

2 Ciazynski D., Duchateau J., Decool P., Libeyre P., Turck B. Large superconductors and joints for fusion magnets. From conceptual design to testing at full scale. Nuclear fusion, Vol 41, Nr. 2, 2001, IAEA: p. 223-226.

3 М.В. Хомяков, И.А. Якобсон. Термитная сварка многопроволочных проводов линий электропередачи и подстанций. 2-е издание. Москва, Госэнергоиздат, 1963. 80 с.

4 Višniakov N, Novickij J, Ščekaturovienė D, Petrauskas A. 2011. Quality Analysis of Welded and Soldered Joints of Cu-Nb Microcomposite Wires. Materials Science. 2011; Vol. 17(1): p. 16-19.

УДК 621.794.4:661.862.22

Н.В. Богомазова, доц., канд. хим. наук;
А.В. Пянко, асп.; А.Н. Мурашкевич, проф., д-р техн. наук
(БГТУ, г. Минск),

Г.Г. Горох, доц., канд. техн. наук (БГУИР, г. Минск)

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАТРИЧНО-
ПЛЕНОЧНЫХ ХЕМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
СКВОЗНОГО АНОДИРОВАНИЯ Al**

Разработка технологий производства современных электронных структур и изделий зачастую связана с усложнением состава предлагаемых материалов, а также с комбинированием физико-химических процессов, используемых на конкретных этапах многостадийного маршрута изготовления финишных многофункциональных устройств. Традиционные физические или химические процессы обработки и модифицирования поверхностей уступают место более сложным физико-химическим процессам, предполагающим протекание целевых химических превращений при активирующем воздействии электрических и магнитных полей, оптического излучения, ультразвука, плазмы и других факторов. Кроме того, среди современных технологических подходов к производству электронных устройств все более весомое значение приобретают самоорганизующиеся процессы формирования целевых структур и материалов на их основе, таких как пористые анодные оксидные пленки и мембраны, пористый кремний, массивы нанокристаллов и другие. Актуальным примером таких процессов, в том числе при производстве и разработке электронных устройств различного назначения, является технология самоупорядоченного роста пористой оксидной матрицы при анодировании алюминия [1, 2].

Целью данной работы являлось получение на поверхности традиционной для микро- и наноэлектроники кремниевой подложки мно-

гослойной структуры, включающей, во-первых, пористую диэлектрическую матрицу с развитой упорядоченной топологией, и, во-вторых, тонкий функциональный оксидный слой, проявляющий хемочувствительность по отношению к химически активным газам, распределенным в воздушной среде.

Для решения первой задачи в наших экспериментах использовалась электрохимическая технология самоорганизованного роста упорядоченного пористого оксида алюминия при сквозном анодировании субмикронных алюминиевых пленок, напыленных на поверхность кремниевых пластин КЭФ-4,5 или КДБ-10 [3]. Двухстадийное анодирование алюминиевых пленок с исходной толщиной 1-1,5 мкм проводили в 0,3-0,5 М растворах малоновой кислоты в вольтстатическом режиме. Такие условия обеспечивали формирование ячеисто-пористой структуры анодной оксидной пленки со средним диаметром пор в диапазоне 100-200 нм и средним размером ячейки – 500 нм, что благоприятствует конформному нанесению функциональных хемочувствительных покрытий. Другие опробованные режимы анодирования алюминиевых пленок приводили в образованию пор либо заметно меньшего диаметра, например, в щавелевой кислоте, либо существенно большего диаметра, например, в винной кислоте (рисунок 1).

