

Исследование режимов формирования металлических покрытий на керамических подложках

Л.Л. Колесник, МьоЧжоХлаинг, ЗауПхоАунг
Москва, МГТУ имени Н.Э. Баумана, 105005, 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 1
e-mail: kolesnik@bmstu.ru

В этой работе рассмотрены температурные режимы нанесения подслоя титана относительно мишени. Были определены шероховатости покрытий и адгезионную прочность при выбранных режимах. 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, что необходимо ограничивать тепловой эффект на нее.

The study of formation modes of metallic films coating on ceramic substrates. L.L.Kolesnik, Myo Kyaw Hlaing, Zaw Phyو Aung. The temperature modes of titanium sublayer deposition relative to the target are considered. The roughness of the coatings and the adhesion strength for the selected modes was determined. A series of experiments was carried out with different substrate positions and the maximum and minimum distance between the substrate and the target to prevent substrate destruction during hot target deposition, which should limit the thermal effect on it.

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. Типовая коммутационная плата из нитрида алюминия с проводящими дорожками показана на рис. 1.

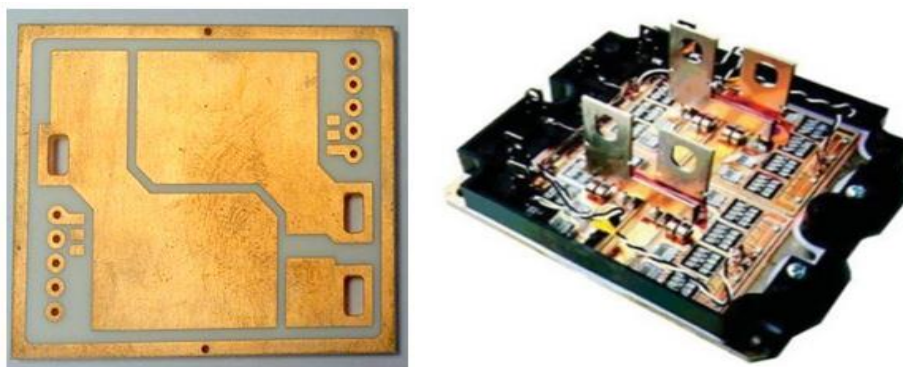


Рис. 1. Типовая коммутационная плата с проводящими дорожками и внешний вид силового модуля.

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 ДВС и другие различные атмосферные методы. Технология тонких пленок обеспечивает, как правило, отсутствие нескольких типов 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.

С 2016 года в Московском Государственном Технологическом Университете им. Баумана была проведена модернизация лабораторной установки для обработки технологии тонкопленочного покрытия в вакууме. В результате установка получила два независимых источника: термический испаритель и магнетронную распылительную систему. Процесс модернизации заключался в монтаже газовой и магнетронной распылительной системы, что обеспечила технологическую базу для отработки процессов нанесения тонкопленочных покрытий. Это позволяет формировать двухслойные покрытия в едином вакуумном цикле.

В настоящее время различные типы керамики используются в качестве материалов подложки для изготовления коммутационной платы силовых модулей. Важными характеристиками для выбора подложки 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 кремния, высокое электроизоляционное свойство, низкая диэлектрическая постоянная и потеря, хорошие механические свойства и не токсичность, экологически чистая и относительно недорогая (ее удельная стоимость в 5-7 раз ниже удельной стоимости керамики из оксида бериллия).

Целью данной работы является выявление зависимости температурного режима нанесения и свойств покрытий от положения подложки относительно магнетронной распылительной системы.

Экспериментальные условия

Магнетрон с горячей мишенью дает возможности значительно повысить скорость роста осаждения и качества пленки. Для выявления горячей мишени конструктивно минимизирован отвод тепла от мишени и создает промежуток между катодом и охлаждающей поверхностей. У такого магнетрона мишень разогревается до температуры близкой к плавлению металла мишени за счет интенсивной ионной бомбардировки. Главным образом скорость испарения нагретой поверхности при нанесении магнетрона с горячей мишенью является высокая скорость осаждения покрытия. Высокая скорость осаждения покрытия зависит от увеличения удаления атомов из мишени. Для этого необходимо усилить эрозионный поток на поверхность мишени. В одной стороны повышением эффективности ионизации является плотная плазма в области мишени. Это приводит к увеличению ионной бомбардировки на поверхность мишени. С другой стороны температура мишени достигается до близкой плавления металла мишени и у распыленных атомов имеет тепловая кинетическая скорость молекула, которые переносят в подложку. Поэтому при больших тепловых воздействиях могут повреждаться подложка и покрытие.

