

ИЗГОТОВЛЕНИЕ АЛЮМОКСИДНЫХ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ МИКРОПОЛОКОВЫХ СВЧ-СТРУКТУР МЕТОДОМ СКВОЗНОГО ДВУХСТОРОННЕГО АНОДИРОВАНИЯ

Д. Л. Шиманович

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6
E-mail: ShDL@tut.by*

Разработаны технологические способы формирования свободных Al_2O_3 -пластин толщиной 100–400 мкм с использованием двухстороннего сквозного анодирования и последующего биполярного анодирования для применения их в качестве оснований для полосковых СВЧ-структур. Получены высокая формо- и трещиноустойчивость при высокотемпературных (> 500 °C) воздействиях, теплопроводность ~ 20 – 23 Вт/м·К, относительная диэлектрическая проницаемость $\sim 7,2$ – $7,4$.

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 [2–10] 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, 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 [11]. 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 прокисления 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 двух-

стороннего 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 $T \sim 7\text{--}9$ °С при напряжении 25–27 В в течение 1 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 $j \sim 40$ мА/см² (2 стадия) для формирования модифицированных пористых анодных слоев Al_2O_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 Al_2O_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 Al_2O_3 составил ~1,40–1,48.

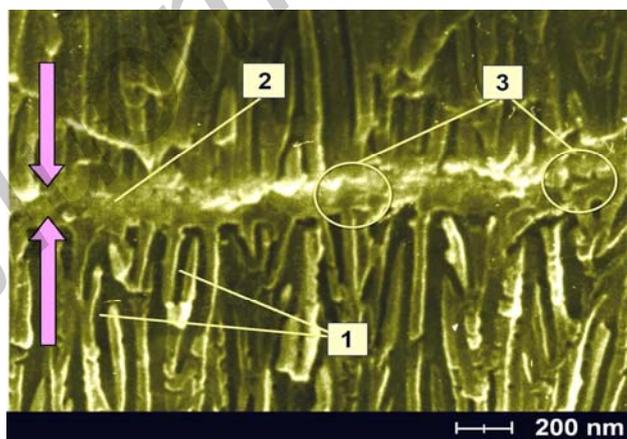


Рис. 1. СЭМ-фотография поперечного разреза свободной анодной Al_2O_3 -пластины толщиной 303 мкм, полученной двухсторонним сквозным анодированием: 1 – поры; 2 – межбарьерная область; 3 – остаточные Al-включения

Основная идея метода биполярного анодирования заключалась в использовании двухкамерной электролитической ванны (рис. 2), где образец свободной Al_2O_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%

CuSO₄). 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 (Cu²⁺) буферного электролита на катодной стороне напротив Al-включений с гарантированным отсутствием искрений и прожогов окисленного слоя в таких зонах.

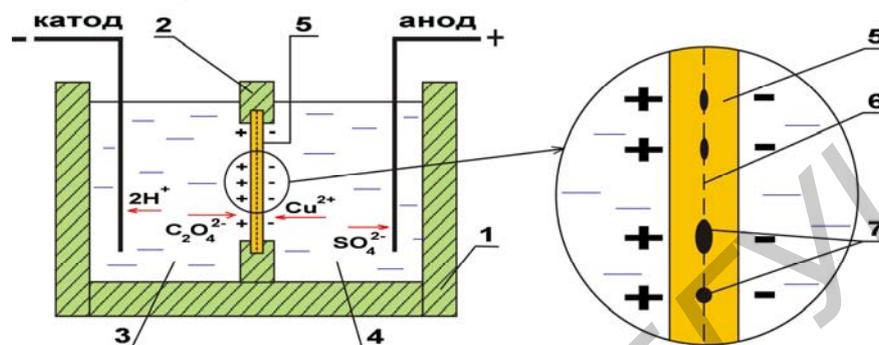


Рис. 2. Схематическое обоснование биполярного анодирования: 1 – двухкамерная электролитическая ванна; 2 – изолирующая перегородка; 3 – электролит анодирования в катодной камере; 4 – буферный электролит в анодной камере; 5 – свободная Al₂O₃-пластина; 6 – область двух встречных барьерных слоев Al₂O₃; 7 – недоокисленные Al-включения

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 % HNO₃ в течение 2–3 мин.

