

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, была исследована зависимость параметров интегрированной теплопроводности модифицированных алюмооксидных оснований от технологических приемов и режимов электрохимического анодирования Al-сплава АМГ-2М и заполнения пористых каналов Al_2O_3 -покрытий диэлектрическими грунтовочными материалами (электроизоляционным кремнийорганическим лаком КО-921 и полиимидным лаком АД-9103). Было показано увеличение интегрированной теплопроводности таких алюмооксидных оснований по сравнению с немодифицированными и негрунтованными покрытиями, которые не отличались значениями толщины Al_2O_3 и Al.

Было установлено, что максимальные значения интегрированной теплопроводности (~ 90 Вт/м \cdot К и ~ 87 Вт/м \cdot К) характерны для модифицированных структурных систем «Al– Al_2O_3 » (Al ~ 3 мм; $Al_2O_3 \sim 50$ мкм), прошедших одностадийное уплотнение грунтовочными наполнителями АД-9103 и КО-921 соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Preparation and morphology-dependent wettability of porous alumina membranes / D.L. Shimanovich [et al.] // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2018. – Vol. 9. – P. 1423–1436
2. Шиманович, Д.Л. Технологические режимы для снижения внутренних напряжений, улучшения термической устойчивости к образованию трещин и повышения электрической прочности в анодных структурах Al– Al_2O_3 / Д.Л. Шиманович // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2015. – Том 15, № 3. – С. 79–82.
3. Шиманович, Д.Л. Электрохимическая алюмооксидная технология для приборов силовой электроники / Д.Л. Шиманович, В.А. Яковцева // Доклады БГУИР. – 2019. – № 3 (121). – С. 5–11.

ИНТЕРПОЗЕРЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМООКСИДНЫХ ПЛАСТИН СО ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Д. Л. Шиманович

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

Изучены и оптимизированы технологические приемы и режимы формирования интерпозеров на основе однослойных и двухслойных мембранных алюмооксидных пластин со встроенной внутри диэлектрического объема системой алюминиевых пассивных элементов, коммутационных межсоединений и сквозных переходных элементов, полученных локальным односторонним и двухсторонним сквозным анодированием с использованием дополнительного биполярного анодирования. Изготовлены однослойные и двухслойные интерпозеры размером соответственно $1,2 \times 1,2$ см и $1,0 \times 1,0$ см. Показано, что конструктивно-технологически толщина Al_2O_3 -интерпозеров может варьироваться от ~ 30 до 100 мкм. Продемонстрировано, что толщина имплантированных Al-проводников может составлять от ~ 5 до ~ 100 мкм, причем возможна различная глубина их залегания в объеме мембранных Al_2O_3 -пластин.

Ключевые слова: алюминий; электрохимическое анодирование; пористый оксид алюминия; грунтовочный материал; интегрированная теплопроводность.

INTERPOSERS BASED ON ALUMINA PLATES WITH BUILT-IN ALUMINUM METALLIZATION SYSTEM

D. L. Shymanovich

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,

P. Brovki str. 6, 220013 Minsk, Belarus

Corresponding author: D. L. Shymanovich (ShDL@tut.by)

The technological methods and regimes of interposers formation based on single-layer and double-layer membrane alumina plates with a system of aluminum passive elements, conductive interconnections and through transition elements built inside the dielectric body, obtained by local one-sided and two-sided through thickness anodizing using additional bipolar anodizing, were studied and optimized. Single-layer and double-layer interposers with dimensions of $1,2 \times 1,2$ cm and $1,0 \times 1,0$ cm, respectively, were fabricated. It was shown that the thickness of Al_2O_3 interposers can be changed from ~ 30 to 100 μm in terms of design and technology. It was demonstrated that the thickness of implanted Al conductors can be from ~ 5 μm to ~ 100 μm , and different depths of their location inside Al_2O_3 membrane plates are possible.

Key words: aluminum; electrochemical anodizing; porous alumina; membrane; interposer; conductive interconnections.