Первоначально была проведена серия экспериментов по исследованию нанесения покрытий в температурном режиме. При этом расстояние от мишени до подложки составляет 75 мм. Температура подложки была измерена с помощью термopара по каждому 20 секундам и достигается до 220 °C и выше, причем на начальной стадии скорость нагрева достигает до 40°C/мин. В процессе отработки режимов наблюдались случаи разрушения образцов. Поскольку нанесение идет с горячей мишени, нагретой – 1000°C было высказано предположение, что разрушение происходит из-за теплового воздействия. Было выявлено, что благодаря диффузному рассеянию материала из-за высокой давлений в зоне нанесения происходит запыления обратной стороны подложки. Высокая скорость нагрева на начальной стадии приводит к разрушению пленок. Это показано на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид образцов, подвергающихся перегреву и разрушенным в процессе нанесения покрытия.

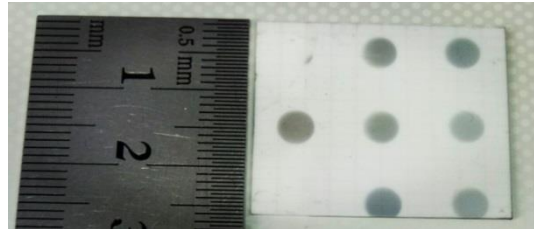


Рис. 3. Распыление задней стороны подложки во время покрытия.

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

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

Расчеты подтвердили, что при используемых режимах длина свободного пробега наносимого материала в 10 раз меньше расстояния источник-подложка. Этим объясняется запыление обратной стороны подложки.

Поэтому была спроектирована и изготовлена специальная оснастка, позволяющая размещать подложки на различном расстоянии и под разными углами относительно магнетронной распылительной системы. Это позволило регулировать температурное воздействие на подложку со стороны магнетронной распылительной системы. Схема оснастки и расположения образцов приведена на рис. 4.

Нанесение покрытия проводилось с магнетронной распылительной системой в следующем режиме,

- мощность распыления - 380 Вт;
- рабочий газ – аргон, подача 30 сссм;
- время распыления 15 мин, максимальное расстояние от мишени до подложки составляло 110мм,
- а минимальное расстояние между ними составляло 75 мм.
-

Результаты и обсуждение

Известно, в вакуумной камере при пониженном давлении теплообмен происходит преимущественно за счет излучения. В теории лучистого теплообмена величина потока, падающего на одну поверхность с другой поверхности, зависит от углового коэффициента, который может быть рассчитан по формуле,

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

где φ и θ углы между линией, соединяющей поверхности и их нормальными.

Следовательно, изменяя угол наклона подложки относительно мишени, можно снизить величину теплового воздействия на нее. При этом должно быть такое положение подложки, при котором температурное воздействие минимально, а скорость формирования покрытия достаточна.

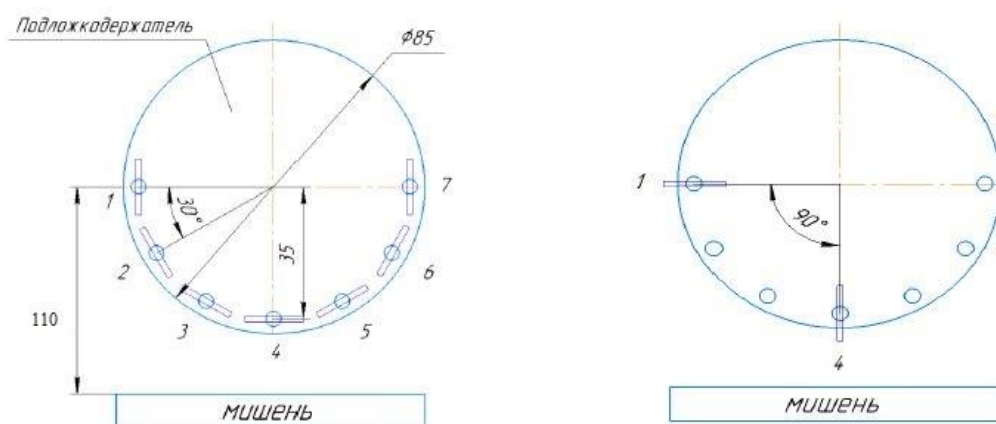


Рис. 4. Расположение подложки с разными углами и расстояние от мишени до подложки.

