

УДК 539.23+546.883+621.382

МОЛЕКУЛЯРНОЕ НАСЛАИВАНИЕ АДДИТИВНОГО СЛОЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА АНОДИРОВАННЫЕ ОКСИДЫ ТАНТАЛА И НИОБИЯ

© 2024 г. Ю. К. Ежовский^а, * С. В. Михайловский^а^аСанкт-Петербургский Государственный технологический институт (технический университет),
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: ezhovskii@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.2023 г.

После доработки 10.11.2023 г.

Принята к публикации 10.11.2023 г.

Представлены результаты изучения процессов формирования нанослоев оксида кремния методом молекулярного наслаивания (атомно-слоевого осаждения) на поверхности пленок оксидов тантала и ниобия, полученных электрохимическим окислением соответствующих металлов. Исследование электрической прочности структур металл—диэлектрик—металл (МДМ) на основе оксидов тантала и ниобия показало, что введение аддитивного слоя диэлектрика (SiO_2) позволяет значительно повысить электрическую прочность указанных структур.

Ключевые слова: молекулярное наслаивание, атомно-слоевое осаждение, анодное окисление, SiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , МДМ, зарашивание пор, электрическая прочность

DOI: 10.31857/S0544126924010093

1. ВВЕДЕНИЕ

Оксиды тантала и ниобия как материалы с высокой диэлектрической проницаемостью широко исследуются и используются в качестве диэлектриков в изделиях различного назначения (конденсаторы, мемристоры, сенсоры и др.) [1–8], в том числе в структурах металл—диэлектрик—металл (МДМ) в микроэлектронике.

Одной из важнейших технических характеристик структур металл—диэлектрик—металл и приборов на их основе является устойчивость к катастрофическим отказам вследствие пробоя. Явление пробоя определяется качеством диэлектрической изоляции и в значительной степени ограничивает рабочее напряжение полевых приборов и стабильность их работы под нагрузкой.

Установлено, что в некристаллических диэлектриках основную роль играют: собственно электрический пробой, характеризующий максимальную электрическую прочность объема однородного материала и имеющий электронный характер; лавинный пробой в малых микрокристаллических областях диэлектрика и пробой в дефектных местах (микропорах, примесях, газовых включениях и т.д.) [1, 9–11]. Для оксидно-металлических систем на основе оксида тантала пробой может происходить в “слабых” местах при напряжениях значительно ниже тех, которые вызывают искрение

при формовке структуры [11]. Поэтому, в отличие от систем металл—оксид—электролит, где может происходить процесс доформовки (“залечивания”) слабых мест диэлектрика, в системах МДМ основную роль в развитии пробоя играют микродефекты структурного характера: неравномерность слоя диэлектрика по толщине, микротрещины, поры. Образование указанных микродефектов происходит еще на стадии получения диэлектрических слоев традиционными методами. Природа этих дефектов, их количественные параметры, такие, например, как эффективные размеры, плотность распределения, для тантал- и ниобий-оксидных пленок, полученных анодным окислением, были исследованы еще в 70-е годы прошлого века в ряде работ, например [12–15].

Улучшить характеристики диэлектриков можно за счет использования двухслойных (многослойных) диэлектрических систем [6, 16–18], в том числе за счет снижения влияния пористой структуры диэлектрика. Однако наличие дополнительного “залечивающего” слоя, толщина которого соизмерима с толщиной первого, приводит к нежелательному изменению ряда параметров, например, к резкому снижению удельной емкости структур. Кроме того, такие дефекты как микротрещины и поры в этом случае не заполняются вторым диэлектриком, а лишь перекрываются им, создавая включения пониженной плотности. Указанные недостатки

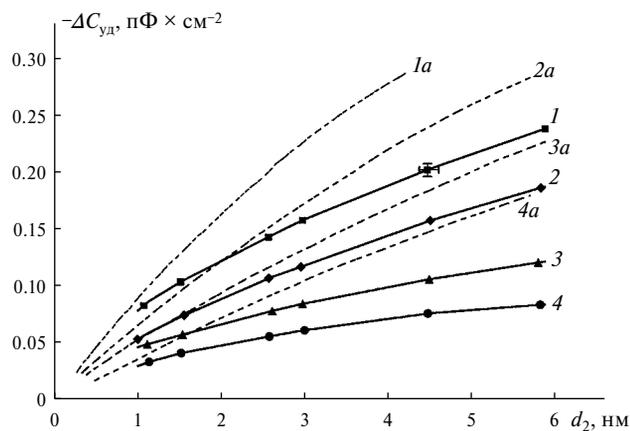


Рис. 1. Изменение удельной емкости МДМ-структур от толщины аддитивного слоя d_2 для структур $(Nb_2O_5 + SiO_2)$: 1–4 — экспериментальные кривые для толщин основного диэлектрика (Nb_2O_5) $d_1 = 100, 150, 200$ и 250 нм соответственно; 1a–4a — расчетные кривые для тех же толщин.

