская⁴, И. А. Таратын⁵

¹⁾ Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, пр. Независимости, 68-2,
220072, Минск, Беларусь, e-mail: n.bosak@ifanbel.bas-net.by

²⁾ ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», ул. Петруся Бровки 19,
220072, Минск, Беларусь, e-mail: bushinsky@physics.by

³⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,
220030, Минск, Беларусь, e-mail: baran@bsu.by

⁴⁾ ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», пр. Независимости, 68,
220072, Минск, Беларусь, e-mail: malyutina@oelt.basnet.by

⁵⁾ Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65,
220013, Минск, Беларусь, e-mail: mnt@bntu.by

Методом высокочастотного импульсно-периодического $f \sim 10\text{--}12$ кГц воздействия лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1,064$ мкм и плотностью мощности $q = 33$ МВт/см² на пьезокерамику ЦТС-19 (цирконат-титанат свинца) при давлении в вакуумной камере $p = 2,2 \times 10^{-2}$ мм рт. ст. получены наноструктурированные тонкие пленки на кремниевой и стеклянной подложках. Изучена морфология поверхности тонких пьезокермических пленок с помощью атомно-силовой микроскопии. Исследованы спектры пропускания пленок в видимой, ближней и средней ИК-области. Проведен анализ электрофизических свойств структуры ЦТС-19/Si на кремниевой подложке.

Ключевые слова: высокочастотное лазерное воздействие; структура тонких пленок; спектры пропускания и отражения; электрофизические характеристики.

SURFACE MORPHOLOGY, OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF PIEZOCERAMIC FILMS

N. A. Bosak¹, M. V. Bushinsky², A. N. Chobot²,
L. V. Baran³, V. V. Malyutina-Bronskaya⁴, I. A. Taratyn⁵

¹⁾ B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus,
68-2 Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Belarus

²⁾ GO «Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science», st. Petrusya Brovki 19, 220072, Minsk, Belarus

³⁾ Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Belarus

⁴⁾ GNPO «Optika, optoelektronika i lazernaya tehnika», 68 Nezavisimosti Ave., 220072 Minsk, Belarus

⁵⁾ Belarusian National Technical University, Nezavisimosti Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

Corresponding author: N. A. Bosak (n.bosak@ifanbel.bas-net.by)

By the method of high-frequency repetitively pulsed $f \sim 10\text{--}12$ kHz laser radiation with a wavelength $\lambda = 1.064$ μm and a power density $q = 33$ MW/cm² on the piezoceramics PZT-19 target at a pressure in the vacuum chamber $p = 2.2 \times 10^{-2}$ mm Hg Art nanostructured thin films on a silicon and glass substrates have been obtained. The morphology of thin piezoceramics films was studied using atomic force microscopy. Transmission spectra of the PZT films in the visible, near and mid-IR regions were investigated. The electro-physical characteristics of piezoceramics structure on a silicon substrate was carried out.

Key words: high-frequency laser irradiation; the structure of thin films; transmission and reflection spectra, electrophysical characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

К числу наиболее эффективных сегнетоэлектриков относятся пьезокерамические материалы системы цирконат-титанат свинца $\text{Pb}(\text{Ti}_x\text{Zr}_{1-x})\text{O}_3$, представляющие собой твердые растворы цирконата PbZrO_3 и титаната свинца PbTiO_3 , которые могут быть получены не только в виде объемных материалов, но и в виде тонких пленок [1–4]. Тонкие пленки ЦТС обладают большой диэлектрической проницаемостью, высоким пьезомодулем, уникальными электрооптическими свойствами.

В данной работе проведены исследования тонких пьезокерамических пленок ЦТС-19, осажденных в вакууме на кремниевую и стеклянную подложки при многоимпульсном высокочастотном лазерном воздействии [5]. Изучена морфология полученных тонких пленок с помощью электронной и атомно-силовой микроскопии, выявлены особенности спектров пропускания в ближней и средней ИК-области и спектров отражения в видимой и ближней ИК-области, исследованы вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные (ВФХ) характеристики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пьезокерамические пленки осаждались методом высокочастотного лазерного распыления керамической мишени в вакууме ($p = 2,2 \times 10^{-2}$ мм рт. ст.). Экспериментальная лазерная установка ($\lambda = 1,06$ мкм) с регулируемой частотой повторения лазерных импульсов от 5 до 50 кГц содержала: источник лазерного излучения, оптическую систему транспортировки лазерного излучения к распыляемой мишени, ваку-

умную камеру и измерительно-диагностический модуль. Частота повторения лазерных импульсов изменялась за счет варьирования уровня накачки лазера и оптической плотности затвора из радиационно облученного кристаллического фторида лития LiF с F_2^- -центрами окраски; длительность лазерных импульсов на полувысоте составляла $\tau \sim 85$ нс. Осаждение макроскопически однородных тонких пленок достигалось при плотности мощности лазерного излучения $q = 33$ МВт/см² и частоте повторения импульсов $f \sim 10\text{--}12$ кГц.

