

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СКВОЗНОГО ДВУХСТОРОННЕГО АНОДИРОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ АЛЮМООКСИДНЫХ ОСНОВАНИЙ ДЛЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ СВЧ-СТРУКТУР**  
**TECHNOLOGICAL FEATURES OF THROUGH TWO-SIDED ANODIZATION FOR ALUMINA SUBSTRATES FORMATION FOR MICROSTRIP MICROWAVE STRUCTURES**

Шиманович Д.Л.<sup>1</sup>, Яковцева В.А.<sup>1</sup>, Шиманович А.Д.<sup>1</sup>, Беспрозванный Е.Д.<sup>2</sup>,  
Алясова Е.Е.<sup>2</sup>

Shimanovich D.L., Yakovtseva V.A., Shimanovich A.D., Besprozvanny E.D., Alyasova E.E.

<sup>1</sup> Беларусь, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, e-mail: ShDL@tut.by

<sup>2</sup> Россия, ООО «Русалокс», e-mail: edb@rusalox.ru

Известно, что основой конструкции устройств СВЧ-диапазона является диэлектрическая подложка, которая должна обеспечивать не только размещение пленочных пассивных и навесных активных элементов, но и сама должна служить функциональной частью при распространении СВЧ-энергии, т.к. величины емкостных и индуктивных связей, геометрических размеров микрополосковых линий для минимизации потерь СВЧ-энергии определяются диэлектрической постоянной материала и толщиной подложки. Кроме того, СВЧ-подложка должна обладать высоким качеством обработки поверхности, высокой плоскостностью, механической прочностью, термоустойчивостью при нагревании до высоких температур, высокой теплопроводностью, химической инертностью, температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), по возможности близким к ТКЛР формируемых слоев для совместимости с процессами осаждения пленок для создания микрополосковых СВЧ-линий [1].

Поэтому весьма актуальным является разработка технологических способов формирования оснований для структур СВЧ-диапазона в виде толстослойных (100-400 мкм) свободных  $Al_2O_3$ -пластин, которые после проведенных исследований показали, что удовлетворяют всей совокупности перечисленных выше требований.

Объект исследований – пластины на основе свободных пленок наноструктурированного двухслойного пористого  $Al_2O_3$ , сформированного методом двухстороннего сквозного анодирования и последующей обработкой биполярным анодированием. Перспективность их использования определяется влиянием параметров их ячеисто-пористой морфологии, которая может контролироваться электрохимическими и температурными режимами процесса анодирования [2-4], на относительную диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь. Пластины на основе свободных пленок  $Al_2O_3$ , полученные двухстадийным, но односторонним анодированием Al-фольги и химическим удалением остаточного Al, широко освещены в научных изданиях [5]. Однако такая методика обладает недостатками, связанными с необходимостью маскирования одной из сторон Al и его травлением на заключительной стадии технологического процесса, получением неплоскостных  $Al_2O_3$ -оснований с разбросом по толщине и с признаками коробления  $Al_2O_3$ -структур из-за градиента температуры электролита и механических напряжений на границе роста Al- $Al_2O_3$ . В настоящей работе представлены технологические приемы формирования подложек на основе  $Al_2O_3$  с использованием двухстадийного двухстороннего анодирования до полного сквозного проокисления исходных Al-пластин. Однако основная проблема при таком подходе связана с высокими требованиями к степени шероховатости и качеству обработки поверхности исходного Al-материала, иначе на заключительной стадии глубокого сквозного двухстороннего анодирования возникает эффект отсечки подвода потенциала, приводящий к появлению локальных недоанодированных Al-включений внутри свободных  $Al_2O_3$ -пластин в области стыка двух встречных барьерных слоев, что будет приводить к паразитным емкостным связям и потерям в таких подложках при распространении СВЧ-сигналов. Ликвидация Al-вкраплений осуществлялась применением биполярного анодирования после основной стадии глубокого сквозного анодирования.

В качестве исходного материала использовалась Al-фольга (99,99%) толщиной ~80, 220, 280 мкм. После многократной прокатки через полированные валики осуществлялась ее терморихтовка под давлением  $\sim 10^7$  Па при 350 °С в течение 1 ч для снятия механических напряжений и увеличения параметров пластичности. Далее штамповкой формировались образцы размером 60×48 мм, и осуществлялась предварительная химическая обработка в  $\text{CrO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4$  (1:100) в течение 2-3 мин. Для сглаживания и устранения микронеровностей проводилась электрохимическая полировка Al в электролите на основе хлорной и уксусной кислот (22% : 78%) при  $T \sim 7-9$  °С при напряжении 25-27 В в течение 1-2 мин. После проведенных операций толщина Al-пластин составляла ~70, 210, 270 мкм. Процесс двухстороннего анодирования проводился в две стадии в 10% растворе  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$  сначала на глубину ~10-15 мкм в потенциостатическом режиме при  $U \sim 20$  В при температуре ~16-18 °С (1 стадия), а после этого в том же электролите при той же температуре при  $j \sim 40$   $\text{mA}/\text{cm}^2$  (2 стадия) для формирования модифицированных пористых анодных слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с комбинированной морфологией. Процесс глубокого двухстороннего сквозного пористого анодирования проводили до падения силы тока в электрохимической ванне практически до нуля при смыкании двух встречнорастущих оксидных слоев. В результате были сформированы свободные анодные пластины с толщиной двухслойного  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ~98, 303, 401 мкм, диаметром двухсторонних пор ~55 нм, общей толщиной барьерных слоев ~170 нм, пористостью ~0,27, но с наличием дефектных локальных Al-включений произвольной формы и разной величины (рис.1). Коэффициент объемного роста при превращении Al в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  составил ~1,40-1,48.