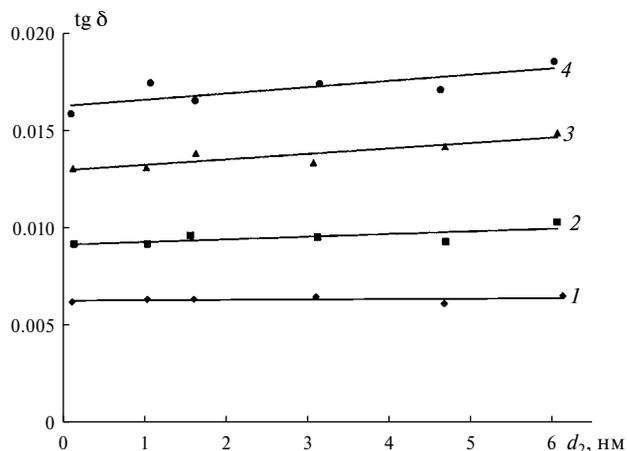


Рис. 2. Влияние толщины аддитивного слоя d_2 на тангенс угла диэлектрических потерь: прямые 1, 2 — $(Ta_2O_5 + SiO_2)$; 3, 4 — $(Nb_2O_5 + SiO_2)$; 1, 3 — $d_1 = 250$ нм; 2, 4 — $d_1 = 100$ нм.

аддитивного слоя диэлектрика обусловлены применением традиционных методов получения пленок. В последние десятилетия для создания качественных тонких и ультратонких слоев в технологии субмикронных элементов электронной техники стали широко использоваться процессы химической нанотехнологии, позволяющие создавать слои нанометровой толщины. Один из этих методов — “молекулярное наслаивание” (МН) [19, 20], или “атомно-слоевая эпитаксия” [21], а в настоящее время именуемый также как “атомно-слоевое осаждение” или “ALD-технология” [22]. Этот метод позволяет выращивать ультратонкие пленки последовательной сборкой структурных единиц твердого вещества от слоя к слою на всей поверхности матрицы-подложки и тем самым не только существенно изменять физико-химические свойства поверхности, но и регулировать пористую структуру матрицы [23]. Таким образом, синтез слоя толщиной d методом молекулярного наслаивания позволяет практически полностью “залечить”, т.е. зарастить в матрице, в том числе в пористом диэлектрике, поры (микропоры) с эффективным диаметром $2d$ по всей их длине или по большей ее части. При этом будут образовываться равномерные конформные пленки, а не отдельные кристаллиты или аморфные частицы.

В настоящей работе рассматривается влияние ультратонких (до 10 нм) пленок диоксида кремния, полученных методом молекулярного наслаивания на диэлектрических анодных оксидных пленках Ta_2O_5 и Nb_2O_5 , и некоторые электрические характеристики полученных МДМ-структур.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Пленки оксидов тантала и ниобия получали анодированием вакуумно-напыленных на ситалл пленок соответствующих металлов в 5%-ном водном растворе H_3PO_4 в смешанном режиме [11]. Плотность тока на первой стадии анодирования составляла 0.5 А/см^2 , температура электролита около 10°C . Толщину анодированных оксидов контролировали по напряжению формовки с точностью до 10 нм. Слой неокисленного металла служил одним из электродов.

Синтез нанослоев диоксида кремния осуществляли методом молекулярного наслаивания при попеременной обработке поверхности окисленного слоя металла парами хлорида кремния и воды при температуре 250°C без активатора [24, 25]. Толщину слоя контролировали эллипсометрически по образцам, полученным на неанодированных металлических матрицах, содержащих слой естественного оксида толщиной 2–3 нм [20], модифицированным параллельно основным образцам.

