

Влияние технологического развития на повышение адгезионной прочности металлических тонкопленочных покрытий на керамические подложки оксида алюминия

*Л.Л. Колесник, Мьо Чжо Хлаинг, Зау Пхо Аунг, Мьо Мин Латт
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 1
e-mail: kolesnik@bmstu.ru*

В этой работе рассмотрено сравнение адгезионной прочности с Ti слоем и без этого слоя между проводящей покрытием и подложкой. Сравнение покрытий полученных с помощью магнетрона постоянного тока и в импульсном режиме с различным давлением в вакуумной камере. При вставке подслоя титана адгезионная прочность в 10 раз больше, чем у однослойного медного покрытия. Наилучшее значение адгезионной прочности было получено с использованием магнетрона с постоянным током и давления в камере 8.8×10^{-2} мбар. Была проведена серия экспериментов с различными положениями подложки и максимальным и минимальным расстоянием между подложкой и мишенью для предотвращения разрушения подложки при осаждении с горячей мишенью, чтобы ограничивать тепловой эффект на подложку.

***Influence of the technological development on the adhesion increment of metallic thin film coatings to ceramic substrates of aluminum oxide. L.L.Kolesnik, Myo Kyaw Hlaing, Zaw Phyo Aung.** Comparison of the adhesive strength with the Ti layer and without this layer between the conductive coating and the substrate is considered. Comparison of coatings is obtained with the help of direct current magnetron and in a pulsed mode with different pressures in a vacuum chamber. When inserting a sublayer of titanium, the adhesive strength is 10 times greater than that of a single-layer copper coating. The best value of adhesive strength was obtained using a magnetron with a constant current and the pressure in the chamber of 8.8×10^{-2} mbar. A series of experiments was performed with different substrate positions and the maximum and minimum distance between the substrate and the target to prevent the substrate from collapsing during deposition with the hot target in order to limit the thermal effect to the substrate.*

Введение

Силовые электронные модули, выпускаемые отечественной промышленностью, содержат в конструкции элементы соединений металл-керамика. Эти соединения требуются для адгезионной прочности, устойчивости к изменениям температуры. Типовые области применения: системы навигации летательных аппаратов, элементы коммутации силовых схем и другие. Типовой модуль силовых устройств, показанный на рис. 1, состоит из коммутационной платы, на которой сформированы токопроводящие дорожки, установлены электронные компоненты и радиаторы охлаждения. Типовая коммутационная плата из нитрида алюминия с проводящими дорожками показана на рис. 2.

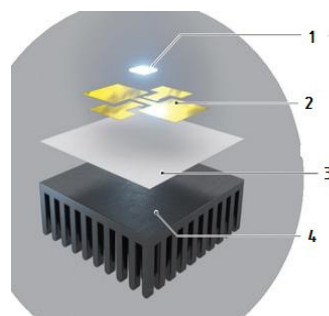


Рис. 1. Типовой модуль силовой электроники.

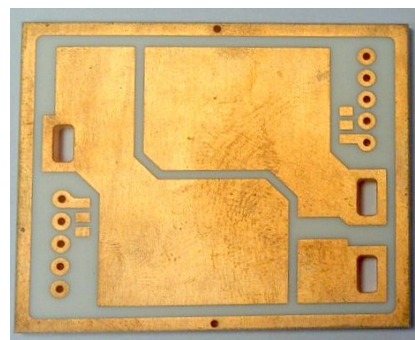


Рис. 2. Типовая коммутационная плата. Материал: керамика, размеры 48x60 мм, металлизация - медь.

По литературному анализу требуются необходимые параметры для силовых модулей, основными важными являются рабочая температура и адгезия пленок к подложке. В процессе эксплуатации силовых модулей, они подвергаются тепловым и механическим нагрузкам, в том числе вибрации. Это приводит к разрушению компонентов от перегрева и механическим повреждениям. Часто повреждения происходят в структуре подложка-проводящее покрытие. Поэтому нам нужно выбрать материал подложки для удаления тепла и предотвращения повреждения, описанного выше.