ВВЕДЕНИЕ

На основании анализа современных мировых разработок, возможностей алюмооксидной технологии [1–3] и предварительных исследований замечено, что пористый анодный оксид алюминия является весьма перспективным материалом для передовых технологий 2.5 D и 3 D микроэлектронных устройств в части создания промежуточных пластин (интерпозеров) для объемной сборки кристаллов в единую микроэлектронную систему из-за термостойкости Al_2O_3 , его низких электрических потерь, механической твердости, низкой стоимости и т.д. Новым научным и технологическим решением является такое, когда, используя комбинированное сочетание процессов фоторезистивного маскирования, одностороннего или двухстороннего сквозного анодирования, можно одновременно формировать несущие основания (мембранные пластины интерпозеров), межэлементную диэлектрическую среду и систему встроенных Al-межсоединений с двухсторонним выходом на поверхность контактных переходов [4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Общая реализация технологического подхода формирования интерпозеров на основе однослойных Al_2O_3 -мембран со встроенной Al-металлизацией включала в себя следующие операции: предварительную температурную, механическую подготовку и химическую обработку (очистку) исходной Al-фольги; химическую или электрохимическую полировку Al-фольги; одностороннее фоторезистивное маскирование в местах формирования коммутационных элементов (контактных площадок и проводников); одностороннее электрохимическое анодирование в локально незащищенных местах до полного сквозного прокисления подготовленных пластин Al-фольги; снятие фоторезистивных масок.

Общая реализация технологического подхода формирования интерпозеров на основе двухслойных Al_2O_3 -мембран со встроенными Al-элементами включала в себя следующие операции: предварительную температурную, механическую подготовку и химическую обработку (очистку) исходной Al-фольги; химическую или электрохимическую полировку Al-фольги; двухстороннее фоторезистивное маскирование в местах формирования коммутационных элементов с различной температурой задубливания для контактных площадок и проводников; двухстороннее электрохимическое анодирование в локально незащищенных местах на некоторую глубину; химическое травление сформированного Al_2O_3 ; снятие слабозадубленных фоторезистивных масок (с топологических мест проводников); двухстороннее электрохимическое анодирование в локально незащищенных местах до полного сквозного прокисления пластин Al-фольги; снятие сильнозадубленных фоторезистивных масок (с топологических мест контактных переходов и площадок).

В качестве исходного материала использовалась фольга из Al (99,99 %) различной толщины ~ 30 – 100 мкм. После механической вырезки Al-пластин химическое обезжиривание осуществлялось в хромовой смеси $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4$ (1:100) в течение ~ 2 – 3 мин. Термоотжиг Al проводился при $T \sim 350$ °C в течение 1 ч, а терморихтовка Al-пластин осуществлялась на механическом прессе с усилием сжатия $\sim 2 \cdot 10^5$ кг/см² при $T \sim 100$ °C. Химическая полировка проводилась в растворе $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{HNO}_3$ (8:1) при $T \sim 85$ °C в течение ~ 3 – 5 мин.

Нанесение позитивного фоторезиста SPR-2FX осуществлялось центрифугированием (скорость ~ 2500 об/мин; толщина фоторезистивного слоя ~ 2 – 3 мкм). Сушка фоторезиста проводилась при $T \sim 90$ °C в течение ~ 15 мин. После этого проводился процесс фотолитографии, включающий экспонирование (~ 45 с) фоторезистивного слоя с использованием разработанных фотошаблонов, проявление фоторезистивных масок в 0,9% KOH в течение ~ 1 мин и их задубливание при определенных температурах, указанных ниже.

Для формирования сквозных алюмооксидных структур с Al-металлизацией толстослойное анодирование в присутствии фоторезистивных масок необходимо проводить в 3–7%-ных щавелевокислых ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) или в 15–20%-ных сернокислых (H_2SO_4) электролитах либо в гальваностатических режимах при плотности тока ~ 20 – 30 мА/см², либо в потенциостатических режимах при вариантах постоянного напряжения в диапазоне ~ 45 – 65 В и ~ 15 – 20 В, соответственно, для двух типов электролитов с обязательным их охлаждением.

Удаление фоторезистивных масок осуществлялось в смеси диметилформаида и моноэтаноламина (5:1) при $T \sim 80$ °C в течение 20–25 мин.

Одним из технологических вариантов формирования интерпозеров на основе двухслойных мембранных алюмооксидных пластин может быть следующий. Вначале на предварительно подготовленную и отполированную Al-пластину необходимо нанести в два этапа фоторезистивные маски проводников и контактных площадок по схеме разнотемпературного задубливания (соответственно $T = 120$ °C и $T = 180$ °C). Затем открытые места Al необходимо анодировать на заданную толщину в 7%-ной щавелевой кислоте ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) при температуре ~ 16 – 18 °C в гальваностатическом режиме при плотности тока ~ 25 мА/см². Далее, селективным химическим травлением в растворе $\text{CrO}_3 : \text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}$ при температуре ~ 85 °C необходимо удалить выращенный Al_2O_3 с образованием микрорельефа. Затем