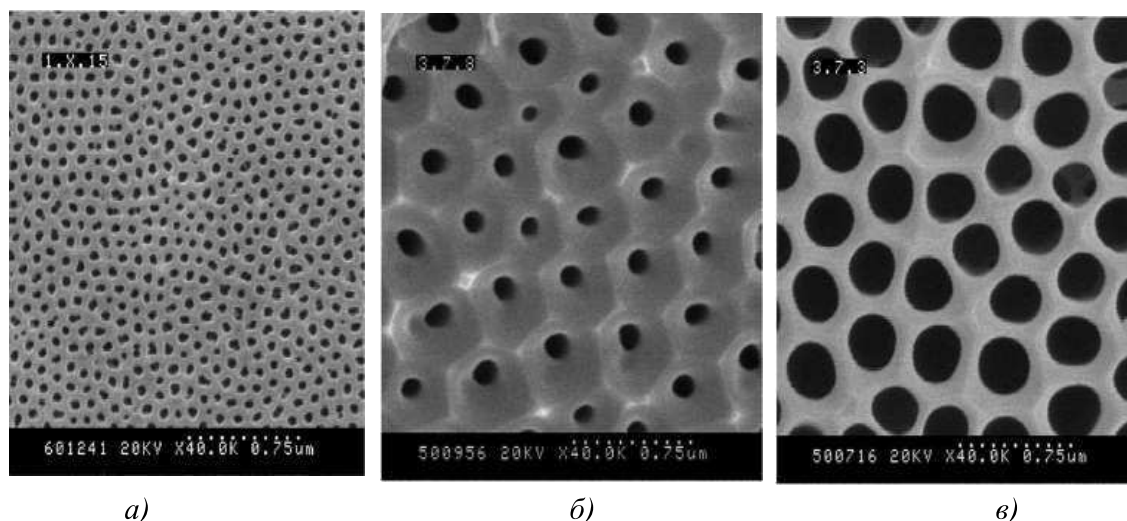


Рисунок 1 – Микроскопические изображения поверхности пленок анодного оксида алюминия, сформированных в растворах щавелевой (а), малоновой (б) или винной (в) кислоты

Для решения задачи формирования функционального пленочного покрытия на основе оксидов ряда металлов, в частности Ti, Sn, W, Mo, Zn и других, в диэлектрической матрице нами использовались как химические, так и электрохимические методы. Нанесение пленок на профилированные подложки осуществлялось, в частности, методами осаждения из пленкообразующих растворов или зольей, молекулярного

и ионного наплаивания, электроосаждения из растворов, электрофоретического нанесения из золей, ультразвукового осаждения.

В частности, при формировании функционального слоя на основе системы $\text{Sn}_x\text{Zn}_y\text{O}_z$ для металлов использовали различные методы заполнения матричной оксидноалюминиевой структуры. Вначале проводили электрохимическое окисление $\text{Sn}^{2+} \rightarrow \text{Sn}^{4+}$ в 1% растворе SnSO_4 на поверхности пористой структуры АОА с осаждением гидроксидов олова(IV) в порах АОА и последующим дегидратационным отжигом. Вторая стадия заключалась в химическом осаждении гидроксида цинка на поверхности сформированного оксида олова (IV) при обработке подложек в 0,01 М растворе ZnSO_4 и 1% растворе KOH . Окончательный отжиг проводили при температуре 750°C в течение 30 мин.

Для формирования пленок TiO_2 на пористую матрицу анодного оксида алюминия нами использовалось нанесение из пленкообразующих растворов или золей методом либо химического осаждения, либо электрофоретического осаждения. При электрофоретическом осаждении получены пленки островкового типа с блочной структурой. В то же время данные оптической микроскопии позволяют зафиксировать, что пленки полученные методом наплаивания характеризуются повышенной однородностью модификации профилированной поверхности в сравнении с методом обработки в пленкообразующих растворах, для которых в свою очередь использование ультразвука оказывало благоприятное структурирующее воздействие.

Наиболее равномерное заполнение пор матричного анодного оксида алюминия достигнуто нами при получении функциональных пленок методом ионного наплаивания [4] с образованием сплошного функционального покрытия в рамках структур $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Sn}_x\text{Mo}_y\text{O}_z$ и $\text{Si}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Sn}_x\text{W}_y\text{O}_z$ (рисунок 2).