На данный момент эти соединения выполняются на основе толстопленочных технологий, особенно используют технологию прямого соединения меди DBC и другие различные атмосферные методы. Эти модули применяются в областях техники, связанных с необходимостью передачи сильноточных сигналов. Технология тонких пленок обеспечивает, как правило, отсутствие дефектов толстопленочных технологий, а по другому показателю превосходит их. Переход к тонкопленочным технологиям для создания основы паяльных элементов вакуумных устройств и силовых модулей позволит снизить процент брака и повысить качество этих соединений.

В настоящее время различные типы керамики используются в качестве материалов подложки для изготовления коммутационной платы силовых модулей. В следующей таблице показаны свойства основных материалов для выбора подложки. Важными характеристиками являются механическая прочность, теплопроводность и коэффициент термического расширения. Коэффициент термического расширения должен быть близок к показателю покрытия, чтобы избежать разрушения структуры металл-керамика при изменении температуры. Подложки из нитрида алюминия являются наиболее перспективным кандидатом для улучшения рассеивания тепла в электронной технике. Подложки из AlN обладают несколькими отличными характеристиками, такими как высокая теплопроводность в 10 раз выше чем оксид алюминия (Al₂O₃), коэффициент теплового расширения близкий к коэффициенту теплового расширения кремний, высокое электроизоляционное свойство, низкая диэлектрическая постоянная и потеря, хорошие механические свойства и нетоксичность,

экологически чистая и относительно недорогая (ее удельная стоимость в 5-7 раз ниже удельной стоимости керамики из оксида бериллия. Целью данной работы является температурная зависимость от положения подложки в камере и угла распыления с магнетронным распылением. Повышение адгезионной прочности керамических подложек для производства силовых электронных устройств и электро вакуумных устройств.

Экспериментальные условия

Была проведена серия экспериментов по исследованию нанесения покрытий в лабораторной установке. В этой работе используются подложки из оксида алюминия. Мы выбрали материал Ti для адгезионного слоя из многих популярных материалов, например Cr, Ta и др. Адгезионный слой наносили методом магнетронного распыления постоянного тока и в импульсном режиме с различными частотами и коэффициентами заполнения. Медный слой формироваан термическим испарением, для каждого эксперимента определено режим мощности 0,20 кВ. При этих режимах была проведена серия экспериментов для получения двухслойных покрытий пленок Cu / Ti / Al₂O₃ двумя способами в едином вакуумном цикле. Перед нанесением покрытий были очищены поверхность подложки в ультразвуковой ванне около 10 мин, а температура составила 25-27 градусов Цельсия. При ультразвуковой очистке крупные жировые загрязнения удаляются вследствие интенсивного локального перемешивания под действием, создаваемых в растворителе ударных волн. Недостатком химической подготовки поверхности является также и то, что эта обработка в принципе не обеспечивает удаление физически адсорбированной влаги, тем более хемосорбированной. Двухслойное покрытие на керамической подложке нанесено в следующем условий.

Подача газа (аргон)	30 sccm
Напряжение	650 В
Время нанесения	5 мин
Расстояние между подложкой и мишенью	75 мм
Мощность	380 Вт

Результаты и обсуждение

Первая серия экспериментов была однослойное проводящее покрытие токих пленок на подложке из оксида алюминия, а затем двухслойное покрытие было нанесено на тех же подложках для сравнения адгезионной прочности этих двух пленок. Следующий график сопоставляет результаты выбранного режима.

