

УДК 621.794.61

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ АЛЮМООКСИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ПРИБОРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Д.Л. ШИМАНОВИЧ, В.А. ЯКОВЦЕВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 1 марта 2019*

**Аннотация.** Обсуждается электрохимическая алюмооксидная технология для формирования теплопроводящих подложек алюминия с диэлектрическим слоем анодного оксида алюминия с пробивными напряжениями выше 6 кВ. Разработанная технология может быть использована при создании практически любого радиоэлектронного устройства для работы в области температур от 10 до 473 К и частот гигагерцового диапазона.

*Ключевые слова:* электрохимическая алюмооксидная технология, теплопроводящее основание, пробивное напряжение.

**Abstract.** The electrochemical alumina technology (ELAT) for the formation of heat-conducting aluminum substrates with a dielectric layer of anodic aluminum oxide with breakdown voltages above 6 kV is discussed. The developed technology can be used in the production of any electronic device operated in the temperature range from 10 to 473 K and frequencies of the gigahertz range.

*Keywords:* electrochemical alumina technology, heat-conducting base, breakdown voltage.

**Doklady BGUIR. 2019, Vol. 121, No. 3, pp. 5-11**

**Electrochemical alumina technology for power electronics devices**

**D.L. Shimanovich, V.A. Yakovtseva**

### Введение



Доктор технических наук, профессор,  
лауреат государственной премии Республики  
Беларусь, Сокол Виталий Александрович (1940–2018)

Электрохимическая алюмооксидная технология (ЭЛАТ) основана на использовании процесса анодного окисления (анодирования) вентильных металлов, преимущественно алюминия. ЭЛАТ активно развивается в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники (БГУИР) с 1975 года. Основы технологии разработаны доктором технических наук, профессором Соколом В. А. [1], запатентованы в США [2–4], защищены 60 авторскими свидетельствами СССР и Республики Беларусь. В 2000 г. авторам технологии присуждена Государственная премия Республики Беларусь. По результатам разработки и исследований технологии защищены 1 докторская и 12 кандидатских диссертаций.

Высокий уровень научных результатов обеспечил широкое признание школы В. А. Сокола.

Идеи сохраняются и развиваются при смене научных поколений: в настоящее время исследованиями в области анодного оксида алюминия в БГУИР активно занимается несколько научных лабораторий.

Кроме того, учениками В.А. Сокола открыты новые успешные предприятия за рубежом, выпуск продукции которых основан на электрохимической алюмооксидной технологии. В 1993 году бывший аспирант В.А. Сокола Семен Нефтин (Shimon Neftin) основал в Израиле компанию «Micro Components Ltd.», которая специализируется на выпуске многослойных алюмооксидных подложек для силовой электроники. В 2010 году в России при поддержке УК «РОСНАНО» была создана их дочерняя компания ООО «Русалокс» – высокотехнологичный разработчик и производитель подложек и печатных плат с высокой теплопроводностью, сделанных по электрохимической алюмооксидной технологии. А в 2017 году в Москве на территории инновационного центра Сколково была открыта еще одна дочерняя компания, занимающаяся алюмооксидной технологией – ООО «Русоксид».

### **Теплоотводящие алюмооксидные основания для приборов силовой электроники**

Силовая электроника – основа основ энергоэффективной экономики. Решить государственную задачу снижения энергопотребления возможно только с помощью высоких технологий, и в данном случае – через энергоэффективную преобразовательную технику, основу которой составляют приборы силовой электроники.

Когда в электронном устройстве используются компоненты, выделяющие значительную тепловую мощность (например, приборы силовой электроники, сверхяркие светодиоды, лазерные излучатели и т. д.), требуется монтаж компонентов выполнять на основаниях, обеспечивающих хороший теплоотвод. Ограниченные возможности диэлектрических подложек в обеспечении тепловых характеристик и электрофизических свойств вызывают необходимость использования подложек с более высокой механической и электрической прочностью, повышенной рассеиваемой мощностью и более низкой стоимостью.