необходимо осуществить вторую стадию анодирования в том же электролите, для чего необходимо снять слабозадубленные фоторезистивные маски с мест формируемых встроенных проводников и провести двухстороннее сквозное анодирование уже всей открытой поверхности оснований. Так как толщина Al в местах, соответствующих будущим зонам межэлементного разделения меньше, то они будут анодироваться полностью до смыкания встречнорастущих Al_2O_3 -слоев, а на других участках анодирование будет прекращено с образованием встроенных внутри оксида проводников. Причем, какой величины будет сделан уступ микрорельефа, такой же толщины будут формироваться Al-проводники внутри Al_2O_3 -пластин. Сильнозадубленные фоторезистивные маски, соответствующие контактными площадкам и переходным проводникам, необходимо снимать после завершения анодирования с образованием выхода Al на поверхность конечных структур.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изготовленные интерпозеры представляли собой пластины однослойных и двухслойных Al_2O_3 -мембран размером соответственно $1,2 \times 1,2$ см и $1,0 \times 1,0$ см со встроенной системой алюминиевых коммутационных межсоединений внутри диэлектрического объема толщиной ~ 30 – 100 мкм.

Для первого технологического варианта интерпозеров (рис. 1, а) топологический рисунок металлизации представлял собой набор внешних контактных площадок диаметром 400 мкм в количестве 48 шт., расположенных по периметру интерпозеров и соединенных лучеобразными Al-проводниками с набором внутренних контактных площадок размером 100×100 мкм в количестве 48 шт., расположенных в центральной части интерпозеров по периметру зоны $0,4 \times 0,4$ см. Толщина Al-металлизации определялась толщиной исходной Al-фольги, а топологический рисунок с обеих сторон интерпозеров совпадал и являлся сквозным через всю толщину Al_2O_3 -пластин.

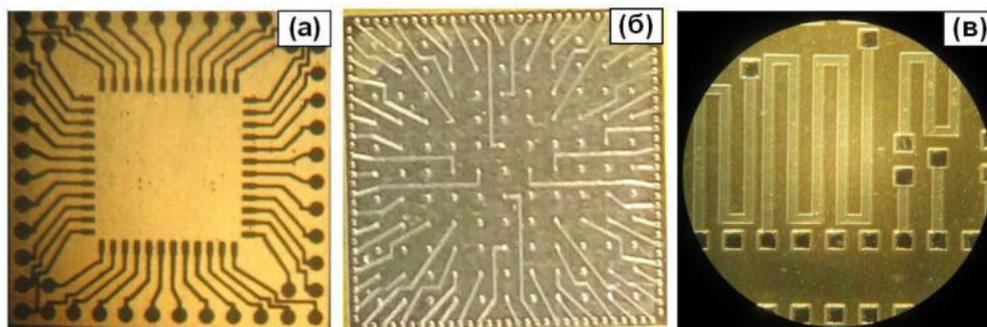


Рис. 1. Фото интерпозеров на основе мембранных Al_2O_3 -структур и встроенной Al-металлизации:
 а – однослойные при одностороннем сквозном анодировании;
 б – двухслойные при двухстороннем сквозном анодировании;
 в – имплантированные проводники и сквозные контактные переходы

Для второго технологического варианта интерпозеров (рис. 1, б) количество внешних односторонних контактных площадок (размером 100×100 мкм) составляло 124 шт., а количество внутренних контактных площадок составляло 121 шт. с вариантами одностороннего и двухстороннего выхода на поверхность. Толщина алюми-

ниевых имплантированных проводников (рис. 1, в) могла варьироваться от ~5 мкм до ~100 мкм, причем возможна различная глубина их залегания в объеме двухслойных мембранных Al_2O_3 -пластин.

Было замечено, что в двухслойных алюмооксидных коммутационных пластинах, полученных двухсторонним сквозным анодированием на стыке между двумя барьерными слоями Al_2O_3 могут оставаться островковые алюминиевые вкрапления (рис. 2) из-за различия в толщине исходных алюминиевых пластин и поверхностных микродефектов. Такие вкрапления Al могут образовывать мостики закорачивания между встроенными проводниками и межсоединениями, приводящими к потере функциональной нагрузки конечных изделий.