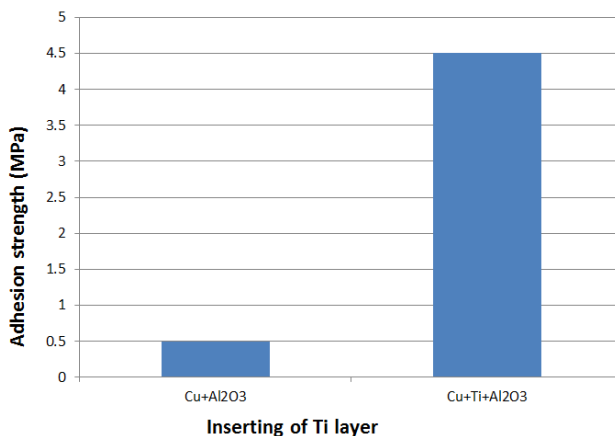


Рис. 3. Адгезионная прочность с Ti слоем и без Ti слоя.

Адгезионная прочность с Ti была в 10 раз больше, чем у однослойного медного покрытия. Было показано, что Ti внедряется в качестве адгезионного слоя, который используется для пайки компонентов (медь, олово-золото и т. Д.).

Для определения влияния режимов применения клеящего подслоя, исследования проводились при различных условиях источника питания и давления во время нанесения. Для под слоя слоя Ti с магнетроном постоянного тока 650 В и в импульсном режиме.

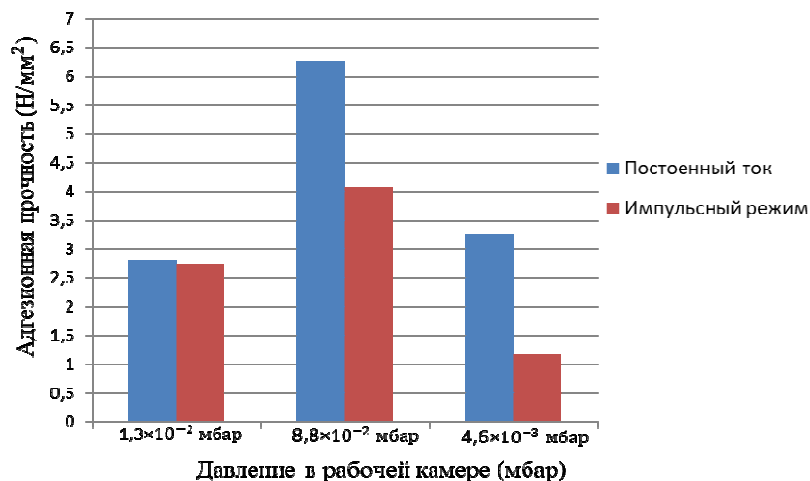


Рис. 4. Сравнение адгезионной прочности при постоянном токе магнетрона и импульсном режиме при различных давлениях в рабочей камере.

Наилучшее значение адгезионной прочности было получено с использованием магнетрона с постоянным током и давления в камере $8,8 \times 10^{-2}$ мбар.

Была проведена серия экспериментов по исследованию нанесения покрытий в температурном режиме. Были определены разные частоты и коэффициент заполнения в импульсном режиме магнетронной распылительной системы $f=30$ кГц $D=50\%$, $f=30$ кГц $D=70\%$, $f=90$ кГц $D=70\%$ и $f=70$ кГц $D=55\%$. Магнетрон работал в следующем режиме: мощность - 380 Вт, рабочий газ - аргон 30 ссст, мишень - титан. Расстояние от мишени до подложки составляет 75 мм. Температура подложки была измерена с помощью термопара по каждому 20 секундам. При частоте 20 кГц и Коэффициенте заполнения 80% получена самая высокая температура подложки. Определено, что подложка нагревается до температуры 220 С и выше, причем на начальной стадии скорость нагрева достигает до 40 С/мин, что показано на рис. 5.