Данные по элементному составу мишени и пленки получены методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM EVO 10 с микрорентгеноспектральным анализатором Oxford Instruments Nanotechnology Tools Ltd.

Морфология поверхности пленок ЦТС, полученных на кремниевой и стеклянной подложках, изучалась методами сканирующей электронной (микроскоп SEM EVO 10) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47 PRO. Пропускание оптического излучения тонкими пленками в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра измерялось на спектрофотометре Cary 500 Scan. Спектры пропускания в средней инфракрасной области регистрировались с помощью ИК-Фурье-спектрометра NEXUS (Thermo Nicolet) в диапазоне $400\text{--}4000$ см⁻¹. Измерения вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик проводились с помощью автоматизированного измерителя иммитанса E7-20 при комнатной температуре. ВФХ измеряли на частоте сигнала 100 кГц, 500 кГц и 1 МГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные по элементному составу мишени и пленки, полученные методом EDX, представлены в таблице. Результаты получены в весовых и атомных процентах с участков поверхности мишени и пленки, представленных на рисунке 1. Исследования показали хорошее согласование состава мишень – пленка.

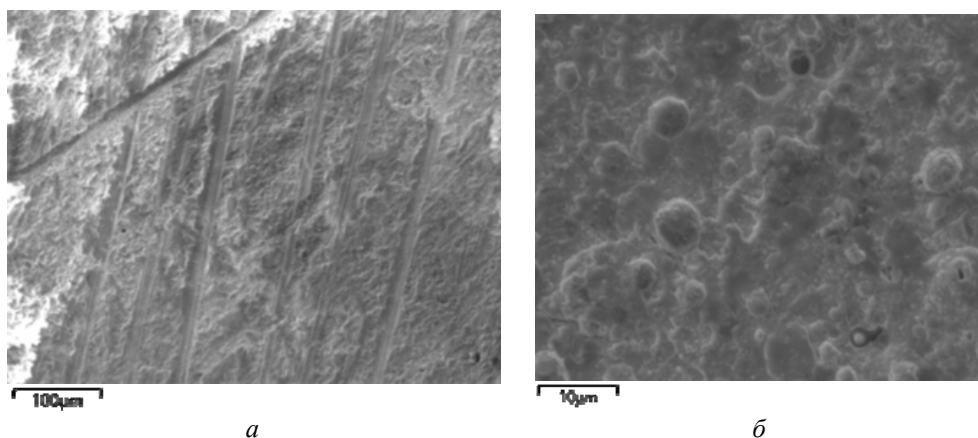


Рис. 1. Данные EDX: а – участки поверхности мишени; б – участки поверхности пленки

Элементный состав мишени и пленки

Элемент	Состав мишени		Состав пленки	
	Вес. %	Атом. %	Вес. %	Атом. %
C	4,80	21,62	3,57	17,54
O	13,91	47,06	12,57	46,30
Ti	6,46	7,30	7,10	8,74
Zr	13,47	7,99	15,41	9,96
Pb	61,36	16,03	61,34	17,45
Всего	100,00	100,00	100,00	100,00

АСМ-изображения поверхности пленок ЦТС, полученных на кремниевой подложке, представлены на рис. 2. Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что при осаждении пленок на кремниевую подложку формируется развитая поверхность пленок с большим разнообразием форм структурных элементов различных размеров. Так, наряду с крупными шарообразными частицами диаметром 1–5 мкм встречаются образования в виде замкнутых и разорванных колец, удлинённых образований. В результате сканирования области 5×5 мкм выявлено, что пленка также состоит из мелкодисперсной фазы, причем размер мелких структурных элементов варьируется от 50 до 300 нм. Средняя высота рельефа поверхности пленок ЦТС, полученных на кремниевой подложке, составляет 880 нм при среднеквадратической шероховатости 384,2 нм.