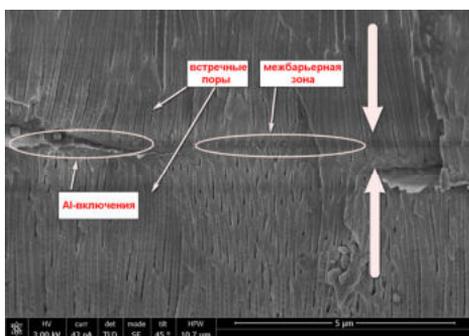


Рис. 2. СЭМ-фото поперечного разреза двухслойной мембранной Al_2O_3 -структуры интерпозеров, сформированных двухсторонним сквозным анодированием, с наличием дефектных Al-включений

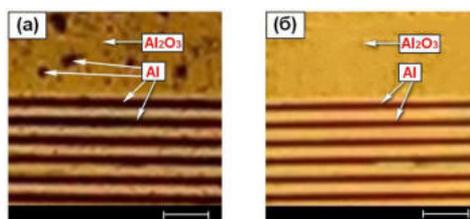


Рис. 3. Фото Al_2O_3 -пластин: а – до проведения процесса биполярного анодирования; б – после процесса для устранения дефектных Al-включений

Было показано, что устранение этих Al-вкраплений можно осуществить дополнительным технологическим приемом на основе биполярного анодирования. Алюмооксидная коммутационная мембранная пластина устанавливалась в двухкамерной электрохимической ванне в качестве изолирующей перегородки. В катодную камеру заливался электролит анодирования, а в анодную – буферный электролит, и на электроды подавалось напряжение, равное или несколько большее предшествующему при двухстороннем сквозном анодировании. В качестве буферного электролита использовался 25%-ный раствор сульфата меди. При включении тока и замыкании электрической цепи на одной стороне алюмооксидной пластины напротив Al-включений появлялся положительный заряд, она становилась анодом, и проходил процесс анодного доокисления (анодирования) этих включений в области стыка барьерных слоев Al_2O_3 , а вторая заряжалась отрицательно, становилась катодом, и наблюдался процесс восстановления катионов буферного электролита (Cu^{2+}) в виде медных налетов на катодной стороне напротив Al-включений с гарантированным отсутствием искрений и прожогов окисленного слоя в таких зонах. Al во вкраплениях анодировался, а в местах без вкраплений, благодаря буферному электролиту, создавалось электрическое сопротивление цепи, равное сопротивлению анодирования, что исключало пробой Al_2O_3 -мембраны. Процесс проводился до полного сквозного анодирования этих Al-вкраплений.

Была проведена сравнительная оценка эффекта применения биполярного анодирования, учитывающая различную продолжительность технологического процесса, которая зависела от величины островковых Al-включений, толщины мембранных пластин и варьировалась от ~10 до ~50 мин. На рис. 3, а и б представлены фото Al₂O₃-пластин до и после проведения процесса биполярного анодирования в течение ~25 мин для устранения дефектных Al-включений. Процесс осветления конечных алюмооксидных пластин проводился путем химического травления восстановленных медных налетов в азотной кислоте в течение ~2–3 мин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были разработаны и оптимизированы технологические приемы и режимы формирования интерпозеров на основе несущих однослойных и двухслойных мембранных Al₂O₃-оснований (толщиной ~30–100 мкм) со встроенной внутри диэлектрического тела системой токопроводящих алюминиевых межсоединений и пассивных элементов (толщиной ~5–100 мкм), полученных локальным односторонним и двухсторонним сквозным анодированием с использованием дополнительного биполярного анодирования.

Было продемонстрировано, что связанное с этим научное направление является весьма актуальным, если учесть, что исключается применение процессов вакуумного напыления или электрохимического осаждения металлических пленок, а, варьируя технологическими режимами, можно добиваться различной толщины имплантированных Al-элементов и их расположения по глубине в объеме мембранных Al₂O₃-пластин. Были изготовлены однослойные и двухслойные интерпозеры размером соответственно 1,2×1,2 см и 1,0×1,0 см. Было показано, что разработанные структуры являются перспективными для использования в качестве интерпозеров с пассивной элементной базой для объемной сборки микроэлектронных систем, 2.5 D и 3 D-конструкций многокристалльных модулей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Шиманович, Д.Л. Электрохимический синтез пористых мембран на основе наноструктурированного оксида алюминия / Д.Л. Шиманович // Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. – 2014. – Том 5, № 4. – С. 18–22.
2. Шиманович, Д.Л. Методы электрохимического формирования однослойных и двухслойных мембранных структур на основе наноструктурированного анодного оксида алюминия / Д.Л. Шиманович, В.А. Сокол, Д.И. Чушкова // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2014. – № 2. – С. 19–23.
3. Preparation and morphology-dependent wettability of porous alumina membranes / D.L. Shimanovich [et al.] // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2018. – Vol. 9. – P. 1423–1436.
4. Шиманович, Д.Л. Методы создания встроенных алюминиевых коммутационных элементов в объеме свободных анодных Al₂O₃-оснований / Д.Л. Шиманович // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2013. – Т. 13, № 3. – С. 186–189.