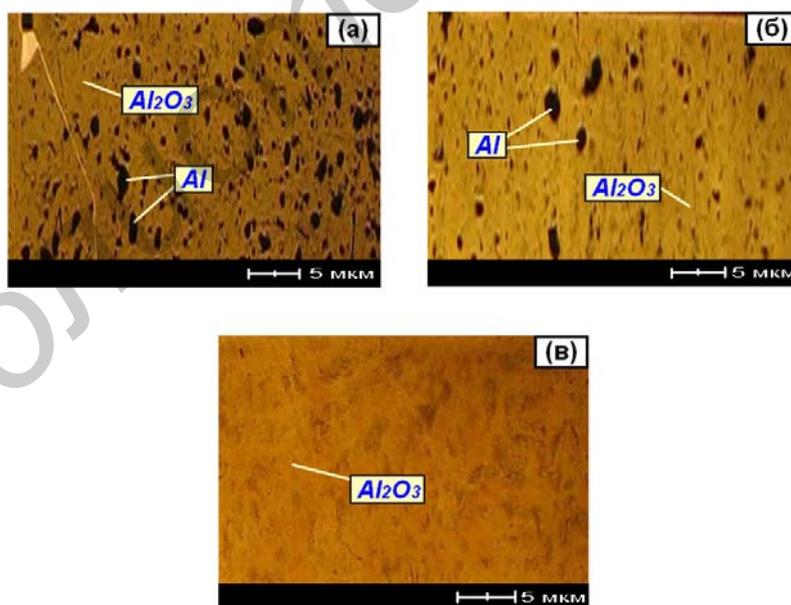


Рис. 3. Фото Al₂O₃-пластин до и после проведения процесса биполярного анодирования в течение различного времени: а – 0 мин; б – 15 мин; в – 30 мин

Таким образом, были разработаны технологические способы формирования свободных анодных двухслойных Al₂O₃-пластин с использованием толстослойного двух-

стороннего сквозного анодирования и последующей обработки биполярным анодированием. Показано, что можно изготавливать Al_2O_3 -пластины толщиной от 100 до 400 мкм, которые обладают высокой формоустойчивостью и стойкостью к трещинообразованию при высокотемпературных (> 500 °С) воздействиях, коэффициентом теплопроводности ~ 20 – 23 Вт/м·К, относительной диэлектрической проницаемостью $\sim 7,2$ – $7,4$. После вакуумного, химического и электрохимического осаждения металлизированных слоев они могут быть использованы в качестве оснований при создании микрополосковых СВЧ-структур.

Список литературы

1. Климачев И.И., Иовдальский В.А. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования. М.: Техносфера, 2006. 352 с.
2. Шиманович Д.Л. Методы создания встроенных алюминиевых коммутационных элементов в объеме свободных анодных Al_2O_3 -оснований // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2013. Т. 13. № 3. С. 186–189.
3. Шиманович Д.Л., Сокол В.А., Литвинович Г.В. Методы формирования алюмооксидных микроструктур для мощных систем электромеханики // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2014. Т. 14. № 3. С. 170–173.
4. Шиманович Д.Л., Чушкова Д.И., Сокол В.А. Технологические приемы повышения термической устойчивости при формировании толстослойных нанопористых анодных оксидов алюминия // *Материалы и структуры современной электроники: материалы V Междунар. науч. конф.*, Минск, 10–11 окт. 2012 г. / Бел. гос. ун-т. Минск, 2012. С. 199–202.
5. Сокол В.А., Яковцева В.А., Шиманович Д.Л. Особенности применения пористых оксидов алюминия // *Доклады БГУИР*. 2012. № 2 (64). С. 21–27.
6. Сокол В.А., Шиманович Д.Л., Сякерский В.С. Исследование профилей на границе раздела $Al-Al_2O_3$ при глубоком локальном анодировании Al // *Доклады БГУИР*. 2009. № 6 (44). С. 36–41.
7. Литвинович Г.В., Шиманович Д.Л. Технологические особенности формирования плат со встроенной системой межсоединений в подложках анодного оксида алюминия // *Доклады БГУИР*. 2013. № 3 (73). С. 39–44.
8. Сокол В.А., Шиманович Д.Л., Литвинович Г.В. Технологические приемы формирования $Al-Al_2O_3$ микроструктур для мощных электромеханических систем // *Доклады БГУИР*. 2012. № 8 (70). С. 44–49.
9. Сокол В.А., Турцевич А.С., Белоус А.И. Светодиодные устройства на алюминиевом основании // *Электронная промышленность*. 2012. № 1. С. 11–14.
10. 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. Т. 16. № 3. С. 116–119.
11. Чушкова Д.И., Шиманович Д.Л., Сокол В.А. Электрохимические особенности формирования свободных наноструктурированных матриц из Al_2O_3 со сквозными модифицированными порами // *Материалы и структуры современной электроники: материалы V Междунар. науч. конф.*, Минск, 10–11 окт. 2012 г. / Бел. гос. ун-т. Минск, 2012. С. 195–199.