

11. Stratton, Julius Adams Electromagnetic Theory. New York and London: McGRAW-HILL Book Company, Inc. 1941. 615с.
12. Захарченко В. В. Электризация жидкостей в аппаратах и резервуарах и методы ее снижения / Под ред. В. А. Линецкого. М.: 1974. 40 с.
13. Сканави Г. И. Физика диэлектриков. М.: Изд-во «Технико-теоретической литературы», 1949. 253 с.



УДК 536.126

Канд. техн. наук, доц. *Саханский Ю. В.*,  
асп. *Макаров Н. Г.*

Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет)  
г. Владикавказ, РСО-Алания, Россия

## **ПРОБЛЕМА НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК В ИЗДЕЛИЯХ ЭЛЕКТРОНИКИ И СЛОИСТЫХ УСТРОЙСТВАХ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

*Рассмотрены методы нанесения тонких плёнок. Дана их классификация и выделены основные характеристики при использовании в изделиях электроники и электровзрывании.*

Технология нанесения покрытий на различные изделия и материалы является одной из новых и прогрессивных в процессах, которые широко используются в разных отраслях промышленности.

Наиболее перспективными и интересными процессами можно без преувеличения считать нанесение тонкопленочных покрытий в вакууме.

Разнообразие вариаций реализации данных процессов сводится к тому, что материал покрытия в условиях достаточно высокого вакуума переводится в газовую фазу и в виде направленного потока атомов или молекул поступает к подложке, где и конденсируется, образуя покрытие.

В то же время методы, используемые для получения газовой фазы покрывающего материала, и конструкции устройств, которые реализуют эти способы, достаточно сильно отличаются друг от друга.

Имеется несколько классификаций средств и методов напыления тонких пленок (покрытий) в вакууме. По способу генерации частиц напыление можно классифицировать на газовую, жидкую и твердую фазы.

Плазменные, атомарные и ионные потоки относятся к типу осаждаемых частиц. Также имеются классификации по массе и энергии потоков, которые переносятся к подложке от источника, областям применения используемых источников, особенностям конструктивного исполнения и т. д.

Метод термического испарения при напылении тонких пленок реализуется путем подведения энергии к веществу несколькими способами: нагревом при помощи лазерного излучения, электронно-лучевым нагревом, электронной бомбардировкой, высокочастотным и резистивным нагревом.

Частицы нагреваемого вещества, подвергшись термическому воздействию, начинают покидать испаритель и переноситься по вакууму на подготовленную подложку. По достижению частицами подложки они конденсируются на ее поверхности в качестве тонкой пленки.

Данный метод имеет свои достоинства, к которым относятся относительная простота реализации, универсальность, проявляемая в разнообразии материалов, из которых можно получать пленки. Ограничениями для применения данного метода являются сложнорегулируемая скорость осаждения, а также нерегулируемая и непостоянная энергия частиц, осаждаемых на подложку.

Напыление тонких пленок методом ионного распыления состоит в выбивании атомов вещества с поверхности мишени ионами газа, обладающими высокой энергией. Образование ионов происходит в газовом разряде при определенном давлении, которое обычно составляет порядка 1 Па.

Следствием приложения к мишени высокочастотного или отрицательного постоянного потенциала является ускорение ионов до энергии порядка 0,7 кэВ. Выбитые из мишени атомы попадают (осаждаются) на поверхность подложки в виде тонкой пленки.

Классифицируют ионно-лучевой и ионно-плазменный методы, в которых применяются несамостоятельный и тлеющий газовый разряды.

К достоинствам указанного метода напыления тонких пленок можно отнести регулируемую скорость осаждения, относительную конструктивную простоту установок, безынерционность и универсальность. Недостатками данного метода являются невозможность практического получения высоких скоростей напыления однородных по толщине тонких пленок на подложках значительной площади, а также низкая чистота осаждаемой пленки (за счет присутствия рабочего газа).

Получить тонкопленочные покрытия также можно при помощи испарения вещества взрывом при импульсном воздействии электронного пучка или лазерного излучения, а также при пропускании импульса тока большой мощности через образец материала, который подлeжит осаждению.

Образец материала при этом имеет форму фольги, либо тонкой проволоки. Продукты взрыва переносятся к подложке и на ее поверхности конденсируются.

Достоинство данного метода состоит в хорошей адгезии покрытия с подложкой и высокая скорость напыления. С другой стороны, применение данного метода ограничено из-за наличия капельной фазы в паровом потоке, а также неуправляемостью процесса (так как процесс кратковременный).

Осаждение тонкопленочных покрытий дуговым разрядом осуществляется из-за эрозии вещества в сильноточных дуговых разрядах (с горячим и холодным катодом), формирования ионизированной паровой фазы, переносе ее с большой скоростью и последующей конденсации на поверхности подложки.