В качестве второго электрода при изучении электрофизических свойств структур МДМ использовался слой золота, нанесенный термическим испарением металла в вакууме не ниже 5×10^{-3} Па. Измерения емкостных характеристик и тангенса диэлектрических потерь ($tg \delta$) осуществляли на частоте 1 кГц. Электрическую прочность определяли по методике регистрации частичных микропробоев [9] при подаче линейно нарастающего напряжения через ограничительный резистор со скоростью нарастания около 5 В/с. Напряжение пробоя фиксировали цифровым вольтметром с точностью до 0.1 В. Одновременно проводили визуальное наблюдение кратеров пробоя в целях исключения повторных пробоев по местам предыдущих.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для теоретической оценки влияния второго слоя диэлектрика на электрические характеристики модифицированных систем использовали модель двухслойного диэлектрика [26], и полученные расчетные результаты сопоставляли с экспериментальными данными. При этом предполагалось, что при толщинах аддитивного слоя SiO_2 более 1 нм пленку диоксида кремния в первом приближении можно характеризовать свойствами объемного материала.

Сравнение изменения расчетных и экспериментальных данных удельных емкостей систем $\text{Ta} / \text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2 / \text{Au}$ (для краткости — $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$) и $\text{Nb} / \text{Nb}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2 / \text{Au}$ (для краткости — $\text{Nb}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$) для различных значений толщины основного (d_1) и дополнительного (d_2) слоев диэлектриков показало, что для систем $\text{SiO}_2 / \text{Ta}_2\text{O}_5$ наблюдается практически полное совпадение этих значений (расхождения не превышают 5%); это указывает на возможную адекватность принятых допущений. Для системы $\text{SiO}_2 / \text{Nb}_2\text{O}_5$ были обнаружены некоторые расхождения (рис. 1). Все отклонения экспериментальных значений удельной емкости от расчетных ($C_{\text{расч}} - C_{\text{эксп}}$) для данной системы имеют отрицательные значения. Это можно объяснить уменьшением эффективной толщины d_1 основного слоя диэлектрика. Уменьшение d_1 может происходить за счет деградационных процессов как в объеме диэлектрика, так и на границе электрод—аниодированный оксид. Возможно, это происходит за счет травления оксида ниобия в процессе синтеза SiO_2 как самим SiCl_4 и образующимся в реакциях молекулярного наслаивания HCl , так и вторичным NbCl_5 , с образованием, в итоге, летучего в условиях синтеза NbOCl_3 [27, 28].

Результаты измерения диэлектрических потерь (рис. 2) показали, что если для системы $\text{Ta}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$ $\text{tg}\delta$ практически не изменяется с увеличением толщины аддитивного слоя d_2 , то в случае $\text{Nb}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$ возрастание потерь достигает 8% первоначального значения. Это указывает на возможное разложение оксида ниобия в объеме с выделением проводящих компонентов, обусловленное его малой термической стабильностью. В результате в условиях синтеза SiO_2 при повышенной температуре деградационные процессы протекают с заметной скоростью и оказывают существенное влияние на проводимость диэлектрического слоя. Не исключено и термическое восстановление оксидов с более низкими степенями окисления Nb на границе раздела электрод — аниодированный оксид, вызывающее уменьшение физической толщины основного диэлектрика.

Исследование электрической прочности МДМ-структур на основе оксидов тантала и ниобия с аддитивным слоем SiO_2 показало, что несмотря на указанные выше процессы, вызванные, по-видимому, температурным воздействием при синтезе слоев SiO_2 , введение аддитивного слоя позволяет значительно повысить пробивную напряженность

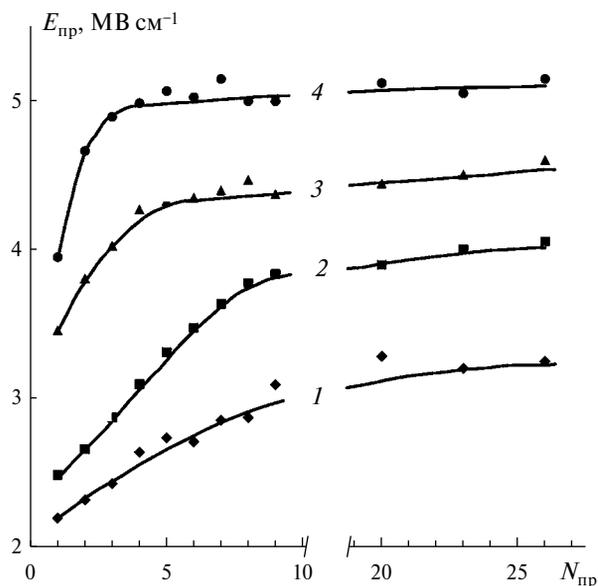


Рис. 3. Зависимость пробивной напряженности поля от числа микропробоев в структурах с однослойным (1, 3) и двухслойным (2, 4) диэлектриком толщиной $d_2 = 4$ нм: 1 — Nb_2O_5 ; 2 — $(\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{SiO}_2)$; 3 — Ta_2O_5 ; 4 — $(\text{Ta}_2\text{O}_5 + \text{SiO}_2)$.

