

## МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Н.А. Босак<sup>1)</sup>, П.В. Шпак<sup>1)</sup>, А.Н. Чумаков<sup>1)</sup>, Л.В. Баран<sup>2)</sup>,  
В.В. Малютина-Бронская<sup>3)</sup>, В.С. Дробуш<sup>1)</sup>, А.С. Кузьмицкая<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси,  
пр. Независимости 68-2, Минск 220072, Беларусь, n.bosak@ifanbel.bas-net.by

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет,  
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, baran@bsu.by

<sup>3)</sup>ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,  
пр. Независимости 68, Минск 220072, Беларусь, malyutina@oelt.basnet.by

Проведены исследования тонких пленок оксида ниобия Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, осажденных в вакууме ( $p = 2.2$  Па) на кварцевую и кремниевую подложки при многоимпульсном высокочастотном ( $f \sim 10-12$  кГц) лазерном воздействии на керамическую мишень при плотности мощности лазерного излучения  $q = 81$  МВт/см<sup>2</sup>. Изучена морфология полученных пленок с помощью атомно-силовой микроскопии, выявлены особенности спектров пропускания, представлены результаты исследования их электрофизических характеристик.

**Ключевые слова:** высокочастотное лазерное воздействие; пассивный затвор; структура тонких пленок; спектры пропускания и отражения; вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики.

## SURFACE MORPHOLOGY, OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> FILMS

N.A. Bosak<sup>1)</sup>, P.V. Shpak<sup>1)</sup>, A.N. Chumakov<sup>1)</sup>, L.V. Baran<sup>2)</sup>,  
V.V. Malutina-Bronskaya<sup>3)</sup>, V.S. Drobush<sup>1)</sup>, A.S. Kuzmitskaya<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus,  
68-2 Nezavisimosti Ave., 220072 Minsk, Belarus, n.bosak@ifanbel.bas-net.by

<sup>2)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, baran@bsu.by

<sup>3)</sup>SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology",  
68 Nezavisimosti Ave., 220072 Minsk, Belarus, malyutina@oelt.basnet.by

Studies of thin Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films was be done and deposited in vacuum ( $p = 2.2$  Pa) on the silicon substrate under multipulse high-frequency ( $f \sim 10-12$  kHz) laser action on a quartz and ceramic target at a laser power density  $q = 81$  MW/cm<sup>2</sup>. The morphology of the obtained films was studied using atomic force microscopy, the features of the transmission spectra and the results of the study of their electrophysical characteristics were presented.

**Keywords:** high-frequency laser effect; passive shutter; the structure of thin films; transmission and reflections spectra, current-voltage and farad-voltage characteristics.

### Введение

Наноструктурированные пленки из оксидов металлов широко применяются в микроэлектронике. Пентаоксид ниобия является одним из перспективных оптических материалов благодаря своим свойствам, таким как стабильность на воздухе и в воде, устойчивость к кислотам и основаниям, высокий показатель преломления ( $n = 2.4$  при 550 нм), низкое поглощение и высокая прозрачность в УФ- и видимом диапазоне, а также в ближней ИК-области

от 380 нм до 9 мкм [1]. Он широко используется в оптических [2] и солнечных элементах [3], оптических фильтрах, химических датчиках [4]. Поэтому исследования наноструктурированных тонких пленок Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> для возможного применения в фотодетекторных структурах является актуальным [5].

В работе представлены результаты исследования структурных, оптических и электрических свойств тонких пленок оксида ниобия Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, осажденных в вакуу-

ме на кварцевую и кремниевую подложки при многоимпульсном высокочастотном лазерном воздействии [6].

### Материалы и методы исследования

Тонкие пленки оксида ниобия  $Nb_2O_5$  осаждались методом высокочастотного лазерного распыления оксидной керамики в вакууме ( $p = 2.2$  Па). 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, вакуумную 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  $q = 81$  МВт/см<sup>2</sup> и частоте повторения импульсов  $f \sim 10$ -12 кГц.