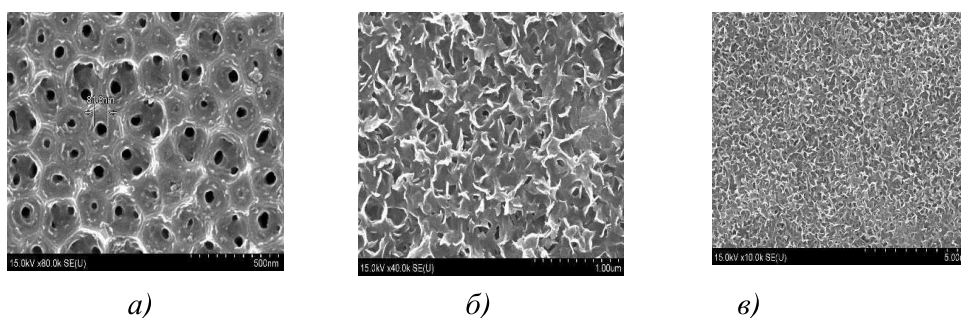


Рисунок 2 — Микроскопические изображения поверхности структур $\text{n-Si}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (а), $\text{n-Si}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Sn}_x\text{Mo}_y\text{O}_z$ (б) и $\text{n-Si}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Sn}_x\text{W}_y\text{O}_z$ (в), сформированных методом химического осаждения (а) или ионного наплаивания (б, в)

С помощью данных ИК-спектроскопии для них подтверждено наличие на поверхности связей Sn–OH, Mo–O–Mo, W–O, Mo–OH. Данные рентгеновского микроанализа указывают на наличие в пленках Mo, W, O. Отсутствие сигналов от атомов олова может быть связано с преобладанием атомов молибдена или вольфрама в пленке, что представляется логичным с учетом того, что оловосодержащие слои, формируются при адсорбции моночастичных ионов Sn^{2+} , а молибден- и вольфрамсодержащие слои – при абсорбции многочастичных полимолибдат- или поливольфрамат- ионов, устойчивых в рабочем диапазоне pH растворов наслаивания.

При изучении температурных зависимостей электросопротивления сформированных структур n-Si/Al₂O₃/TiO₂, Si/Al₂O₃/Sn_xZn_yO_z, n-Si/Al₂O₃/Sn_xMo_yO_z и n-Si/Al₂O₃/Sn_xW_yO_z в диапазоне температур от 20 до 200 °C более стабильные электронно-транспортные характеристики зафиксированы для образцов Si/Al₂O₃/TiO₂, средний температурный коэффициент электросопротивления для которых составил $5,38 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Оксидные структуры на основе олова и молибдена или вольфрама характеризовались суще-

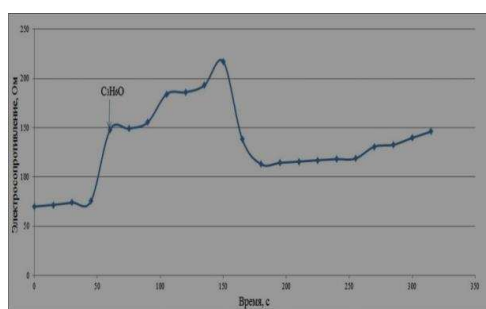


Рисунок 3 – Отклик пленок $\text{Sn}_x\text{W}_y\text{O}_z$ на пары ацетона при температуре 105°C

ственной нестабильностью омического состояния. При исследовании влияния воздействия паров этилового спирта, уксусной кислоты, ацетона на электросопротивление полученных структур наиболее высокий отклик порядка 180 % зафиксирован на присутствие в воздухе паров ацетона для системы Si/Al₂O₃/Sn_xW_yO_z/Ag (рисунок 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Handbook of Nanotechnology / ed. B. Bhuchan. Springer, Berlin Heidelberg, 2007.
2. Гаврилов С.А., Электрохимические процессы в технологии микро- и нанoeлектроники / С.А. Гаврилов, А.Н. Белов. – М.:Высш. образ., 2009.
3. Anodic formation of low-aspect-ratio porous alumina films for metal-oxide sensor application / G. Gorokh [et al.] // Electrochimica Acta. – 2006. – V. 52. – P. 1771–1780.
4. Korotchenkov G., Tolstoy V., Schwank J. Successive ionic layer deposition (SILD) as a new sensor technology: Synthesis and modification of metal oxides. // Measur. Sc. Tech. –2006, № 7. P. – 1861-1869.