Теплоотводящие печатные платы с металлическим основанием уже достаточно давно из экзотического продукта превратились в массовое, промышленное решение. Они прочно заняли свою нишу, которая в последние годы стремительно расширяется. Многие компании разрабатывают и производят материалы для таких плат. Самый важный элемент печатной платы, наиболее серьезно влияющий на ее свойства и стоимость, – это диэлектрики. Электрохимическая алюмооксидная технология позволяет создавать толстые (до сотен микрометров) диэлектрические слои (анодный оксид алюминия) на поверхности алюминиевых подложек с высокими пробивными напряжениями диэлектрического покрытия, в том числе на металлизированных отверстиях.

Напомним, что анодирование алюминия – это электрохимический процесс превращения исходного металла в его оксид. Анодирование осуществляется в ванне с электролитом, где размещается, например, алюминиевая пластина или образец с пленкой металла (анод), и к которой подводится положительный потенциал от источника питания. Второй электрод (катод), к которому подводится отрицательный потенциал от источника питания, представляет собой нейтральный по отношению к электролиту материал – нержавеющая сталь, никель, уголь и др. При прохождении тока между электродами в электролите на аноде происходит рост оксида.

В результате анодирования на алюминии возможно получение двух видов диэлектрических пленок  $Al_2O_3$  – плотных и пористых. Плотные пленки получают в электролитах, пренебрежимо мало растворяющих оксид, например, в водных растворах лимонной, борной или винной кислот. Плотный оксид представляет собой аморфный коррозионно-стойкий диэлектрик с хорошими диэлектрическими свойствами, однако его максимально достижимая толщина не превышает 1 мкм.

Для обеспечения высоких пробивных напряжений толщина пленки анодного оксида алюминия на алюминиевой подложке должна быть намного выше. Поэтому диэлектрический слой формируют в виде пленки пористого  $Al_2O_3$ , толщина которой может достигать сотен микрометров. Толщина оксида определяется плотностью тока ( $10\text{--}200\text{ мА/см}^2$ ) и временем

анодирования. Скорость роста определяется составом электролита и режимами анодирования и может составлять от долей до единиц микрометров в минуту.

Пористые пленки получают в электролитах, умеренно растворяющих оксид алюминия, например, в водных растворах ортофосфорной, щавелевой, серной и других кислот. Природа электролита является одним из определяющих параметров при проведении процесса электрохимического окисления алюминия. Для наиболее эффективного протекания процесса электрохимического окисления и получения оксида алюминия с хорошими диэлектрическими характеристиками электролит должен удовлетворять ряду требований, в том числе достижению максимальной производительности процесса при минимальных затратах мощности.

Пленки анодного оксида алюминия, обладающие хорошими электроизоляционными свойствами, получают при анодировании в щавелевокислом электролите. Для оксидных пленок, полученных из щавелевокислых электролитов, характерны малая пористость и хорошие адгезионные свойства. Раствор используют при комнатной температуре, однако существуют режимы анодирования при повышенных температурах (до 40 °С). Растворимость анодных пленок в щавелевой кислоте значительно меньше, следовательно, осуществляя процесс в этом электролите, проще получить толстые пленки, не прибегая к специальному охлаждению электролита.

По расходу тока стоимость анодирования в щавелевой кислоте выше, чем в серной кислоте. Но при анодировании в щавелевой кислоте более толстые покрытия можно получить без применения специальных методов, причем в течение первого часа увеличение толщины пленки находится почти в линейной зависимости от продолжительности обработки. Поэтому, когда требуется нанесение толстых покрытий, применяется анодирование в щавелевой кислоте. Кроме того, анодирование в растворе щавелевой кислоты позволяет увеличить эластичность анодной оксидной пленки за счет уменьшения размера ячеек при одновременном увеличении их количества на единице площади. Анодное покрытие, получаемое в растворе щавелевой кислоты, отличается повышенной износостойкостью – в два раза выше, чем у сернокислого.

