МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК Nb_2O_5

Н.А. Босак[1)], П.В. Шпак[1)], А.Н. Чумаков[1)], Л.В. Баран[2)],
В.В. Малютина-Бронская[3)], В.С. Дробуш[1)], А.С. Кузьмицкая[3)]
[1)]*Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси,*
пр. Независимости 68-2, Минск 220072, Беларусь, n.bosak@ifanbel.bas-net.by
[2)]*Белорусский государственный университет,*
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, baran@bsu.by
[3)]*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,*
пр. Независимости 68, Минск 220072, Беларусь, malyutina@oelt.basnet.by

Проведены исследования тонких пленок оксида ниобия Nb_2O_5, осажденных в вакууме (p = 2.2 Па) на кварцевую и кремниевую подложки при многоимпульсном высокочастотном (f ~ 10-12 кГц) лазерном воздействии на керамическую мишень при плотности мощности лазерного излучения q = 81 МВт/см^2. 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_2O_5 FILMS

N.A. Bosak[1)], P.V. Shpak[1)], A.N. Chumakov[1)], L.V. Baran[2)],
V.V. Malutina-Bronskaya[3)], V.S. Drobush[1)], A.S. Kuzmitskaya[3)]
[1)]*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
[2)]*Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, baran@bsu.by*
[3)]*SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology",*
68 Nezavisimosti Ave., 220072 Minsk, Belarus, malyutina@oelt.basnet.by

Studies of thin Nb_2O_5 films was be done and deposited in vacuum (p = 2.2 Pa) on the silicon substrate under multipulse high-frequency (f ~ 10-12 kHz) laser action on a quartz and ceramic target at a laser power density q = 81 MW/cm^2. 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_2O_5 для возможного применения в фотодетекторных структурах является актуальным [5].

В работе представлены результаты исследования структурных, оптических и электрических свойств тонких пленок оксида ниобия Nb_2O_5, 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 (λ = 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^2 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 инфракрасной области регистрировались с помощью ИК-Фурье-спектрометра NEXUS (Thermo Nicolet) в диапазоне 400-4000см$^{-1}$.

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 Е7-20 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^2 (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-

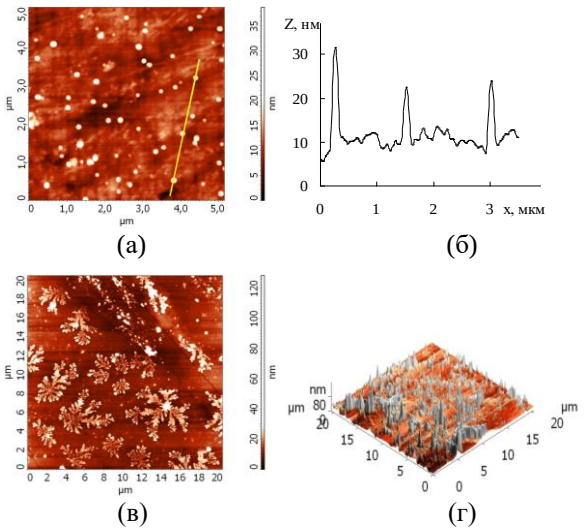

Рис. 1. Морфология поверхности пленки Nb_2O_5 на кварцевой (а, б) и кремниевой (в, г) подложках: а, в –двумерное АСМ-изображение; б – профиль сечения вдоль выделенной линии; г – трехмерное АСМ-изображение

вой подложке в ближней ИК-области спектра (рис. 2, а) резко возрастает от T = 1.4 % на длине волны λ = 997 нм до величины пропускания T = 32 % на длине волны λ = 1200 нм с плавным увеличением до T = 60 % на длине волны λ = 2980 нм. В спектре отражения R пленки оксида ниобия на кремниевой подложке (рис. 2, б) наблюдаются спад от R = 30.4 % на длине волны λ = 192 нм до минимального значения R = 14.4 % на длине волны λ = 368 нм, а также пять максимумов на длинах волн: λ_1 = 288 нм, λ_2 = 330 нм, λ_3 = 407 нм, λ_4 = 560 нм и λ_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 длинной волны от 450 нм и выше. На зависимостсти 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.

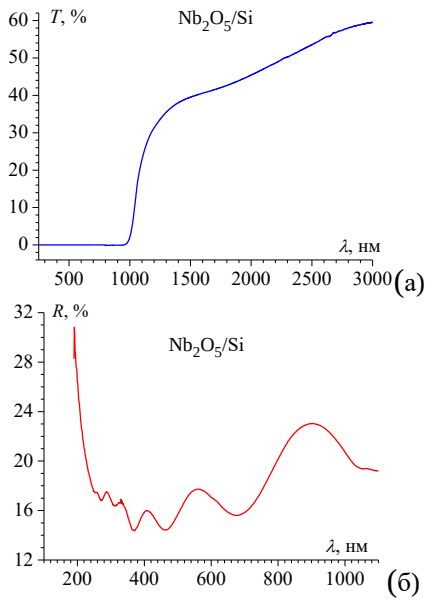

Рис. 2. Спектры пропускания лазерно-осажденной пленки оксида оксида ниобия Nb_2O_5 на кремниевой подложке в видимой и ближней ИК-области (а). Спектры отражения (б) лазерно-осажденной пленки оксида оксида ниобия Nb_2O_5 на кремниевой подложке в видимой и ближней ИК-области

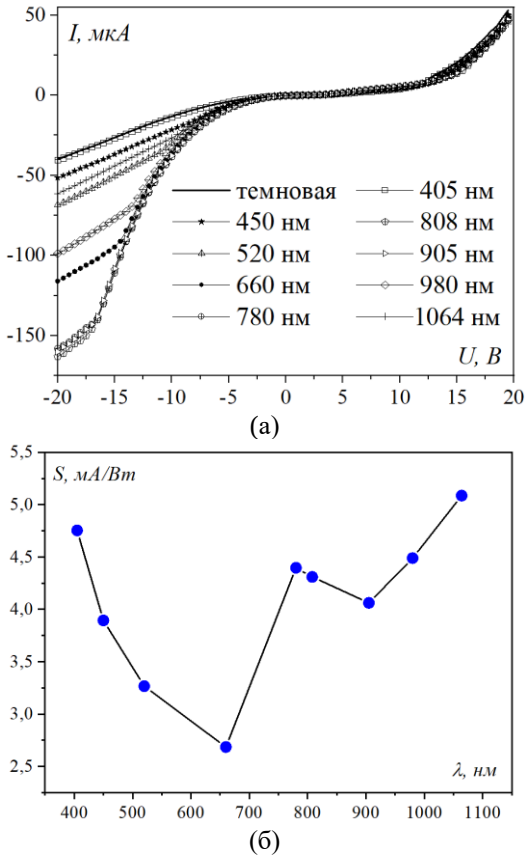

Рис. 3. Вольт-амперные характеристики (*а*) и спектральная чувствительность (*б*) тонкой пленки оксида ниобия Nb_2O_5 на кремниевой подложке

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_2O_5 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 λ = 997 нм до величины пропускания T = 32 % на длине волны λ = 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_2O_5 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_2O_5 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_2O_5/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.