

УДК 537.58

СПОСОБ МЕТАЛЛИЗАЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК

Наталия Владимировна Баданова⁽¹⁾

*Студентка 4 курса⁽¹⁾,
кафедра "Электронные технологии в машиностроении"
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: Л.Л. Колесник,
кандидат технических наук, доцент кафедры "Электронные технологии в
машиностроении"*

Введение

Спрос на надёжные силовые полупроводниковые модули высокой мощности и приемлемой стоимости вызван развивающимся рынком силовых преобразовательных устройств: приводов, систем управления энергопотреблением, источников бесперебойного питания, импульсных источников питания, электрических транспортных средств.

Основным элементом силового модуля является металлизированная керамическая подложка, на которой расположены силовые полупроводниковые кристаллы. Подложка выполняет две основные функции:

- 1) Осуществляет электрическую изоляцию токоведущих шин топологического рисунка, расположенных на одной стороне, друг от друга, а также токоведущих шин на другой стороне;
- 2) Отводит тепло, выделяемое активными силовыми полупроводниковыми кристаллами.

Используемая для подложек керамика негигроскопична, термостойка, является изоляционным материалом с высокими механическими и электрическими свойствами. Она отличается сравнительной простотой изготовления и невысокой стоимостью. При изготовлении силовых модулей используются керамические подложки из Al_2O_3 или AlN с медным слоем с обеих сторон керамической пластины.

Основными требованиями к готовому изделию являются минимальные габариты и низкая стоимость материалов и процесса производства в сочетании с высоким коэффициентом выхода годных. Кроме того решающими факторами являются высокие технические характеристики, устойчивость к воздействию окружающей среды и безотказность. Конструкция готового модуля должна обеспечивать минимальные значения переходных тепловых сопротивлений, распределенных индуктивностей силовых шин, высокое напряжение изоляции.

Основные сведения об используемом методе

Одной из ключевых технологических операций в процессе производства силовых модулей является проведение металлизации керамической подложки. Металлизация совместно с последующими операциями формирования топологии токопроводящих дорожек обеспечивает необходимую функциональность подложки в части передачи электрических сигналов между электронными компонентами, которые будут смонтированы на подложке в дальнейшем.

В данной работе в качестве основного метода металлизации будет рассмотрено термическое испарение в вакууме с доставкой молекул металла с помощью струи инертного газа.

Методы вакуумного нанесения тонкоплёночных покрытий основаны на создании направленного потока вещества и последующей конденсации его на поверхностях подложек. Процесс вакуумного нанесения покрытия можно разбить на четыре этапа: образование потока вещества, распространение вещества от источника к подложкам, конденсация вещества на подложках, образование зародышей и рост пленки.

Осаждение тонких пленок в вакууме методом термического испарения осуществляется путем подведения к веществу энергии. При нагревании вещества (до температуры вещества равной, либо превышающей $T_{\text{исп}}$) кинетическая энергия его атомов и молекул возрастает и становится достаточной для того, чтобы они оторвались от поверхности и распространились в окружающем пространстве. С повышением температуры энергия увеличивается и количество молекул, отрывающихся от поверхности, возрастает.

Твердые вещества обычно при нагревании расплавляются, а затем переходят в газообразное состояние. Некоторые вещества переходят в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Такой процесс называется сублимацией.

Температуру, при которой давление паров вещества над его поверхностью составляет 10^{-2} мм рт. ст., называют температурой испарения вещества.

Скорость испарения вещества определяется количеством вещества, испаряемого с единицы площади в 1 сек, и выражается формулой:

$$V_{\text{исп}} = 0,0585 \cdot p_s \cdot \sqrt{\frac{M}{T}} \approx 6 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{M}{T}} \quad (1)$$

где $V_{\text{исп}}$ - скорость испарения, г/ (см²сек); p_s - давление насыщенного пара (10^{-2} мм рт. ст.); M - молекулярный вес испаряемого вещества, г/моль; T - температура испарения вещества, К.

Пленка на подложке образуется при конденсации материала. Конденсацией называется процесс перехода материала из газообразной фазы в твердую фазу.