Следует отметить, что оксидирование в щавелевой кислоте сопровождается значительным разогреванием электролита, что часто приводит к разъеданию пленки и металла. Поэтому необходимо соблюдать температурный режим и применять интенсивное перемешивание и охлаждение электролита. Температуру раствора следует контролировать в непосредственной близости от поверхности обрабатываемых изделий.

В процессе электролиза происходит уменьшение концентрации свободной щавелевой кислоты в результате связывания ее растворяющимся алюминием. За каждый ампер-час пропущенного через ванну электричества растворяется примерно 0,08–0,09 г металла и расходуется 0,13–0,14 г щавелевой кислоты. Исходя из этого, проводят периодическое корректирование электролита. Накопление в растворе алюминия ухудшает качество оксидных покрытий. При содержании его свыше 30 г/л электролит следует заменить свежеприготовленным. Не допускается также присутствие в растворе более 0,2 г/л хлоридов.

Введение добавок в щавелевокислый электролит уменьшает его растворяющее действие на формирующуюся оксидную пленку, что способствует получению компактных покрытий значительной толщины, при этом образуется поверхность с более ровным покрытием и уменьшается его пористость. Применение добавки в виде сульфата магния  $MgSO_4$  приводит к снижению внутренних напряжений в формируемой системе «Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» и к увеличению параметров термоустойчивости оксида алюминия при длительных процессах термоциклирования.

Пористый оксид обладает ячеистой морфологией, похожей на пчелиные соты. В центре каждой ячейки перпендикулярно поверхности располагается капиллярный канал-пора. Диаметр ячейки и диаметр поры прямо пропорциональны напряжению между анодом и катодом и оцениваются как:  $D_{яч} = 3k \cdot U_a$ ;  $d_n = k \cdot U_a$ , где  $D_{яч}$  и  $d_n$  – диаметр ячейки и поры соответственно;  $k = 1$  нм/В – постоянный коэффициент;  $U_a$  – напряжение анодирования между анодом и катодом. Толщина пористого оксида может достигать сотен микрон.

Пористое анодирование алюминия можно проводить в потенциостатическом или гальваностатическом режимах. Эти режимы являются основными при практическом использовании процессов анодирования.

Размеры ячеек в пористом анодном оксиде алюминия прямо зависят от параметров анодирования. При анодировании в потенциостатическом режиме размеры анодной ячейки увеличиваются с увеличением напряжения анодирования, а количество пор соответственно уменьшается. Соотношение между размером ячеек и напряжением приблизительно линейное, т. е. чем больше напряжение, тем больше размеры ячейки. При анодировании в гальваностатическом режиме размеры анодной ячейки увеличиваются с увеличением плотности тока анодирования.

Анодирование при постоянном напряжении в течение всего процесса позволяет формировать пористый оксид алюминия с однородными структурными размерами (диаметром) пор, что положительно сказывается на механизме заполнения каналов пор при последующей грунтовке и на пробивные напряжения  $Al_2O_3$ .

Без предварительного индентирования поверхности процесс порообразования во время анодирования алюминия носит случайный характер. Во время этого процесса наблюдается объединение или прекращение развития каналов пор, в результате чего развивается нерегулярная структура пористой пленки анодного оксида алюминия (наблюдается большой разброс в диаметре пор, расстояний между порами и упорядоченности). Для решения этой проблемы было предложено [5] использовать прием так называемого двухстадийного анодирования, суть которого заключается в следующем. На первой стадии при постоянном напряжении формируют тонкий слой пористого оксида с регулярной структурой пор. Сформированный слой химически удаляют до поверхности алюминия в селективном травителе в смеси фосфорной и хромовой кислот. После этого на поверхности алюминиевой пластины остаются ямки травления полусферической формы – отпечатки дна ячеек первичного пористого оксида алюминия (предварительное индентирование поверхности алюминия). Далее проводят второе пористое анодирование алюминия при тех же электрохимических условиях (в том же электролите, при той же температуре и при том же постоянном напряжении анодирования). При втором пористом анодировании поры на поверхности алюминиевой пластины зарождаются не хаотически, а в местах отпечатков ячеек первичного оксида, повторяя размер диаметра ячейки.