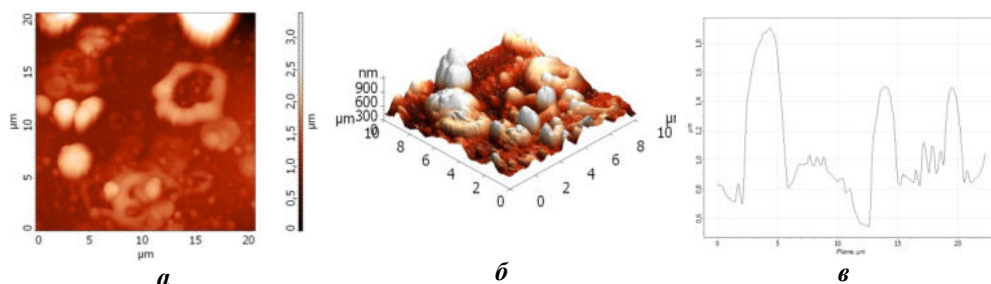


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности лазерно-осажденной тонкой пьезокерамической пленки на кремниевой подложке (а–б) и профиль сечения рельефа вдоль выделенной линии (в)

Коэффициент пропускания лазерно-осажденной пьезокерамической пленки на кремнии в ближней ИК-области спектра (рис. 3, а) составляет от $T = 34,8\%$ на длине волны $\lambda = 1155$ нм с плавным увеличением до $T = 47,1\%$ на длине волны $\lambda = 2500$ нм. Коэффициент пропускания пленки ЦТС на кремниевой подложке в средней ИК-области (рис. 3, б) резко увеличивается от $T = 6,1\%$ при волновом числе $\nu = 403$ см⁻¹ до величины пропускания $T = 34,9\%$ при волновом числе $\nu = 1232$ см⁻¹, а в диапазоне волновых чисел от $\nu = 1232$ см⁻¹ до $\nu = 3783$ см⁻¹ составляет от 36,4% до 38,2%. Коэффициент отражения R пьезокерамической пленки на кремниевой подложке (рис. 3, в) изменяется от 4,8% до 9% в диапазоне длин волн λ от 200 нм до 1098 нм.

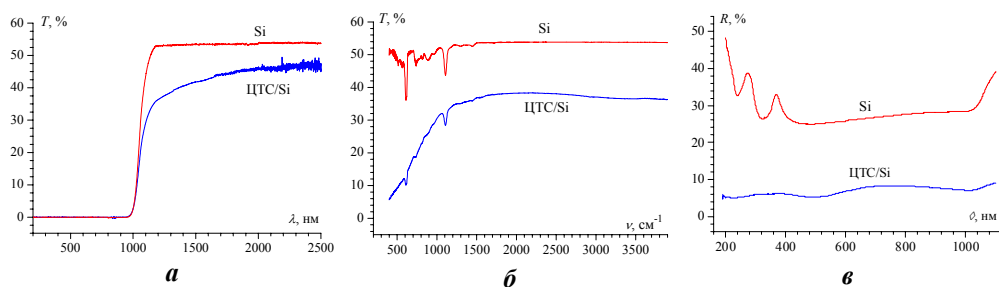


Рис. 3. Спектры кремниевой подложки и лазерно-осажденной пьезокерамической пленки на кремниевой подложке: *a* – пропускания в видимой, ближней области; *б* – в средней ИК-области; *в* – отражения

На рис. 4, *a* представлена ВАХ структуры ЦТС/Si. Полярность напряжения на ВАХ соответствует полярности напряжения подаваемого на пленку ЦТС. Зависимость силы тока от приложенного напряжения имеет несимметричный вид и отношение тока при положительном и отрицательном напряжении 15 В составляет 2,16. Данную несимметричность ВАХ можно связать с различной величиной потенциальных барьеров, локализованных на нижней и верхней границе раздела пленки при наличии поляризации.

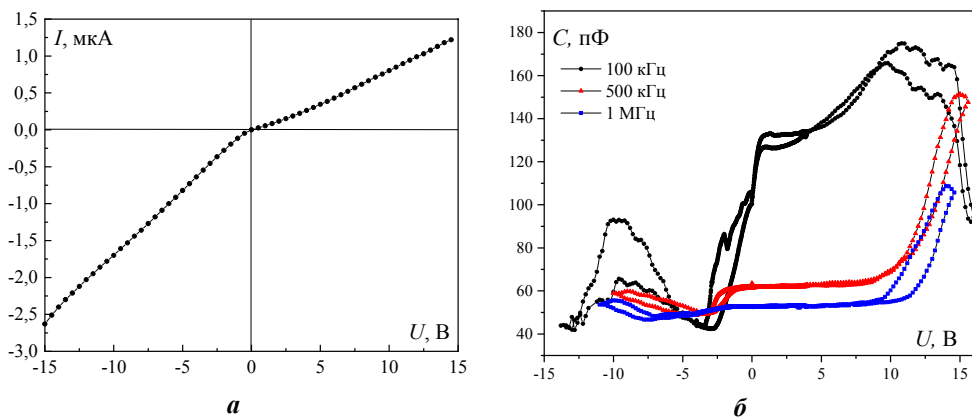


Рис. 4. Характеристики структуры ЦТС/Si на кремниевой подложке: *a* – вольт-амперная; *б* – вольт-фарадная