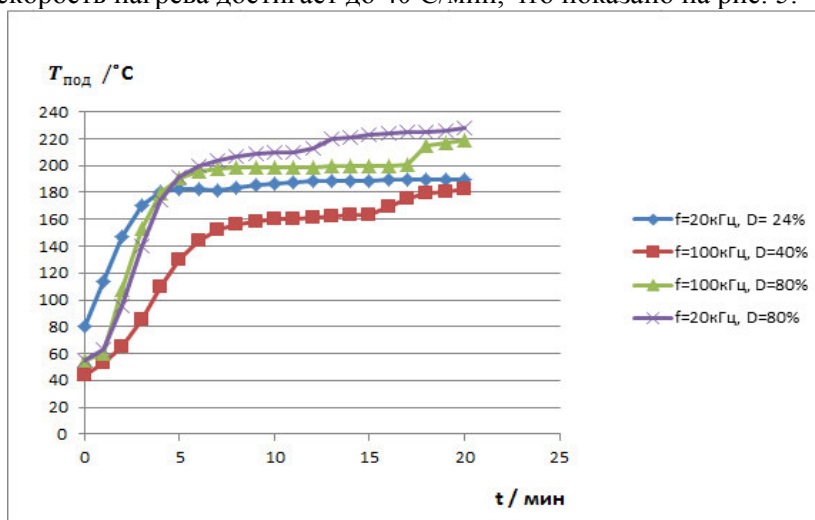


Рис. 5. Температура подложки, на начальной стадии скорость нагрева достигает до 40 С / мин.

В процессе отработки режимов наблюдались случаи разрушения образцов. Поскольку нанесение идет с горячей мишени, нагретой – 1000 было высказано предположение, что разрушение происходит из-за теплового воздействия. Было выявлено, что благодаря диффузному рассеянию материала из-за высокой давления в зоне нанесения происходит запыление обратной стороны подложки. Высокая скорость нагрева на начальной стадии приводит к разрушению пленок. Это показано на рис. 6 и 7.

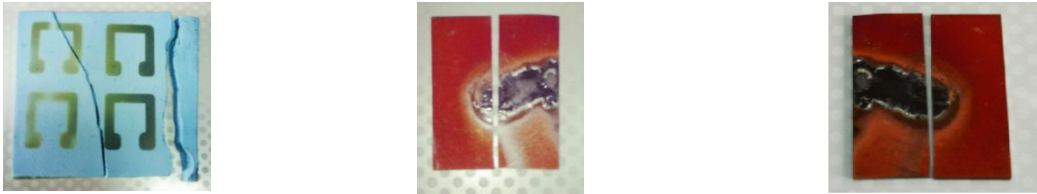


Рис. 6. Внешний вид образцов, подвергавшихся перегреву и разрушенных в процессе нанесения покрытия.

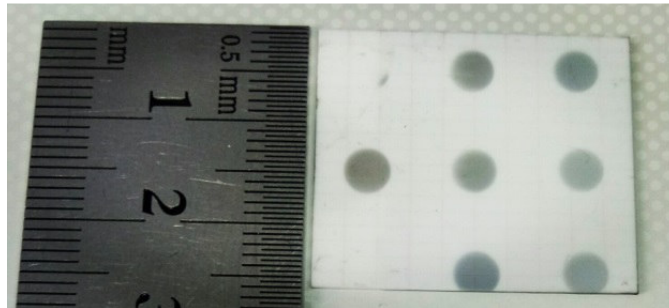


Рис. 7. Запыление задней стороны подложки во время нанесения покрытия.

Известно, что в лучистом теплообмене величина потока, подающего на поверхность зависит от углового коэффициента (A) он зависит от кос угла к нормали поверхности.

$$v_c = \frac{v_e * S_s * \cos \varphi * \cos \theta * \alpha}{\pi * r^2}$$

$$L = \frac{0,63}{p} = \frac{0,63}{1} \approx 0,63 \text{ см, } 1/10$$

Расчеты подтвердили, что при используемых режимах длина свободного пробега наносимого материала в 10 раз меньше расстояния источника-подложка. Этим объясняется запыление обратной стороны подложки. Следовательно, должно быть такое положение подложки, при котором температурное воздействие минимально, а скорость формирования покрытия достаточна.