Технологический подход позволяет создавать наноструктурированный оксид алюминия в виде высокоорганизованной и высокоупорядоченной пористой матрицы с параллельными каналами пор по всей глубине и минимальным разбросом диаметра пор (высокой однородностью пор). Отсутствие тупиковых пор и их извилистости позволяет улучшить качество заполнения пор грунтовочными материалами по всей глубине и повысить пробивные напряжения конечных диэлектрических покрытий.

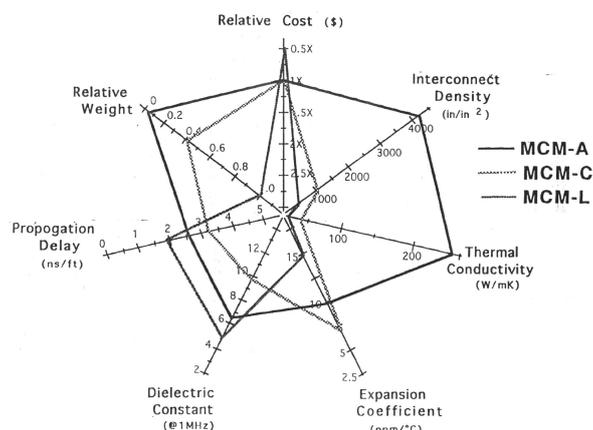
В БГУИР разработана технология (на основе оптимизированных составов электролитов, приемов, методик, режимов анодирования и грунтовки пористого оксида алюминия) получения анодированных теплопроводящих подложек алюминия с пробивными напряжениями диэлектрического слоя анодного оксида алюминия выше 6 кВ [6–12].

### **Перспективы использования ЭЛАТ**

Сравнение разработанной в БГУИР технологии ЭЛАТ, которая применительно к многокристальным модулям получила название технология МСМ-А (MultiChip Module-A, А – обозначает основную базовую операцию – анодирование) с аналогичными разработками (МСМ-L – более высокая версия печатных плат, МСМ-C – керамическое основание и толсто пленочная технология, МСМ-D – тонкопленочная технология), имеющимися за рубежом, проведенное компанией «Landis» (США) по заказу «East/West Technology Partners, Ltd.», показало, что разработанная технология превосходит имеющиеся разработки [13]. Сравнение технологий проводили по семи степеням доброкачественности, как показано на рисунке.

Разработанная технология может быть использована при создании практически любого радиоэлектронного устройства для работы в области температур от 10 до 473 К и частот гигагерцового диапазона. Особенно эффективно применение для мощных устройств (автомобилестроение, станкостроение, спецтехника, космос, и др.). Преимущества

электрохимической алюмооксидной технологии над конкурирующими – как слоистой/наращенной, так и керамической – в технических характеристиках и стоимости.



Сравнение электрохимической алюмооксидной технологии (MCM-A) с аналогичными разработками (MCM-C и MCM-L)

Применение разработанной технологии очень эффективно для создания устройств СВЧ диапазона. Дело в том, что при увеличении рабочей частоты необходимо уменьшать толщину диэлектрического слоя, и в области частот выше 50 ГГц толщина диэлектрика должна составлять 200–300 мкм. Эта проблема осложняется значительным повышением требований по частоте. В 1979 году 147 делегаций государств – членов МСЭ в Женеве провели межправительственную конференцию, решения которой имеют силу международного договора и по-прежнему оказывают решающее воздействие на развитие всех видов радиосвязи и радиовещания в XXI веке. Это была ВАРК-79 – World Administrative Radio Conference of 1979 (WARC-79) [14]. Прошло уже сорок лет с того момента, как ВАРК-79 полностью пересмотрела Регламент радиосвязи, вступивший в силу 1 января 1982 года, однако ряд соглашений применяется до сих пор. В их числе Соглашения, которые регулируют деятельность мировой отрасли, связанной с использованием радиочастотного спектра и спутниковой связи. Был утвержден план освоения микроволновой области свыше 40 ГГц, которая предусматривает разработку технологий крайне высоких (30–300 ГГц) и гипервысоких (300–3000 ГГц) частот. Для этих частот алюминиевые основания с диэлектрическим алюмооксидным слоем сейчас рассматриваются как единственный вариант, пригодный для использования.