Морфология поверхности образцов исследовалась с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47-Pro (НТ-МДТ, Россия) в полуконтактном режиме. Использовались суперострые бесконтактные кремниевые кантилеверы вискерного типа с радиусом кривизны кончика иглы менее 3 нм. Толщина пленки оксида ниобия на кварцевой подложке, измеренная методом АСМ, составила 550 нм, на кремниевой подложке – около 100 нм. Основные параметры шероховатости определялись в пяти разных точках образца при сканировании области размером 20x20 мкм.

Пропускание оптического излучения тонкими пленками в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра измерялось на спектрофотометре Carry 500 Scan. Спектры пропускания в средней инфра-

красной области регистрировались с помощью ИК-Фурье-спектрометра NEXUS (Thermo Nicolet) в диапазоне 400-4000см<sup>-1</sup>.

Измерение фотоэлектрических (вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур  $Nb_2O_5/Si$  проводилось с помощью автоматизированного базового лазерного испытательного комплекса с мультиспектральным источником лазерного излучения (набор лазерных диодов с длинами волн 405, 450, 520, 660, 780, 808, 905, 980 и 1064 нм с общим оптоволоконным выводом и калиброванной мощностью излучения с мощностью излучения порядка 2 мВт. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) были измерены с использованием измерителя иммитанса E7-20 на частоте сигнала 100 кГц и 1 МГц, в том числе и под воздействием лазерного излучения. Все измерения были выполнены при комнатной температуре.

### Результаты и их обсуждение

Методом атомно-силовой микроскопии установлено, что при осаждении на кварцевую подложку формируется однородная гладкая поверхность пленок  $Nb_2O_5$  со средним перепадом высот 10 нм при среднеквадратичной шероховатости 4 нм. На поверхности пленок обнаружены равномерно расположенные частицы плотностью 2 частицы/мкм<sup>2</sup> (рис. 1а, б). Анализ гистограммы распределения поперечных размеров частиц и профиля сечения вдоль выделенной линии показал, что средний латеральный размер частиц составляет 70 нм, высота 20-30 нм.

На рис. 1в, г представлены АСМ-изображения морфологии поверхности пленок  $Nb_2O_5$ , осажденных на кремниевую подложку. При осаждении на кремниевую подложку формируется однородная гладкая поверхность пленок со средним перепадом высот 21 нм при среднеквадратичной шероховатости 8 нм. На поверхности пленок обнаружены равномерно расположенные дендриты.

Пропускание лазерно-осажденной пленки оксида ниобия  $Nb_2O_5$  на кремние-

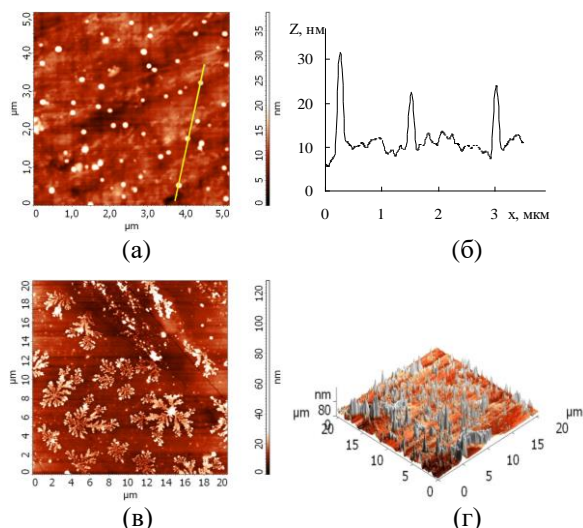


Рис. 1. Морфология поверхности пленки  $Nb_2O_5$  на кварцевой (а, б) и кремниевой (в, г) подложках: а, в – двумерное АСМ-изображение; б – профиль сечения вдоль выделенной линии; г – трехмерное АСМ-изображение