К достоинствам метода осаждения тонких пленок термическим испарением относятся высокая чистота осаждаемого материала (процесс проводится при высоком и сверхвысоком вакууме), универсальность (наносит пленки металлов, сплавов, полупроводников, диэлектриков) и относительная простота реализации. Ограничениями метода являются нерегулируемая скорость осаждения V_o , низкая, непостоянная и нерегулируемая энергия осаждаемых частиц E .

С целью преодоления ограничений метода предлагается дополнительно использовать струю инертного газа для доставки молекул испаряемого металла к подложке. Этот способ может быть использован в вакуумных установках, оборудованных мощной системой откачки. В англоязычной литературе для похожих способов доставки материалов к подложке используются термины пароструйное или газоструйное осаждение. Метод используется для различных материалов при нанесении тонко и толстоплёночных покрытий. Он показывает хорошие результаты при нанесении покрытий из многокомпонентных материалов, отличается высокой скоростью и экономичностью.

Как правило, при использовании пароструйного осаждения камеру откачивают до давления порядка 1 торр.

Основным технологическим признаком метода пароструйного осаждения является наличие сверхзвуковой струи газа, которая доставляет атомы, молекулы или даже каплю материала к подложке и обеспечивает их эффективное осаждение на небольшой площади подложки. Если требуется получать покрытие на больших площадях, то необходимо организовывать взаимное сканирование подложки и источника, чтобы обеспечить полное покрытие поверхности.

Важным обстоятельством является то, что осаждение происходит в экологически чистой среде, без применения токсичных веществ и катализаторов. Во время осаждения нет необходимости нагревать подложку, ее температура остаётся близкой к комнатной.

Источники материала, применяемые для метода пароструйного осаждения, могут иметь различные варианты конструкций, но все они монтируются на фланцах, присоединенных к камере, откачиваемой до низкого вакуума. Высокоскоростной поток газа, поступающий через источники в вакуумную камеру, откачивается механическими форвакуумными насосами или насосами Рутса, обеспечивающими скорости откачки порядка 5000...10000 литров в минуту.

В том случае, если требуется наносить многослойные покрытия, возможна комплектация установки несколькими источниками, заправленными различными материалами. В этом случае источники работают попеременно, и на подложках формируется многослойное покрытие.

Фактически метод пароструйного осаждения является комбинацией классических методов осаждения покрытий в вакууме с высокоэнергетической струёй ионизированного газа, который является транспортом, целенаправленно доставляющим материал в направлении подложки[3].

Типовой источник пароструйного осаждения предоставляет собой цилиндрическую камеру диаметром 7,62 см (3 дюйма), с выходным соплом диаметром около 1 см. Гелий, аргон или азот подается внутрь источника и поступает в вакуумную камеру через сопло.

Схема устройства источника пароструйного осаждения с термическим испарителем показана на рисунке 1[3].