Анализ ВАХ показал, что в области напряжений: от 0 до 1,5 В и от 0 до -5 В доминирует омический механизм проводимости; при напряжениях: от 1,5 В до 9 В и от -5 В до -9 В механизм проводимости Пула-Френкеля, согласно которому при данных электрических полях, приложенных к структуре, изменяется вид потенциальных барьеров для носителей зарядов между атомами кристаллической решетки, а при положительных и отрицательных напряжениях более 9 В доминирующим механизмом проводимости является ток, ограниченный пространственным зарядом (ТОПЗ) [6]. На рис. 4, *б* показана ВФХ структуры ЦТС-19/Si, измеренная на трех частотах: 100 кГц, 500 кГц и 1 МГц. На характеристиках наблюдается ряд особенностей: наличие максимума в области напряжений -10 В, ступенька – в области напря-

жений от -5 В до 0 В. Можно отметить, что значение емкости от частоты меняется, с ростом частоты измерительного сигнала величина максимума емкости при напряжении -10 В уменьшается, гистерезис ступеньки и ее высота уменьшаются, значение емкости в области положительных напряжениях падает. Гистерезис на частотах 100 кГц, 500 кГц, 1 МГц составляет 4 В; $1,1$ В и $1,7$ В, соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом высокочастотного лазерного распыления керамической мишени в вакууме сформированы пленки ЦТС с развитой морфологией поверхности на кремниевой и стеклянной подложках, при этом элементный состав пленки коррелирует с элементным составом мишени. Средняя высота рельефа поверхности пленок составляет 880 нм при среднеквадратической шероховатости $384,2$ нм. Коэффициент отражения R пьезокерамической пленки на кремниевой подложке имеет значение от $4,8\%$ до 9% в диапазоне длин волн λ от 200 нм до 1098 нм. Электрические свойства неоттоженной структуры ЦТС-19/Si определяются наличием нескомпенсированных зарядов сегнетоэлектрических фаз и зарядовых дефектов в пленке и на границе раздела ЦТС-19/Si. Анализ вольтамперных характеристик показал, что для структуры ЦТС-19/Si характерно несколько механизмов проводимости: омического (при малых напряжениях от 0 до $1,5$ В и от 0 до -5 В), эмиссии Пула-Френкеля (от $1,5$ В до 9 В и от -5 В до -9 В) и ТОПЗ (при напряжениях больше ± 9 В).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Baba, S. Thickness Dependence of Electrical Properties of PZT Films Deposited on Metal Substrates by Laser-Assisted Aerosol Deposition / S. Baba, H. Tsuda, J. Akedo // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. – 2008. – Vol. 55, No. 5. – P. 1009–1016.
2. Electrical Properties of PZT-PCW Thick Film on Pt/SiC/Si, and Structural Stability of SiC / K.Y. Choi [et al.] // Integrated Ferroelectrics. – 2005. – Vol. 69(1). – P. 93–101.
3. Electrical properties of PZT thin films grown by sol–gel and PLD using a seed layer / S.K. Pandey [et al.] // Materials Science and Engineering: B. – 2004. – Vol. 112(1). – P. 96–100.
4. PZT Thin Films on Silicon Substrates: Formation and Research of Properties / V.V. Petrov [et al.] // Nano Hybrids and Composites. – 2020. – Vol. 28. – P. 65–70.
5. Минько, Л.Я. Об эффективном режиме эрозионного приповерхностного плазмообразования в воздухе при импульсно-периодическом лазерном воздействии / Л.Я. Минько, А.Н. Чумаков, Н.А. Босак // Квант. электрон. – 1990. – Т. 17, № 11. – С. 1480–1484.
6. Проводимость и вольт-амперные характеристики тонкопленочных гетероструктур на основе ЦТС / М.В. Каменщиков [и др.] // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53, вып. 10. – С. 1975–1979.