вой подложке в ближней ИК-области спектра (рис. 2, а) резко возрастает от  $T = 1.4\%$  на длине волны  $\lambda = 997$  нм до величины пропускания  $T = 32\%$  на длине волны  $\lambda = 1200$  нм с плавным увеличением до  $T = 60\%$  на длине волны  $\lambda = 2980$  нм. В спектре отражения  $R$  пленки оксида ниобия на кремниевой подложке (рис. 2, б) наблюдаются спад от  $R = 30.4\%$  на длине волны  $\lambda = 192$  нм до минимального значения  $R = 14.4\%$  на длине волны  $\lambda = 368$  нм, а также пять максимумов на длинах волн:  $\lambda_1 = 288$  нм,  $\lambda_2 = 330$  нм,  $\lambda_3 = 407$  нм,  $\lambda_4 = 560$  нм и  $\lambda_5 = 902$  нм.

На рис. 3 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) (а) и спектральная чувствительность при напряжении смещения  $-20$  В (б) структуры  $Nb_2O_5$  на кремниевой подложке. Темновая ВАХ имеет практически симметричный вид. При воздействии лазерного излучения в области отрицательных напряжений наблюдается фотоэффект. Фоточувствительность наблюдается к излучению с длиной волны от 450 нм и выше. На зависимости чувствительности от длины волны (рис. 3, б) наблюдается три максимума фоточувствительности в УФ-области (450 нм) и ближней ИК-области (808 нм и 1064 нм) порядка 4.5-5 мА/Вт.

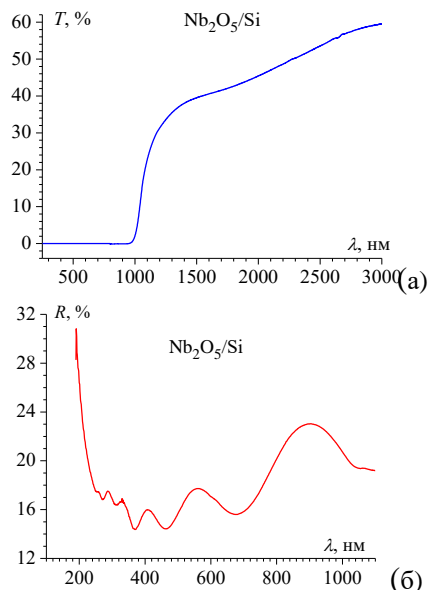


Рис. 2. Спектры пропускания лазерно-осажденной пленки оксида ниобия  $Nb_2O_5$  на кремниевой подложке в видимой и ближней ИК-области (а). Спектры отражения (б) лазерно-осажденной пленки оксида ниобия  $Nb_2O_5$  на кремниевой подложке в видимой и ближней ИК-области

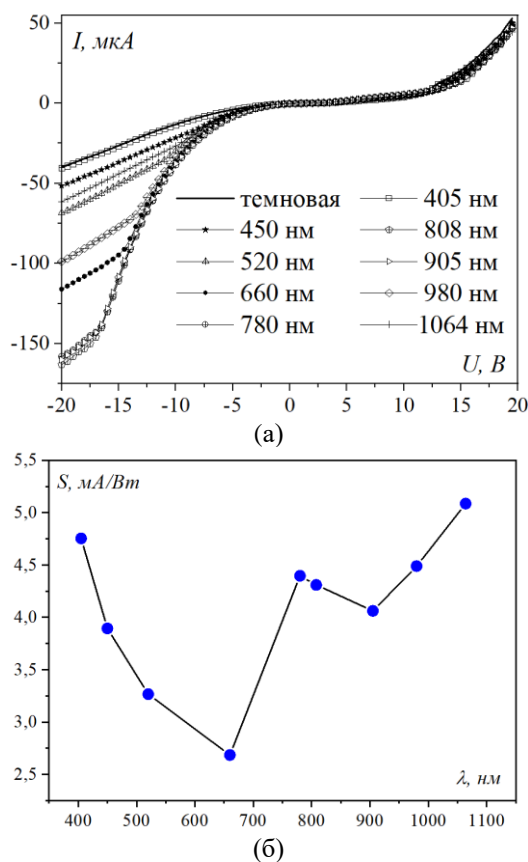


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики (а) и спектральная чувствительность (б) тонкой пленки оксида ниобия  $Nb_2O_5$  на кремниевой подложке