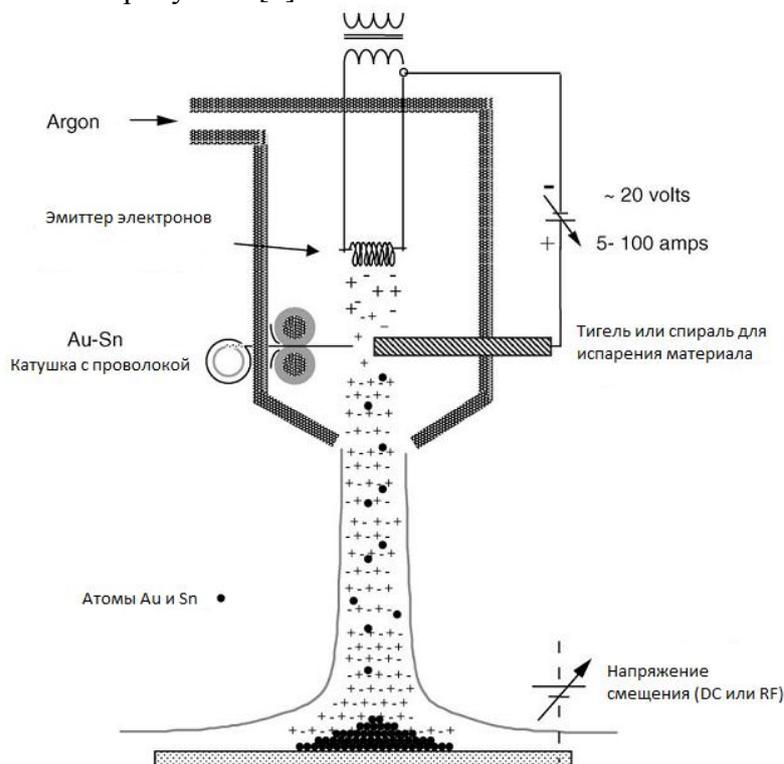


Рисунок 1 – Схема устройства источника пароструйного осаждения

Обычно давление внутри источника равно нескольким торрам, а давление в камере составляет 1 торр или менее. Точное соотношение давлений зависит от наносимого материала и требуемых свойств покрытия.

Когда соотношение давлений превышает значение 2, величина потока газа достигает критического значения и скорость газа, проходящего через сопло, достигает скорости звука. Например, для гелия при температуре 298 К скорость струи составляет около 10^5 см/с [1].

Тонкая проволока материала непрерывно подается в зону, нагреваемую с помощью тигля или спирали, сделанной из вольфрама. При контакте проволоки с нагревателем она расплавляется, смачивает спираль и начинает испаряться. Испаряющиеся атомы материала увлекаются потоком газа в сторону сопла, проходят через него со сверхзвуковой скоростью и осаждаются на подложке в виде окружности диаметром около 1 см. Распределение материала в зоне осаждения подчиняется закону Гаусса.

Одним из важных моментов в работе для реализации данного метода является сверхзвуковая струя газа, которая доставляет атомы, молекулы или даже каплю материала к подложке и обеспечивает их эффективное осаждение на небольшой площади подложки. Получение интенсивных молекулярных пучков путем использования в качестве источника аэродинамического сопла впервые было предложено Кантровицем и Грэм [2]. Их идея состояла в том, чтобы отбирать свободномолекулярный поток не из покоящегося газа, а из газа, разогнанного в сопле конической формы.

Таким образом, сопло является одним из важнейших компонентов у источников струи газа, и его геометрия будет определять основные параметры, связанные с размером струи и его интенсивности.

Сопло – это специально спроектированный канал, который служит для разгона жидкости или газа до заданной скорости и придания потоку определенного направления. Используя самую простую модель, для анализа течения газа в сопле принимается ряд допущений, в которых газ считается идеальным, а поток одномерным, стационарным и адиабатическим. Чтобы описать поведение газового потока в проводящем канале необходимо получить уравнение, которое связало бы скорость потока газа с площадью поперечного сечения канала. Поскольку в данной системе массовый расход газа постоянен из закона сохранения массы (уравнения неразрывности) следует:

$$\dot{m} = \rho \cdot \bar{v} \cdot S = \text{const} \quad (2)$$

где ρ - плотность газа, v - его скорость, а S - площадь поперечного сечения сопла.

Продифференцировав обе части этого уравнения по пространственной координате x , которая является осью симметрии сопла, получим:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} + \frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dx} + \frac{1}{S} \cdot \frac{dS}{dx} = 0 \quad (3)$$

С другой стороны, с учетом введенных выше допущений, уравнение Эйлера запишется следующим образом:

$$v \frac{dv}{dx} = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} \quad (4)$$

Определим скорость звука по адиабатической сжимаемости вещества, как $c^2 = \frac{dp}{d\rho}$, где p - локальное давление. Тогда уравнение (4) примет вид:

$$v \frac{dv}{dx} = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} \cdot \frac{dp}{d\rho} = - \frac{c^2}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} \quad (5)$$

Обозначив отношение локальной скорости v к скорости звука c , как число Маха $M = \frac{v}{c}$, можно переписать (5) следующим образом:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dx} = -M^2 \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{dv}{dx} \quad (6)$$

Исключая $d\rho$ из формул (3) и (6) можно получить окончательное соотношение:

$$\frac{dS}{S} = \frac{dv}{v} (M^2 - 1) \quad (7)$$

Это уравнение называют уравнением обращения воздействия[2]. Оно описывает закономерность изменения скорости потока от площади поперечного сечения.