электрического поля ($E_{\text{пр}}$). Типичные зависимости пробивной напряженности поля $E_{\text{пр}}$ от числа микропробоев представлены на рис. 3. Повышение электрической прочности с увеличением числа пробоев указывает на преобладающую роль в явлении пробоя мелких дефектов типа микропор, поскольку первые пробой определяются наиболее грубыми дефектами (трещинами, загрязняющими включениями). Очевидно, что нанослой диоксида кремния толщиной d_2 , получаемые методом молекулярного наслаивания, способны зарашивать поры с эффективным диаметром $\leq 2d_2$, в то время как дефекты больших размеров будут лишь частично заполнены, что не исключает инъекции носителей через тонкий слой SiO_2 за счет безактивационного перехода.

Математическая обработка результатов измерений $E_{\text{пр}} = f(N_{\text{пр}})$ на участке постоянной электрической прочности $E_{\text{пр(макс)}}$ для систем с различными d_1 и d_2 позволила установить зависимость $E_{\text{пр}} = f(d_1, d_2)$, имеющую в ряде случаев четко выраженный максимум (рис. 4). Полученные данные показывают, что при исключении влияния грубых дефектов основного диэлектрика аддитивный слой значительно меньшей толщины, чем d_1 увеличивает электрическую прочность практически вдвое. Это может быть вызвано, как уже указывалось, “залечивающим” действием тонкого слоя оксида кремния, а также особенностями распределения зарядов в двухслойной системе диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями ϵ . Не исключено и влияние блокирующего действия слоя SiO_2 на инжектирующий металлический электрод. Однако характер зависимости $E_{\text{пр}} = f(d_1, d_2)$ для различных

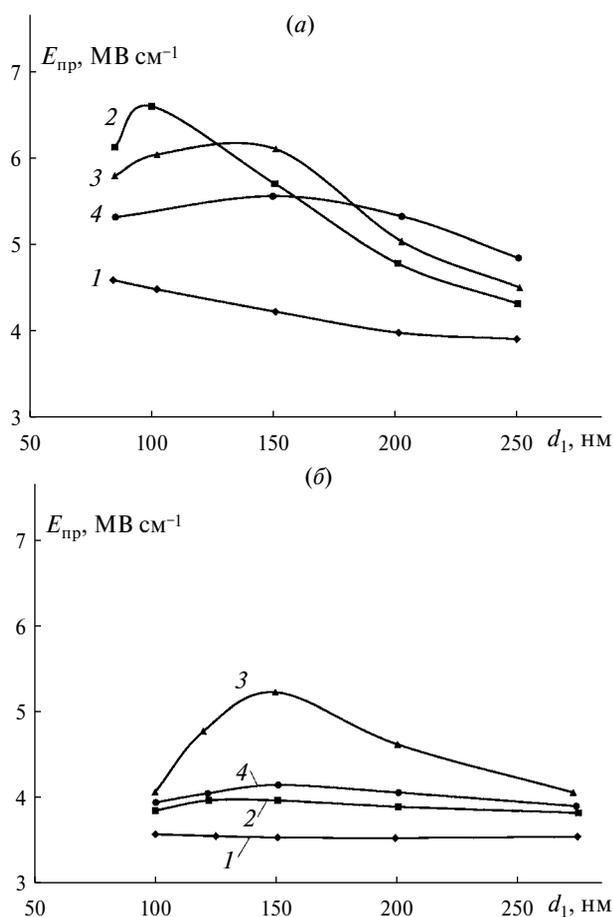


Рис. 4. Зависимость электрической прочности от толщины анодного диэлектрика для структур Ta/Ta₂O₅/SiO₂/Au (a) и Nb/Nb₂O₅/SiO₂/Au (б); кривые: 1 — $d_2 = 0$; 2 — $d_2 = 3$ нм; 3 — $d_2 = 5$ нм; 4 — $d_2 = 7,5$ нм.