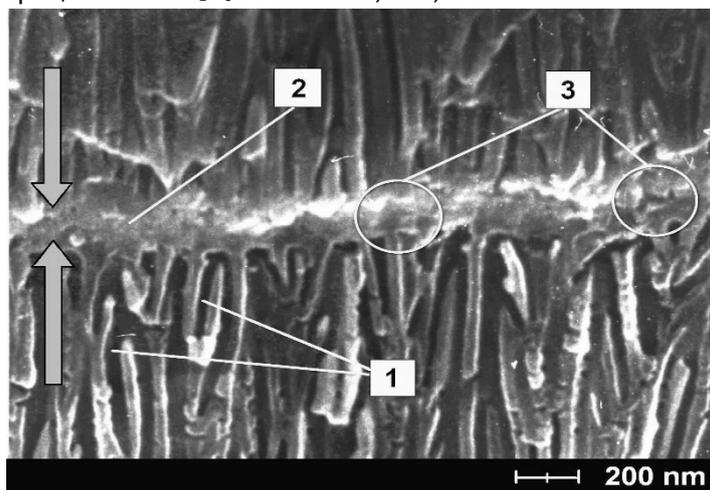


Рис.1 СЭМ-фото поперечного разреза свободной анодной  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -пластины толщиной 303 мкм, полученной двухсторонним сквозным анодированием:

1) - поры; 2) - межбарьерная область; 3) - остаточные Al-включения.

Основная идея метода биполярного анодирования заключалась в использовании двухкамерной электролитической ванны (рис.2), где образец свободной  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -структуры, но с дефектными зонами токопроводящих Al-вкраплений внутри нее, помещался как изолирующая перегородка, с одной стороны которой использовался электролит анодирования (10%  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ), а с другой стороны – буферный электролит (10%  $\text{CuSO}_4$ ). В первую из камер помещался катод, во вторую – анод. При включении тока на одной стороне бипластины напротив Al-включений появлялся положительный заряд, она становилась анодом, и проходил процесс анодного доокисления (анодирования) этих включений, а вторая заряжалась отрицательно, становилась катодом, и наблюдалось восстановление катионов ( $\text{Cu}^{2+}$ ) буферного электролита на катодной стороне напротив Al-включений с гарантированным отсутствием искрений и прожогов окисленного слоя в таких зонах.

На рис.3 представлены сравнительные фото, характеризующие эволюцию проведения процесса биполярного анодирования в течение различного времени: 0; 15; 30 мин. Травление медных налетов для окончательной очистки пластин осуществляли в 60%  $\text{HNO}_3$  в течение 2-3 мин.

Таким образом, были разработаны технологические способы формирования свободных анодных двухслойных  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -пластин с использованием толстослойного двухстороннего сквозного анодирования и последующей обработки биполярным анодированием. Показано, что можно изготавливать  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -пластины толщиной от 100 до 400 мкм, которые обладают высокой формоустойчивостью и стойкостью к трещинообразованиям при высокотемпературных ( $> 500\text{ }^\circ\text{C}$ ) воздействиях, коэффициентом теплопроводности  $\sim 20\text{-}23\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , относительной диэлектрической проницаемостью  $\sim 7,2\text{-}7,4$ . После вакуумного, химического и электрохимического осаждения металлизированных слоев они могут быть использованы в качестве оснований при создании микрополосковых СВЧ-структур.