Из уравнения (7) видно, что для увеличения скорости потока v ($dv > 0$) при дозвуковой скорости, когда $v < c$ ($M < 1$) поперечное сечение S должно уменьшаться ($dS < 0$), а при сверхзвуковой скорости при $v > c$ ($M > 1$) поперечное сечение S должно увеличиваться ($dS > 0$) (см.рис.2). Движение газа со скоростью звука ($M = 1$) соответствует самому узкому месту, когда площадь поперечного сечения достигает экстремума ($dS = 0$) и называется критическим сечением. Таким образом, из вышесказанного можно сделать вывод, что при совмещении сходящегося и расходящегося конусов можно получить устройство, при движении по которому, газовый поток будет ускоряться до сверхзвуковых скоростей[2].

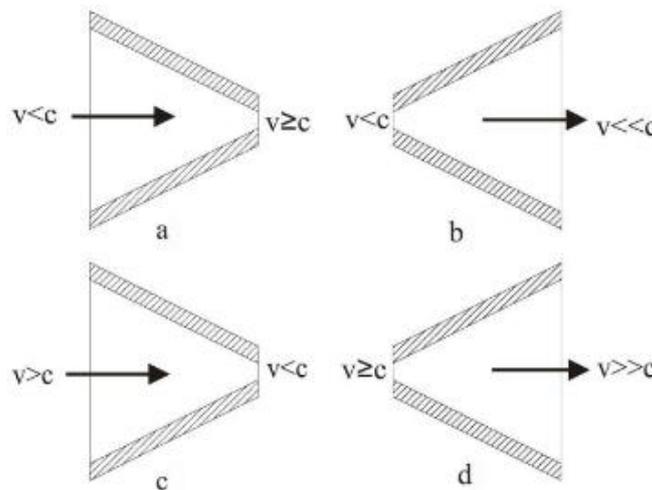


Рисунок 2 – Особенности прохождения газового потока по каналу с изменяющимся поперечным сечением

Технология нанесения покрытий методом пароструйного осаждения

Технология нанесения покрытий методом пароструйного осаждения, реализованная на стенде для проведения испытаний (см. рис.3) и заключается в следующем:

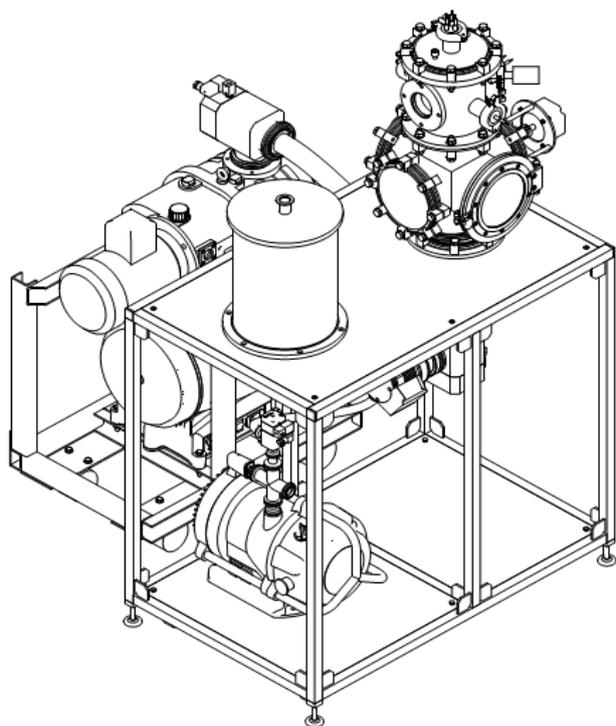


Рисунок 3 - Внешний вид стенда для проведения испытаний опытного образца источника пароструйного осаждения

1) Подготовка подложки к нанесению покрытия

Подготовка подложки к нанесению покрытия заключается в ее промывке в изопропиловом спирте. Промывка осуществляется при помощи ультразвуковой ванны «Водолей-1».

Подложка размещается в ультразвуковой ванне таким образом, чтобы обеспечить полное ее покрытие изопропиловым спиртом в процессе обработки.