Температура подложки измерена для разных положений подложкодержателя. Максимальное расстояние от мишени до подложки составляло 110 мм, а минимальное расстояние между ними составляло 75 мм.

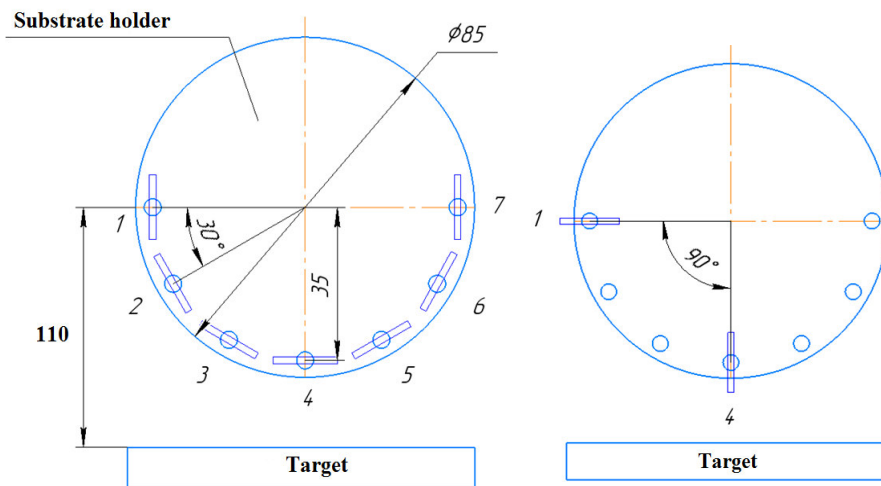


Рис. 8. Расположение подложки с разными углами и расстояние от мишени до подложки.

При этих значениях были проведен полный факторный эксперимент на позиции 1 и 4. Проведено 2 эксперимента, в каждом по 3 параллельных наблюдения для каждой комбинации факторов с целью повышения точности эксперимента.

При проведении эксперимента варьируется расстояние между подложкой и мишенью, для каждого значения расстояния варьируется угол распыления, Выходным параметром является температура подложки.

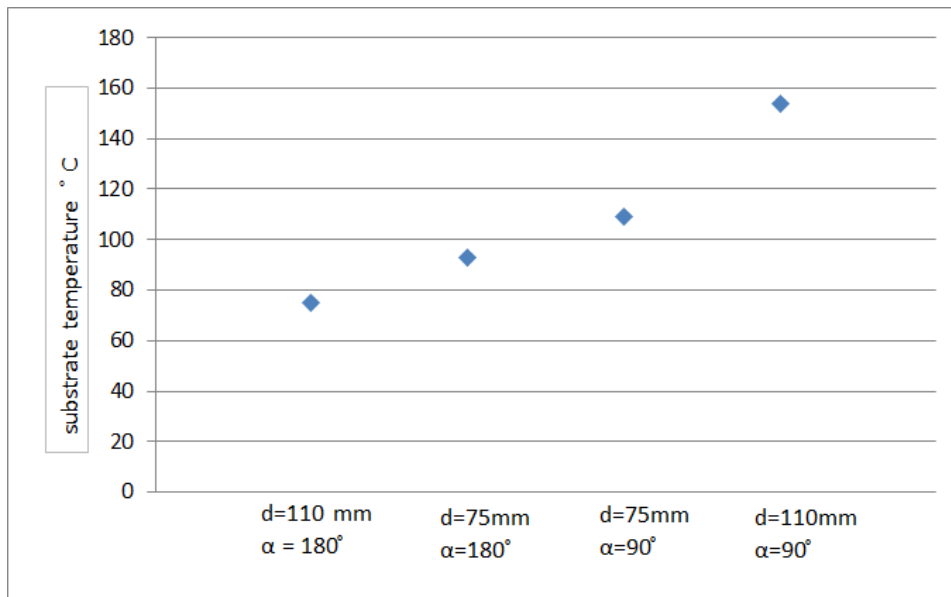


Рис. 9. Зависимость температуры подложки от угла и ее расположения до нормального. Температура подложки ($d = 110$ мм, $\alpha = 180^\circ$ составляет 75 градусов Цельсия), ($d = 75$ мм, $\alpha = 180^\circ$ составляет 93 градуса Цельсия), ($d = 75$ мм, $\alpha = 90^\circ$ составляет 109 градуса Цельсия) и ($d = 110$ мм, $\alpha = 90^\circ$ составляет 153 градуса Цельсия).