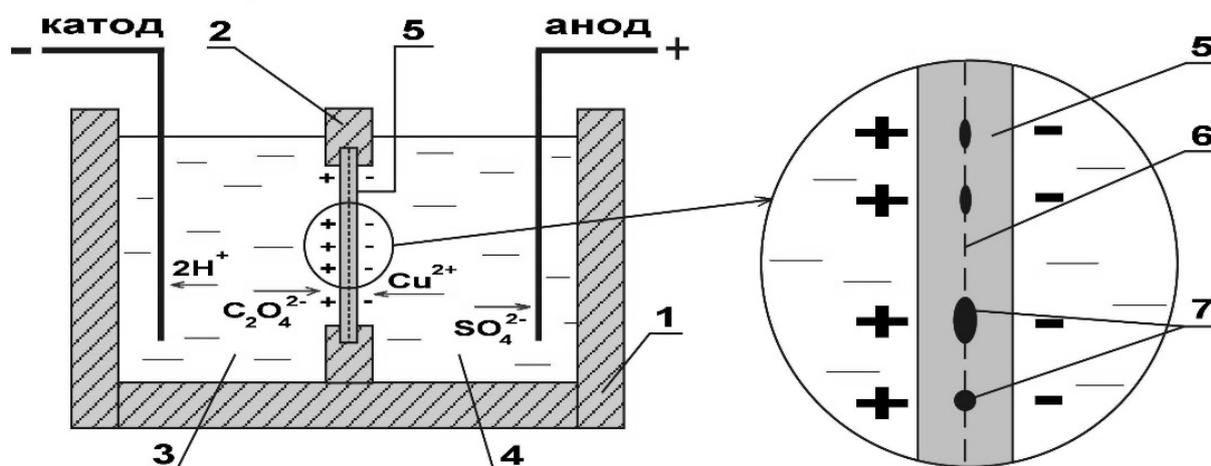
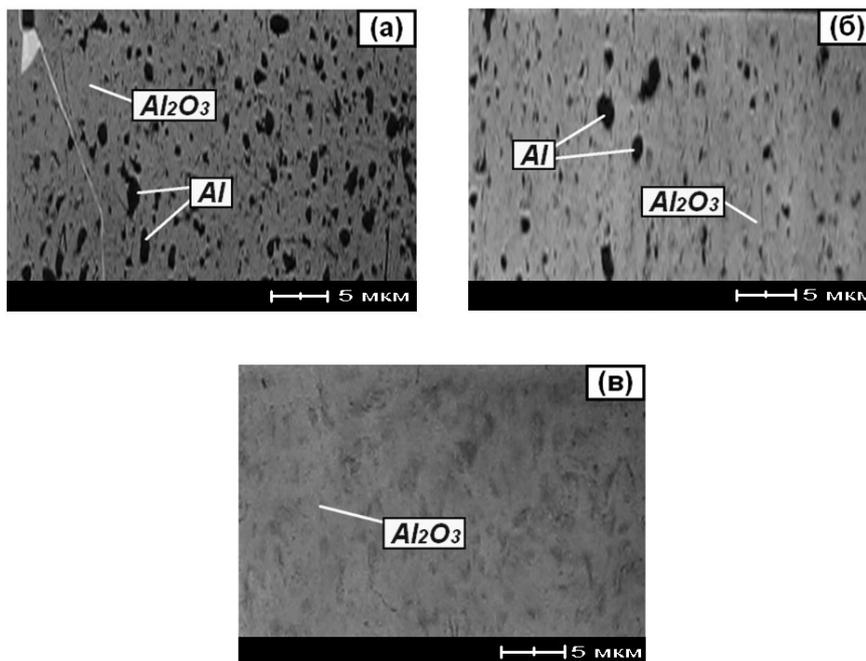


Рис.2 Схематическое обоснование биполярного анодирования: 1 - двухкамерная электролитическая ванна; 2 - изолирующая перегородка; 3 - электролит анодирования в катодной камере; 4 - буферный электролит в анодной камере;

5 - свободная  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -пластина; 6 - область двух встречных барьерных слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 7 - недоокисленные Al-включения.



*Рис.3 Фото Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-пластин до и после проведения процесса биполярного анодирования в течение различного времени: а - 0 мин; б - 15 мин; в -30 мин.*

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ:**

1. Климачев И.И., Иовдальский В.А. // СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования, М.: Техносфера, 2006. С. 352.
2. Шиманович Д.Л. Оптимизация методов формирования толстослойных диэлектрических покрытий на основе анодного оксида алюминия при электрохимическом анодировании широкоформатных Al-подложек и теплопроводящих оснований с радиаторами // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, 2016, том 16. № 3. С. 116-119.
3. Шиманович Д.Л. Электрохимические методы формирования наноструктурированных толстослойных Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-покрытий для создания эффективных теплопроводящих оснований // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сборник научных трудов, 2016, вып. 8. С. 410-417.
4. Шиманович Д.Л., Сокол В.А., Литвинович Г.В. Методы формирования алюмооксидных микроструктур для мощных систем электромеханики // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения, 2014, том 14. № 3. С. 170-173.
5. Шиманович Д.Л., Сокол В.А., Чушкова Д.И. Методы электрохимического формирования однослойных и двухслойных мембранных структур на основе наноструктурированного анодного оксида алюминия // Известия Национальной Академии Наук Беларуси. Серия физико-технических наук, 2014. № 2. С. 19-23.