Измеренные высокочастотные вольт-фарадные характеристики (ВФХ) на частоте сигнала 100 кГц и 1 МГц демонстрировали типичный для МОП-структур вид. На частоте сигнала 100 кГц наблюдается явная зависимость ВФХ от длины волны воздействующего излучения. Наличие гистерезиса на ВФХ и уменьшение его величины с ростом частоты измерительного сигнала может быть связано с присутствием встроенного заряда, вызванного наличием быстрых поверхностных состояний на границе раздела и в окисле. Присутствие максимума в области модуляции емкости ВФХ (частота сигнала 1 МГц) от 0 до 4 В свидетельствует о присутствии промежуточного нестехоометричного оксида кремния. Наличие промежуточного слоя нестехоометричного оксида кремния и поверхностных состояний может обуславливать повышенную фоточувствительность в ИК- области спектра и наличие максимума спектральной чувствительности на длине волны 800 нм.

### Заключение

Методом высокочастотного лазерного распыления получены нанокристаллические пленки Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> на кремнии со средним перепадом высот 10 нм при среднеквадратичной шероховатости 4 нм. На поверхности пленок обнаружены равномерно расположенные дендриты. Пропускание лазерно-осажденной пленки оксида ниобия на кремниевой подложке в ближней ИК- области спектра резко возрастает от  $T = 1.4\%$  на длине волны  $\lambda = 997$  нм до величины пропускания  $T = 32\%$  на длине волны  $\lambda = 1200$  нм.

При воздействии лазерного излучения в области отрицательных напряжений наблюдается фотоэффект. Фоточувствительность к излучению с длиной волны от 450 нм и выше наблюдается при напряжении смещения - 20 В и в УФ-области (450 нм) и ближней ИК-области (808 нм и 1064 нм) имеет значение порядка 4.5-5 мА/Вт, что демонстрирует возможность использования полученных структур для фотодетекторов.

### Библиографические ссылки

1. Lee C.-C., Tien C.-L., & Hsu J.-C. Internal stress and optical properties of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films deposited by ion-beam sputtering. *Applied Optics* 2002; 41(10): 2043.
2. Reichmann B., Bard A.J. Electrochromism at Niobium Pentoxide Electrodes in Aqueous and Acetonitrile Solutions. *Journal of the Electrochemical Society* 1980; 127(1): 241.
3. Xia J.B., Masaki N., Jiang K.J., Yanagida S.J. Fabrication and characterization of thin Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> blocking layers for ionic liquid-based dye-sensitized solar cells. *Photochem. and Photobiol. A: Chemistry* 2007; 188(1): 120-127.
4. Mary E Gimon-Kinsel, Kenneth J Balkus. Pulsed laser deposition of mesoporous niobium oxide thin films and application as chemical sensors. *Microporous and Mesoporous Materials* 1999; 28(1): 113-123.
5. Salim E.T., Saimon J.A., Abood M.K., & Fakhri M.A. Effect of silicon substrate type on Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Si device performance: an answer depends on physical analysis. *Optical and Quantum Electronics* 2020; 52(10): 463.
6. Минько Л.Я., Чумаков А.Н., Босак Н.А. Об эффективном режиме эрозионного приповерхностного плазмообразования в воздухе при импульсно-периодическом лазерном воздействии. *Квантовая электроника* 1990; 17(11): 1480-1484.