Была построена математическую модель, связывающая параметры теплового потока, которая позволит определять оптимальное положение подложки для достижения требуемой скорости роста пленки при минимальном тепловом воздействии.

Литература

1. Колесник Л.Л., Жулева Т.С., Предтеченский П.О., Мьо Чжо Хлаинг, Зао Пхо Аунг. Обработка технологии металлизации алюмооксидной керамики для элементов электровакуумных приборов и устройств силовой электроники // Вакуумная техника и технологии – 2017: Труды 24-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. / под. Ред. д-ра техн. наук А.А. Лисенкова. – Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. с. 208-210.
2. Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology / ed. by P.M. Martin. - 3rd ed. – Burlington; Oxford: William Andrew / Elsevier, 2010. – xviii, 912 p.: ill. – Bibliogr. at the end of the chapters. ISBN 978-0-8155-2031-3
3. А. Г. Лучкин, Г. С. Лучкин, ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖЕК ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ.
4. Kolesnik L.L., Dejev V.A., Seleznev A.B. Analysis of the possibility of using the steam-jet deposition method for the metallization of substrates // Vacuum science and technology: Materials of the 20th scientific and technical conference with the participation of foreign specialists, 2013 . 165-167 p.
5. US. Patent 5571332 – Electron Jet Vapor Deposition System, 1996.
6. Danilin B.S., Syrchin V.K. Magnetronnyyeraspylitel'nyyesistemy; Radio isvyaz'. 1982. 72 p.
7. Marakhtanov M.K. Magnetronnyyesistemyionnogoraspyleniya (Osnovyteoriiirascheta). M. : BMSTU. 1990. 76 p.

Системы питания ВЧ-напряжением для вакуумно-технологического оборудования

В.С.Мачикин

ООО «ПЛАЗМА-ТЕХ»

г.Москва, Садовническая ул., д.72, стр.1, оф.6

iver@mail.ru

Предприятие ООО «ПЛАЗМА-ТЕХ» разработало и освоило выпуск с 2017 года двух систем питания ВЧ-напряжением.

Первая система, работающая на фиксированной частоте 13,56 МГц, состоит из ВЧ-генератора с активной выходной мощностью 600 Вт или 1000 Вт, автоматического согласующего устройства и соединительных кабелей. Варианты исполнения согласующего устройства позволяют работать системе на емкостной ВЧ-разряд, на ВЧ-магнетрон распыления и на индукционный ВЧ-разряд.

Вторая система, работающая в диапазоне частот 0,8 ÷ 2 МГц с автоподстройкой частоты на резонанс в нагрузочном ВЧ-индукторе, состоит из AC/DC-блока питания и управления, ВЧ-инвертора с активной выходной мощностью до 3 кВт и соединительных кабелей. Система ориентирована на питание ГРК ВЧ-источников ионов с индукционным разрядом.

Power supply systems for high-voltage equipment for vacuum processing equipment V.S.Machikin. LLC «PLASMA-TECH». The company PLAZMA-TECH LLC has developed and mastered the production of two high-voltage power supply systems since 2017.

The first system, operating at a fixed frequency of 13.56 MHz, consists of an RF generator with an active output power of 600 W or 1000 W, an automatic matching device and connecting cables. The variants of the matching device allow the system to operate on a capacitive HF discharge, on an RF magnetron sputtering and on an induction HF discharge.