Температура подложки была измерена для разных положений подложки. Результаты измерения температуры для различных положений подложки относительно мишени представлены на рис 5,

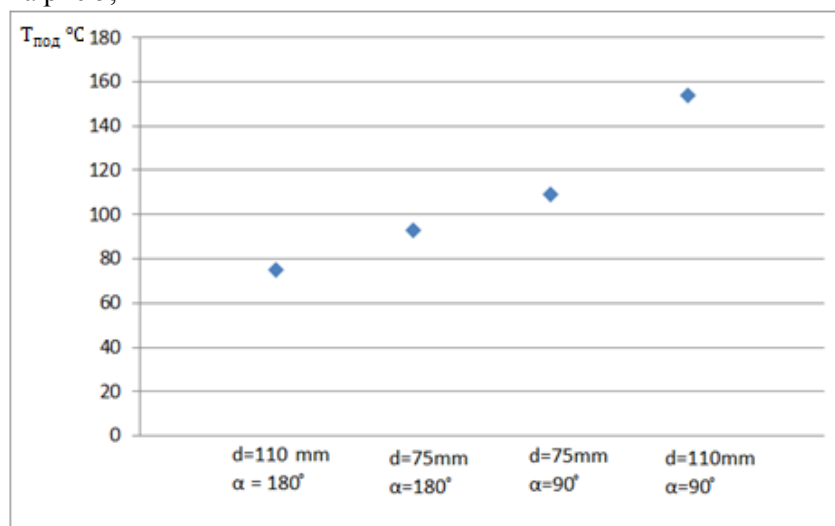


Рис. 5. Зависимость температуры подложки от угла и ее расположения относительно мишени.

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 градусов Цельсия) и ($d = 110$ мм, $\alpha = 90^\circ$ составляет 153 градуса Цельсия).

Образцы были исследованы на атомно-силовом микроскопе. В процессе исследований измерялась толщина и шероховатость покрытия. Результаты измерения представлены в Таблице 1. Как видно из таблицы, в экспериментах угол наклона образца по отношению к мишени мало влияет на толщину полученного тонкопленочного покрытия. Это подтверждает предположение о том, что формирование покрытия происходит в облаке молекул распыленного материала, в режиме диффузного рассеяния.

Однако, результаты измерения шероховатости покрытий показали высокое влияние положения подложки относительно мишени на шероховатость покрытия. Наибольшую шероховатость имеют образцы, полученные при угле наклона относительно мишени равном 30° , наименьшее значение шероховатости показали образцы, полученные при угле наклона равном 180° , то есть параллельные мишени. Зависимость шероховатости пленки от угла наклона показана на рис. 6.

Таблица 1. Результаты определения толщин и шероховатости адгезионного подслоя.

№ ре- жима	№ об- разца	Угол накло- на образца, °	Толщина по- крытия, мкм	Шероховатость Ra, нм
А	1	180	1,32	1,257
	2	60	1,46	3,348
	3	30	1,57	3,650
	4	90	1,19	1,112
	5	30	1,39	9,471
	6	60	1,34	4,768
	7	180	1,33	1,717
Б	1	180	1,42	2,896
	2	60	1,36	5,432
	3	30	1,22	6,762
	4	90	1,29	1,026
	5	30	1,51	10,130
	6	60	1,46	4,325
	7	180	1,34	1,122