### Заключение

Разработана технология получения анодированных теплопроводящих подложек алюминия с пробивными напряжениями диэлектрического слоя анодного оксида алюминия выше 6 кВ, которая может быть успешно использована при создании силовых многокристальных микроэлектронных модулей (диодных, тиристорных и IGBT-сборок, силовых ключей, релейных переключателей, AC/DC и DC/DC-преобразователей и др.) в авиационном и автомобильном приборостроении, в железнодорожной, сварочной, промышленной автоматике и т. д., что позволит снизить зависимость от импортных технологий и значительно увеличит срок службы в сравнении с используемыми в настоящий момент.

### Список литературы

1. Сокол В.А. Конструктивно-технологические методы создания гибридных микросхем на основе алюминия и его анодных оксидов: дисс. ... докт. техн. наук. Минск, 1988.
2. Process for making multilevel interconnections of electronic components: pat. 5580825 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, V.M. Parkun, A.I. Vorob'yova; published: 31.03.1996.
3. Method of making multilevel interconnections of electronic parts: pat. 5880021 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, V.M. Parkun, A.I. Vorob'yova; published: 03.09.1999.

4. Multilevel interconnections of electronic components: pat. 6069070 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, Steve Lerner; published: 30.05.2000.
5. Masuda H., Fukuda K. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina / *Science*. 1995. Vol. 268. P. 1466–1468.
6. 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.
7. Шиманович Д.Л. Технологические режимы формирования дополнительных диэлектрических пленок на пористой поверхности алюмооксидных оснований и исследование электрофизических и теплофизических характеристик модифицированных покрытий // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2017. Т. 17, № 2. С. 573–576.
8. Sokol V., Yakovtseva V. Electrolyte Hydrodynamics in Anodic Alumina Pores // *Russian Microelectronics*. 2014. Vol. 43, № 5. P. 358.
9. Express-Method for the Study of Electrolyte Anion Profiles in the Bulk of Dense Anodic Alumina Films. *MRS Advances* / V. A. Yakovtseva [et al.]. 2018. Vol. 3, iss. 11. P. 569–574.
10. Технологические особенности сквозного двухстороннего анодирования при формировании алюмооксидных оснований для микрополосковых СВЧ-структур / Д.Л. Шиманович [и др.] // *Сб. матер. Четвертого междисциплинарного междунар. науч. форума «Новые материалы и перспективные технологии»*. Москва, 2018. Т. 2. С. 771–774.
11. Исследование теплофизических и электрофизических свойств покрытий на основе анодного оксида алюминия, модифицированного вакуумно-осажденными диэлектрическими пленками / Д.Л. Шиманович [и др.] // *Сб. матер. Четвертого междисциплинарного междунар. науч. форума «Новые материалы и перспективные технологии»*. Москва, 2018. Т. 2. С. 775–779.
12. Анодированные алюминиевые подложки для устройств гигагерцового диапазона / Д.Л. Шиманович [и др.] // *Сб. трудов XXIV Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь»*. Воронеж, 2018. Т. 5. С. 422.
13. Report to East/West Technology Partners, Ltd. All Aluminum technology for multichip modules (MCM-A).
14. Final Acts of WARC-79. 1979. 984 p.