Время обработки – 10 минут. После завершения обработки подложка высушивается при комнатной температуре.

Не допускается прикасаться к поверхностям подложки, на которые будет проводиться нанесение покрытия после операции подготовки подложки к нанесению покрытия.

2) Загрузка подложки в вакуумную камеру

Подложка устанавливается в вакуумную камеру на подложкодержатель при помощи специального зажима. Расстояние от сопла источника до подложкодержателя должно быть равно 51 мм.

После загрузки подложки в вакуумную камеру закрыть дверь вакуумной камеры.

3) Загрузка испаряемого материала

Катушка с испаряемым материалом устанавливается в камеру подачи материала. После загрузки проволоки закрыть дверь камеры подачи материала.

4) *Откачка вакуумной камеры, источника и системы подачи материала*

До начала процесса нанесения покрытия необходимо откачать вакуумную камеру, источник и камеру подачи материала до давления не выше 10^{-3} мбар.

5) *Включение газовой системы и установка режима подачи газа*

Включить систему подачи газа. Расход газа должен быть таким, чтобы обеспечить давление в источнике не ниже 20 мбар, давление к камере не выше 2 мбар. Чем больше перепад давлений между камерой и источником, тем больше будет плотность получаемого покрытия и его адгезия к подложке.

В ходе проведения экспериментов использовалась подача газа с расходом в 300 сссм. Давление в источнике при этом составило 27 мбар.

6) *Включение испарителя и установка режимов испарения*

Так как при термическом испарении основным параметром является мощность, подводимая к испарителю, то необходимо использовать режим постоянной мощности.

Нанесение покрытий меди проводилось при мощности 750 Вт, титана – 1250 Вт.

7) *Включение системы подачи испаряемого материала*

Включение системы подачи испаряемого материала заключается в установке скорости подачи и подаче питания на двигатель.

При нанесении покрытий использовалась подача материала со скоростью 0,3 оборота в минуту.

8) *Нанесение покрытия*

В случае относительного взаимного сканирования источника и подложки время нанесения покрытия на всей поверхности подложки слоем материала толщиной h мкм будет определяться как

$$t_o = h \cdot t_o \cdot S_{подл} / S_{пятна} \quad (8)$$

где h – требуемая толщина покрытия в мкм; t_o – время осаждения покрытия толщиной 1 мкм на запыляемом пятне без сканирования источника относительно подложки, $S_{подл}$ – площадь подложки, $S_{пятна}$ – площадь запыляемого пятна при неподвижном источнике.

9) *Выключение испарителя и системы подачи испаряемого материала*

10) *Выключение газовой системы*

11) *Отключение системы откачки*

Отключение системы откачки необходимо производить не ранее, чем через 5 минут после отключения испарителя, чтобы избежать его окисления, охрупчивания и разрушения.

12) *Напуск атмосферы и выгрузка подложки из вакуумной камеры*

В таблице 2 приведен список режимов, при которых производились эксперименты.

Таблица 2.

Подложка	AlN	AlN	AlN	AlN
Ток испарителя, А	14	14	10	28
Время нанесения, сек	1157	659	1020	215
Расстояние сопло-подложка, мм	51	51	51	51
Мощность для подачи материала, кВт	0,15	0,15	0,12	0,3
Наносимый материал	Cu	Cu	Cu	Cu
Подача газа Ar, сссм	300	300	150	0

Исследование образцов покрытий, полученных методом пароструйного осаждения

В ходе выполнения работы исследованию были подвергнуты контрольные образцы керамики с металлизацией медью, выполненной методом пароструйного осаждения.

Образцы были просканированы на атомно-силовом микроскопе с целью определения структуры пленки. Кроме того, были проведены измерения адгезии методом отрыва.

Внешний вид пленки, полученной на атомно-силовом микроскопе, представлен на рисунке 4.