толщин аддитивного слоя показывает, что наличие характерного максимума, вызвано, скорее всего, дефектностью исходного анодированного оксида. Естественно, если пленки Ta₂O₅ и Nb₂O₅ меньших толщин обладают более плотной структурой, на что указывает и их более высокая электрическая прочность (кривая 1, рис. 4, а, б), то для их “уплотнения” (т.е. заравнивания микропористых дефектов) требуется и меньшая толщина аддитивного слоя. Характерным является и то, что с увеличением d_2 максимум электрической прочности сдвигается в сторону больших толщин d_1 , что особенно наглядно проявляется для диэлектрика Ta₂O₅. В случае же Nb₂O₅, где существенное влияние оказывают деградиационные процессы, характер возрастания $E_{пр}$ выражен слабее. В исследуемом интервале толщин d_1 удалось зафиксировать существенное возрастание $E_{пр}$ только для толщины оксида ниобия ≈ 150 нм.

Исходя из предложенного механизма заравнивания микродефектов в анодированных пленках ультратонким аддитивным слоем, его толщина в точке максимума $E_{пр}$ отражает максимум в распределении

этих микродефектов по размерам. Если считать, как уже отмечалось, что развитие пробоя в анодированных пленках Ta₂O₅ и Nb₂O₅ начинается по порам, то полученные данные позволяют оценить их эффективный диаметр. Для большей части микропор в анодированных пленках толщиной 90–250 нм для Ta₂O₅ и 100–280 нм для Nb₂O₅ он составляет 10–40 нм, что хорошо согласуется с данными, полученными методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей [12]. Повышенная проводимость по порам может быть вызвана остатками электролита либо сорбированной водой, протонизированной индуцирующим влиянием поверхности оксида. Заполнение микропор другим диэлектриком, в частности, диоксидом кремния, позволяет значительно уменьшить влияние этих факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность двукратного повышения электрической прочности МДМ-структур с оксидами тантала и ниобия, полученными анодированием металлов и молекулярным наслаиванием аддитивного слоя диоксида кремния толщиной до 10 нм, без существенного изменения диэлектрических потерь.

Исходя из вероятных причин характера изменения электрических характеристик полученных систем в зависимости от толщин основного и аддитивного диэлектрика, сделан вывод о возможности оценки эффективного диаметра таких структурных дефектов как микропоры в пленках анодированных оксидов тантала и ниобия по толщине аддитивного слоя, при котором проявляется максимальная электрическая прочность структуры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в Первом всероссийском инжиниринговом центре технологии молекулярного наслаивания СПбГТИ(ТУ) при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ (Соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2021-028).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачев И.П., Саунов А.А. Метод выявления внутренних дефектов танталовых конденсаторов для снижения количества отказов аппаратуры // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2019. Т. 6. Вып. 1. С. 94–101.
2. Mbisike S.C., Tsiamis A., Lomax P., Cheung R. Anodic tantalum: Fabrication, breakdown characteristics of capacitor and