## References

1. Sokol V.A. Konstruktivno-tehnologicheskie metody sozdaniya gibridnyh mikroshem na osnove aljuminija i ego anodnyh oksidov: diss. ... dokt. tehn. nauk. Minsk, 1988. (in Russ.)
2. Process for making multilevel interconnections of electronic components: pat. 5580825 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, V.M. Parkun, A.I. Vorob'yova; published: 31.03.1996.
3. Method of making multilevel interconnections of electronic parts: pat. 5880021 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, V.M. Parkun, A.I. Vorob'yova; published: 03.09.1999.
4. Multilevel interconnections of electronic components: pat. 6069070 US / V.A. Labunov, V.A. Sokol, Steve Lerner; published: 30.05.2000.
5. Masuda H., Fukuda K. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina / *Science*. 1995. Vol. 268. P. 1466–1468.
6. Shimanovich D.L. Optimizacija metodov formirovanija tolstoslojnyh dijelektricheskikh pokrytij na osnove anodnogo oksida aljuminija pri jelektrohimičeskom anodirovanii širokoformatnyh Al-podlozhek i teploprovodjashhih osnovanij s radiatorami // *Fundamental'nye problemy radiojelektroonnogo priborostroenija*. 2016. Т. 16, № 3. С. 116–119. (in Russ.)
7. Shimanovich D.L. Tehnologicheskie rezhimy formirovanija dopolnitel'nyh dijelektricheskikh plenok na poristoj poverhnosti aljumooksidnyh osnovanij i issledovanie jelektrofizicheskikh i teplofizicheskikh harakteristik modifitsirovannyh pokrytij // *Fundamental'nye problemy radiojelektroonnogo priborostroenija*. 2017. Т. 17, № 2. С. 573–576. (in Russ.)
8. Sokol V., Yakovtseva V. Electrolyte Hydrodynamics in Anodic Alumina Pores // *Russian Microelectronics*. 2014. Vol. 43, № 5. P. 358.
9. Express-Method for the Study of Electrolyte Anion Profiles in the Bulk of Dense Anodic Alumina Films. *MRS Advances* / V. A. Yakovtseva [et al.]. 2018. Vol. 3, iss. 11. P. 569–574.
10. Tehnologicheskie osobennosti skvoznogo dvuhstoronnego anodirovanija pri formirovanii aljumooksidnyh osnovanij dlja mikropoloskovykh SVCh-struktur / D.L. Shimanovich [i dr.] // *Sb. mater. Четвертого междисциплинарного междунар. науч. форума «Novye materialy i perspektivnye tehnologii»*. Москва, 2018. Т. 2. С. 771–774. (in Russ.)
11. Issledovanie teplofizicheskikh i jelektrofizicheskikh svojstv pokrytij na osnove anodnogo oksida aljuminija, modifitsirovannogo vakuumno-osazhdennymi dijelektricheskimi plenkami / D.L. Shimanovich [i dr.] // *Sb. mater.*

- Chetvertogo mezhdisciplinarnogo mezhdunar. nauch. foruma «Novye materialy i perspektivnye tehnologii». Moskva, 2018. T. 2. S. 775–779. (in Russ.)
12. Anodirovannye aljuminievye podlozhki dlja ustrojstv gigagercovogo diapazona / D.L. Shimanovich [i dr.] // Sb. trudov XXIV Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Radiolokacija, navigacija, svjaz». Voronezh, 2018. T. 5. S. 422. (in Russ.)
  13. Report to East/West Technology Partners, Ltd. All Aluminum technology for multichip modules (MCM-A).
  14. Final Acts of WARC-79. 1979. 984 p.

#### **Сведения об авторах**

Шиманович Д.Л., заведующий лабораторией Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Яковцева В.А., к.т.н., ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. 375-17-293-88-50;  
e-mail: shdl@tut.by  
Шиманович Дмитрий Леонидович

#### **Information about the authors**

Shimanovich D.L., head of the laboratory of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Yakovtseva V.A., PhD, leading researcher of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

#### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, Brovki, 6,  
Belarusian state university  
of informatics and radioelectronics  
tel. 375-17-293-88-50;  
e-mail: shdl@tut.by  
Shimanovich Dimitry Leonidovich