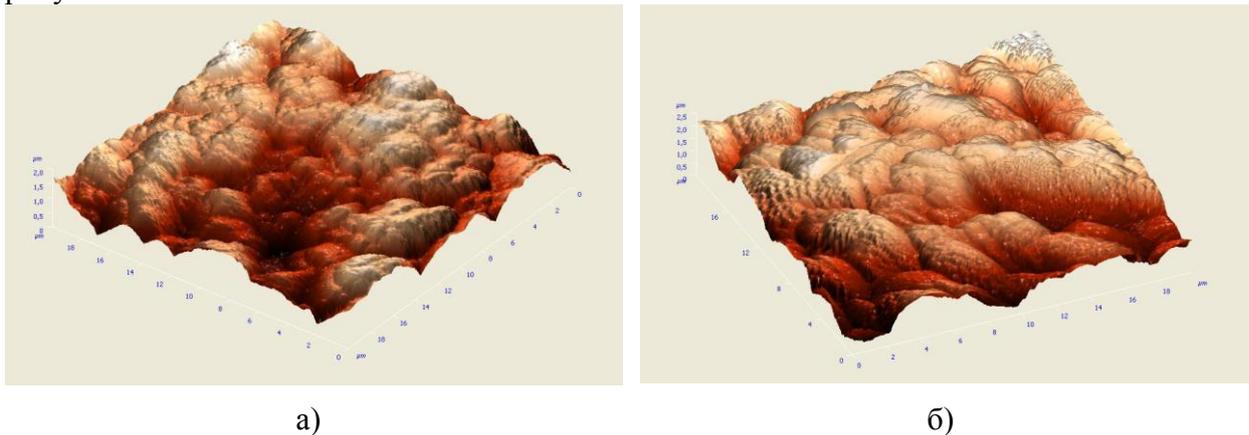


Рисунок 4 – Внешний вид пленки, полученный сканированием образца на атомно-силовом микроскопе; размер скана 20x20 мкм. а – край подложки, б – центр подложки

Анализ изображения показал, что пленка обеспечивает полное покрытие поверхности подложки. Обладает равномерной плотной структурой. Не имеет явно выраженных посторонних дефектов и включений.

Измерения адгезии проводились с использованием адгезиметра Elcometr 106. Адгезиметр Elcometer 106 представляет собой удобный в использовании и портативный прибор, дающий числовые значения величины адгезии. Внешний вид прибора представлен на рисунке 5.

Методика определения адгезии заключается в следующем. Грибок наклеивается на покрытие с использованием клея. Адгезиметр оснащен пружинным устройством, прилагающим отрывное усилие к грибку. При отрыве грибка от поверхности, индикатор на шкале показывает численную величину адгезии, выраженной в силе, требуемой для отрыва грибка. Испытание проводится, начиная с усилия $0,05 \dots 0,2 \text{ Н/мм}^2$ до $5 \dots 22 \text{ Н/мм}^2$. Для получения приблизительной величины в кг/см^2 необходимо увеличить величину в Н/мм^2 в 10 раз.



Рисунок 5 – Внешний вид прибора, использовавшегося для измерения адгезии



Рисунок 6 – Образцы металлизированных подложек перед проведением измерения величины адгезии

В таблице 3 представлены результаты опыта.

Таблица 3- Сила отрыва (разрушения) в пересчете на 1 кв.мм, кгс.

№ платины				Характер разрушения
1	2	3	4	
	6,5	5,5	7,5	По покрытию
	6,5	4,0	4,0	
	4,5	7,0	7,5	
	6,0			
	6,0			
6,0		6,1	3,0	
6,0		8,0	3,5	

По результатам измерения адгезия пленок к подложке для всех представленных образцов составила более 7 МПа. При максимально возможной нагрузке, реализуемой прибором, разрушения пленки не произошло. При измерениях разрушился клеевой слой, которым грибок был приклеен в пленке.

Проведенные измерения позволяют говорить о высоких значениях адгезии и полном покрытии пленкой подложки при использовании для нанесения метода пароструйного осаждения.

Литература

- 1) Демихов К.Е., Панфилов Ю.В. Вакуумная техника: справочник.-М.: Машиностроение, 2009. 590 с.
- 2) Карпенко А.Ю., Батурин В.А. Источники кластерного пучка. Часть 2. Формирование кластерных пучков в сопловых источниках.// JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS.-2012,Т.4.- №4.
- 3) US. Patent 5571332 – Electron Jet Vapor Deposition System, 1996