- integration with a WSe₂ field effect transistor // *Solid State Electronics*. 2022. V. 196. P. 108423. 4 p. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2022.108423>
3. *Baldomá S.B., Pazos S.M., Aguirre F.L. et al.* Wear-out and breakdown of Ta₂O₅ / Nb: SrTiO₃ stacks // *Solid State Electronics*. 2022. V. 198. P. 108462, 6 p. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2022.108462>
 4. *Raeis-Hosseini N., Chen Sh., Papavassiliou Ch., Valov I.* Impact of Zr top electrode on tantalum oxide-based electrochemical metallization resistive switching memory: towards synaptic functionalities // *RSC Adv*. 2022. V. 12. Iss. 22. P. 14235–14245. <https://doi.org/10.1039/d2ra02456j>
 5. *Molinnus D., Iken H., Johnen A. et al.* Miniaturized pH-Sensitive Field-Effect Capacitors with Ultrathin Ta₂O₅ Films Prepared by Atomic Layer Deposition // *Phys. Status Solidi A*. 2022. V. 219. Iss. 8. P. 2100660, 9 p. <https://doi.org/10.1002/psa.202100660>
 6. *Cho K., Lee J., Lim J.-S. et al.* Low temperature crystallized Ta₂O₅/Nb₂O₅ bi-layers integrated into RIR capacitor for 60 nm generation and beyond // *Microelectronic Engineering*. 2005. V. 80. P. 317–320. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2005.04.032>
 7. *Störmer H., Weber A., Fischer V. et al.* Anodically formed oxide films on niobium: Microstructural and electrical properties // *Journal of the European Ceramic Society*. 2009. V. 29. Iss. 9. P. 1743–1753. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.10.019>
 8. *Atanassova E., Paskaleva A., Novkovski N.* Effects of the metal gate on the stress-induced traps in Ta₂O₅/SiO₂ stacks // *Microelectronics Reliability*. 2008. V. 48. Iss. 2. P. 514–525. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.10.008>
 9. *Воробьев Г.А., Мухачев В.А.* Пробой тонких диэлектрических пленок. М.: Сов. Радио, 1977. 72 с.
 10. *McCaughan D.V., Heiling J.A.* Dielectric strength and interface-state behaviour of oxygen plasma-grown SiO₂ films annealed at high temperature // *Int. J. Electron.* 1973. V. 34. № 3. P. 737–740. <https://doi.org/10.1080/00207217308938492>
 11. *Дель-Ока С., Пулфри Д., Юнг Л.* Анодные окисные пленки. В кн. “Физика тонких пленок. Современное состояние исследований и технические применения”. Т. 6 / под общ. ред. М.Х. Франкомба, Р.У. Гофмана; пер. с англ. под ред. В.Б. Сандомирского. М.: Мир, 1973. 392 с.
 12. *Алешина Л.А.* Исследование анодных окисных пленок Nb₂O₅ и Ta₂O₅ методом малоуглового рассеяния рентгеновских лучей // В сб. “Анодные окисные пленки”, Петрозаводск, 1978. С. 30–35.
 13. *Прокопчук К.М.* Некоторые закономерности пробоя анодных пленок в системе металл–окисел–металл // В сб. “Анодные окисные пленки”. Петрозаводск, 1978. С. 150–157.
 14. *Одынец Л.Л., Чекмасова С.С.* Дефекты в анодных окисных пленках на тантале // *Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты*. 1976. Вып. 6 (19). С. 29.
 15. *Букацелло А.В., Васильев М.С., Канабеева М.Г.* Исследование дефектности пленок пентаоксида ниобия и ее влияния на электрические свойства ниобиевых тонкопленочных конденсаторов // *Известия ЛЭТИ*. 1976. Вып. 185. С. 64.
 16. *Sato A., Sato Sh., Okamoto E.* Thin Film SiO₂ Deposition by RF Sputtering onto the Anodic Ta₂O₅ Film // *Shinku*. 1975. V. 18. No. 7. C. 231–235.
 17. *Sato Sh., Sato A., Okamoto E.* An SiO₂–Ta₂O₅ Thin Film Capacitor // *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*. 1973. V. 9. No. 3. P. 161–166. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1136730>
 18. *Hanbya B., Sturta B., Gimeno-Fabra M. et al.* Layered Al₂O₃–SiO₂ and Al₂O₃–Ta₂O₅ thin-film composites for high dielectric strength, deposited by pulsed direct current and radio frequency magnetron sputtering // *Applied Surface Science*. 2019. V. 492. P. 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.06.202>
 19. *Алесковский В.Б.* Химическая сборка материалов // *Вестн. АН СССР*. 1975. № 6. С. 48–52.
 20. *Ежовский Ю.К., Михайловский С.В.* Молекулярное наслаивание оксидных наноструктур на поверхности металлических матриц // *Микроэлектроника*. 2022. Т. 51. № 2. С. 110–117.
 21. *Suntola T.* Atomic Layer Epitaxy // *Mater. Sci. Rep*. 1989. V. 4. Iss. 5. P. 261–312. [https://doi.org/10.1016/S0920-2307\(89\)80006-4](https://doi.org/10.1016/S0920-2307(89)80006-4)
 22. *Ahvenniemi E., Akbashev A.R., Ali S. et al.* Review article: recommended reading list of early publications on atomic layer deposition — outcome of the “Virtual project on the history of ALD” // *J. Vac. Sci. Technol*. 2017. V. 35. Iss. 1. P. 010801. 13 p. <https://doi.org/10.1116/1.4971389>
 23. *Малыгин А.А., Малков А.А., Михайловский С.В. и др.* Оптимизация свойств неорганических каталитических мембран с использованием нанотехнологии молекулярного наслаивания // *Российские нанотехнологии*. Т. 5. № 3–4. С. 5–10.
 24. *Ежовский Ю.К.* Получение наноструктурных пленок оксида и нитрида кремния с использованием нанотехнологии // *Неорган. матер*. 2013. Т. 49. № 9. С. 971–975.
 25. *Ежовский Ю.К.* Химическая сборка поверхностных наноструктур // *Хим. физика*. 2005. Т. 24. № 4. С. 36–57.
 26. *Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т. 1 / под ред. Ю. В. Корицкого и др. 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1986. 368 с.*
 27. *Knapas K., Rahtu A., Ritala M.* Etching of Nb₂O₅ Thin Films by NbCl₅ // *Chemical Vapor Deposition*. 2009. V. 15. Iss. 10–12. P. 269–273. <https://doi.org/10.1002/cvde.200906795>
 28. *Elers K.-E., Ritala M., Leskeli M., Rauhala E.* NbCl₅ as a precursor in atomic layer epitaxy // *Applied Surface Science*. 1994. V. 82–83. P. 468–474. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(94\)90260-7](https://doi.org/10.1016/0169-4332(94)90260-7)