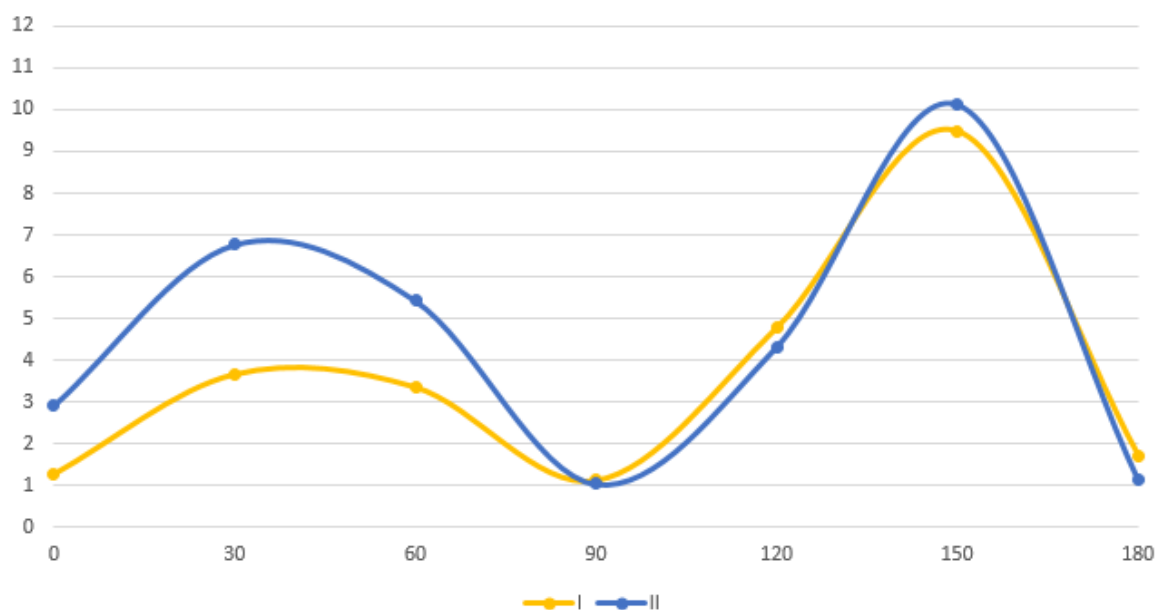


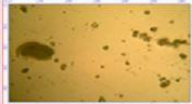
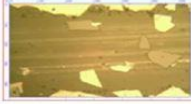






Рис. 6. Зависимость шероховатости образцов от угла наклона относительно мишени магнетронной распылительной системы.

Полученные в процессе нанесения образцы были исследованы при помощи метода сетчатых надрезов. Внешний вид покрытий, полученный с по-мощью микроскопа, показан в Таблице 2.

Таблица 2. Внешний вид адгезионного подслоя после нанесения и после проведения испытаний по методу сетчатых надрезов.









Положение подложки (расстояние до мишени/мм, угол)	Вид покрытия после нанесения	Вид покрытия после испытаний
60/90°		
75/30°		
90/60°		
110/180°		

Покрyтия, полученные в непосредственной близости от мишени, показали низкую стойкость. Повреждения на них видны еще до проведения испытаний. Скорее всего, это связано с температурным воздействием, которому подвергается пленка в процессе роста.

Наилучший результат показали покрyтия, полученные под углами 60° и 180° по отношению к мишени. Измерения шероховатости показало, что наименьшую шероховатость покрyтия имели образцы, полученные под уг-лом 30° и 60°. Однако, с увеличением расстояния от подложки до мишени резко падает скорость роста покрyтия.

После нанесения на адгезионный подслоу основного слоя меди были проведены повторные испытания по методу сетчатых надрезов. Внешний вид образцов приведен в Таблице 3.

Таблица 3. Внешний вид основного слоя после нанесения и после проведения испытаний по методу сетчатых надрезов.

Положение подложки (расстояние до мишени/мм, угол)	Вид покрyтия после нанесения	Вид покрyтия после испытаний
60/90°		
75/30°		
90/60°		
110/180°		

Как и в предыдущем случае покрытия, в которых адгезионный подслоя был получен в непосредственной близости от мишени, показали низкую стойкость. Повреждения на них видны еще до проведения испытаний. Скорее всего, это связано с температурным воздействием, которому подвергается пленка в процессе роста.

Наилучший результат показали покрытия, полученные под углами 60° и 180° по отношению к мишени. Измерения шероховатости показало, что наименьшую шероховатость покрытия имели образцы, полученные под уг-лом 30° и 60°. Однако, с увеличением расстояния от подложки до мишени резко падает скорость роста покрытия.

Выводы и заключения

1. Температурное воздействие от горячей мишени на подложку может приводить к разрушением подложки во время формирования покрытия. Для снижения температурного воздействия можно изменять угол расположения подложки относительно мишени. При подобранных режимах это не приводит снижению скорости роста пленки.

2. Угол расположения подложки относительно магнетронной распылительной системы оказывает существенное влияние на шероховатость получаемого покрытия и его адгезионную прочность.

Литература

1. Колесник Л.Л., Жулева Т.С., Предтеченский П.О., МьoЧжoХлаинг, ЗаoПхоАунг Отработка 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 B.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. Magnetrannyeraspylitel'nyyesistemy; Radioisvyaz'. 1982. 72 p.
7. Marakhtanov M.K. Magnetrannyyesistemyionnogoraspyleniya (Osnovyteoriiirascheta). М. : BMSTU. 1990. 76 p.