MOLECULAR LAYERING OF AN ADDITIVE LAYER OF SILICON DIOXIDE ON ANODIZED TANTALUM AND NIOBIUM OXIDES

© 2024 Yu. K. Ezhovskii^a, S. V. Mikhailovskii^a

^aSt. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg, Russia

The results of studying the processes of formation of nanolayers of silicon oxide by the method of molecular layering (atomic layer deposition) on the surface of films of tantalum and niobium oxides obtained by electrochemical oxidation of the corresponding metals are presented. A study of the electrical strength of metal-

dielectric-metal (MDM) structures based on tantalum and niobium oxides showed that the introduction of an additive dielectric layer (SiO_2) can significantly increase the electrical strength of these structures.

Keywords: molecular layering, atomic layer deposition, anodic oxidation, SiO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , MDM, pore filling, dielectric strength

REFERENCES

1. *Gorbachev I.P., Sashov A.A.* Method for identifying internal defects in tantalum capacitors to reduce the number of equipment failures // Rocket and space instrument making and information systems. 2019. T. 6. Iss. 1. P. 94–101.
2. *Mbisike S., Tsiamis A., Lomax P., Cheung R.* Anodic tantalum: Fabrication, breakdown characteristics of capacitor and integration with a WSe_2 field effect transistor // Solid State Electronics. 2022. V. 196. P. 108423. 4 p. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2022.108423>
3. *Baldomá S.B., Pazos S.M., Aguirre F.L. et al.* Wear-out and breakdown of Ta_2O_5 / Nb: SrTiO_3 stacks // Solid State Electronics. 2022. V. 198. P. 108462. 6 p. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2022.108462>
4. *Raeis-Hosseini N., Chen Sh., Papavassiliou Ch., Valov I.* Impact of Zr top electrode on tantalum oxide-based electrochemical metallization resistive switching memory: towards synaptic functionalities // RSC Adv. 2022. V. 12. Iss. 22. P. 14235–14245. <https://doi.org/10.1039/d2ra02456j>
5. *Molinnus D., Iken H., Johnen A. et al.* Miniaturized pH-Sensitive Field-Effect Capacitors with Ultrathin Ta_2O_5 Films Prepared by Atomic Layer Deposition // Phys. Status Solidi A. 2022. V. 219. Iss. 8. P. 2100660. 9 p. <https://doi.org/10.1002/pssa.202100660>
6. *Cho K., Lee J., Lim J.-S. et al.* Low temperature crystallized $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Nb}_2\text{O}_5$ bi-layers integrated into RIR capacitor for 60 nm generation and beyond // Microelectronic Engineering. 2005. V. 80. P. 317–320. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2005.04.032>
7. *Störmer H., Weber A., Fischer V. et al.* Anodically formed oxide films on niobium: Microstructural and electrical properties // Journal of the European Ceramic Society. 2009. V. 29. Iss. 9. P. 1743–1753. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.10.019>
8. *Atanassova E., Paskaleva A., Novkovski N.* Effects of the metal gate on the stress-induced traps in Ta_2O_5 / SiO_2 stacks // Microelectronics Reliability. 2008. V. 48. Iss. 2. P. 514–525. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.10.008>
9. *Vorobyov G.A., Mukhachev V.A.* Breakdown of thin dielectric films. M.: Sov. Radio, 1977. 72 p.
10. *McCaughan D.V., Heiling J.A.* Dielectric strength and interface-state behaviour of oxygen plasma-grown SiO_2 films annealed at high temperature // Int. J. Electron. 1973. V. 34. No. 3. P. 737–740. <https://doi.org/10.1080/00207217308938492>
11. *Dell’Oca S., Pulfrey D., Jung L.* Anodic oxide films. In the book. Physics of thin films. Current state of research and technical applications. T. 6 / Under general ed. M. X. Francomba, R. W. Hoffmann. Translation from English edited by V.B. Sandomirsky, M.: Mir, 1973. 392 p.
12. *Aleshina L.A.* Study of anodic oxide films Nb_2O_5 and Ta_2O_5 by small-angle X-ray scattering // In collection “Anodic oxide films”. Petrozavodsk, 1978. P. 30–35.
13. *Prokopchuk K.M.* Some patterns of breakdown of anodic films in the metal—oxide—metal system. On Sat. “Anodic oxide films”. Petrozavodsk, 1978. P. 150–157.
14. *Odynets L.L., Chekmasova S.S.* Defects in anodic oxide films on tantalum. Electronic equipment. Ser. 5. Radio parts and radio components. 1976. V. 6 (19). P. 29.
15. *Bukatsello A.V., Vasiliev M.S., Kanabeeva M.G.* Study of the defectiveness of niobium pentoxide films and its effect on the electrical properties of niobium thin-film capacitors // Izvestia LETI. 1976. Iss. 185. P. 64.
16. *Sato A., Sato Sh., Okamoto E.* Thin Film SiO_2 Deposition by RF Sputtering onto the Anodic Ta_2O_5 Film // Shinku. 1975. V. 18. No. 7. C. 231–235.
17. *Sato Sh., Sato A., Okamoto E.* An SiO_2 — Ta_2O_5 Thin Film Capacitor // IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging. 1973. V. 9. No. 3. P. 161–166. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1136730>
18. *Hanbya B., Stuarda B., Gimeno-Fabra M. et al.* Layered Al_2O_3 — SiO_2 and Al_2O_3 — Ta_2O_5 thin-film composites for high dielectric strength, deposited by pulsed direct current and radio frequency magnetron sputtering // Applied Surface Science. 2019. V. 492. P. 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.06.202>
19. *Aleskovsky V.B.* Chemical assembly of materials // Vestn. Academy of Sciences of the USSR. 1975. No. 6. P. 48–52.
20. *Ezhovskiy Yu.K., Mikhailovsky S.V.* Molecular layering of oxide nanostructures on the surface of metal matrices // Microelectronics. 2022. T. 51. No. 2. P. 110–117.
21. *Suntola T.* Atomic Layer Epitaxy // Mater. Sci. Rep. 1989. V. 4. Iss. 5. P. 261–312. [https://doi.org/10.1016/S0920-2307\(89\)80006-4](https://doi.org/10.1016/S0920-2307(89)80006-4).
22. *Ahvenniemi E., Akbashev A.R., Ali S. et al.* Review article: recommended reading list of early publications on atomic layer deposition — outcome of the “Virtual project on the history of ALD” // J. Vac. Sci. Technol. 2017. V. 35. Iss. 1. P. 010801. 13 p. <https://doi.org/10.1116/1.4971389>
23. *Malygin A.A., Malkov A.A., Mikhailovsky S.V. et al.* Optimization of the properties of inorganic catalytic membranes using nanotechnology of molecular layering // Russian Nanotechnologies. V. 5. No. 3–4. P. 5–10.
24. *Yezhovskiy Yu.K.* Preparation of nanostructured films of silicon oxide and nitride using nanotechnology // Inorganic mater. 2013. T. 49. No. 9. P. 971–975.
25. *Yezhovskiy Yu.K.* Chemical assembly of surface nanostructures // Chem. Physics. 2005. T. 24. No. 4. P. 36–57.
26. Handbook of electrical materials: 3 vols. T. 1 / Ed. Yu.V. Koritsky and others. 3rd ed., revised. M.: Energoatomizdat, 1986. 368 p.
27. *Knapas K., Rahtu A., Ritala M.* Etching of Nb_2O_5 Thin Films by NbCl_5 // Chemical Vapor Deposition. 2009. V. 15. Iss. 10–12. P. 269–273. <https://doi.org/10.1002/cvde.200906795>
28. *Elers K.-E., Ritala M., Leskeli M., Rauhala E.* NbCl_5 as a precursor in atomic layer epitaxy // Applied Surface Science. 1994. V. 82–83. P. 468–474. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(94\)90260-7](https://doi.org/10.1016/0169-4332(94)90260-7)