К достоинствам указанного метода осаждения относятся:

- большой коэффициент ионизации;
- максимально возможная скорость нанесения;
- нет необходимости в использовании дополнительного газа для ионизации;
- почти неограниченная электрическая мощность.

Недостатками метода являются:

- нерегулируемость энергии частиц;
- наличие в потоке напыляемого вещества (как и в методе испарения вещества взрывом) капельной фазы;
- конструктивная сложность дуговых источников.

Метод ионного осаждения тонких пленок [1] основан на сочетании двух процессов:

- генерации плазмы исходного вещества при помощи одного из типов ВЧ-индуктора или электрического разряда;
- ускорения всей квазинейтральной плазмы или ионов с последующей конденсацией ее на поверхности подложки.

Основным достоинством метода ионного осаждения тонкопленочных покрытий является возможность управления в широких пределах уровнем энергии напыляемых частиц и высокая чистота подложки. Основные недостатки – относительная сложность реализации конструкции и загрязнение как плазмы, так и получаемой пленки.

Широко применяются для напыления относительно тонких покрытий технологии магнетронного нанесения. Суть процесса магнетронного напыления покрытий сводится к тому, что при помощи дугового разряда происходит распыление материала, который входит в состав испарительного устройства – магнетрона.

Магнетронное распыление и электронно-лучевое испарение являются на данном этапе развития ключевыми видами технологических процессов, которые позволяют наиболее эффективно решать почти все задачи, которые связаны с формированием покрытия в вакууме. Выбор того или иного метода формирования потока пара выбирается, исходя из соображений получения требуемой толщины, производительности и качества наносимых покрытий, а также энергоемкостью. В некоторых случаях необходимо учитывать побочные явления, которые свойственны любому методу образования потока пара.

Магнетронные распылительные устройства характеризуются возможностью получения пленок многокомпонентного состава, обеспечивают высокую адгезию покрытия, отличаются значительной простотой конструкции.

При их использовании появляются дополнительные возможности по взаимной компоновке источника парового потока и подложки. Однако магнетронные распылительные устройства характеризуются относительно низкими скоростями формирования покрытий. Типичные скорости конденсации материала на подложке для этого вида процессов составляют 1 мкм/мин для алюминия, 2,5 мкм /мин для меди, что недостаточно для нанесения покрытий из тугоплавких материалов на движущуюся полимерную пленку.

Хотя распыление магнетронным методом и получило развитие в то время, когда процессы вакуумной металлизации применялись уже широко в промышленности, их появление, благодаря представленным преимуществам, подтолкнуло к переоценке традиционных соображений о сферах применения существующих методов нанесения тонкопленочных покрытий в вакууме.

Так, магнетронные распылительные устройства заменили с успехом электронно-лучевые испарители в процессах, которые связаны с напылением тонких пленок при производстве микроэлектронных компонентов и в оптической промышленности, отодвинув нижнюю границу целесообразного применения электронно-лучевых испарительных систем в область более толстых покрытий (свыше 1–2 мкм). Магнетронные распылительные устройства вытесняют в данное время резистивные испарительные устройства и достаточно успешно конкурируют с ними даже в такой традиционной сфере их применения как нанесение декоративных покрытий.

Электронно-лучевые испарительные системы характеризуются возможностью создания на испаряемых поверхностях достаточно высоких концентраций энергии, что способствует увеличению скорости конденсации и высокой производительности процесса создания покрытия, которое иными способами получить невозможно. Так, при электронно-лучевом осаждении достигается скорость конденсации алюминия 1200 мкм/мин [2].

Большие скорости обеспечивают в сочетании с ведением процесса в высоком вакууме наивысшую степень чистоты получаемых покрытий.

Факторами, ограничивающими применение электронно-лучевых испарительных устройств, являются невысокий коэффициент использования испаряемого материала (обычно не превышает 20 %) и определенные трудности получения покрытий из сплавов.

Электронно-лучевые установки получили достаточно широкое промышленное применение для нанесения различного покрытий в вакууме методом испарения. Данный метод получения тонких пленок характеризуется следующими ключевыми преимуществами:

- энергия подводится непосредственно к поверхности, на которой формируется поток пара;
- большая плотность энергии ( $10^4 - 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>) обеспечивает высокие температуры, достаточные для эффективного испарения даже самых тугоплавких материалов;
- благодаря простоте регулирования мощности и распределения энергии по нагреваемой поверхности возможно управлять толщиной и равномерностью покрытия;
- испарение материала из водоохлаждаемого тигля обеспечивает высокую чистоту наносимого слоя.

По характеру получаемых покрытий и технологическому назначению различают электронно-лучевые установки для получения толстых вакуумных конденсатов и тонкопленочных покрытий. Установки первой группы применяются для нанесения защитных износостойких и жаропрочных покрытий на детали машин и аппаратов, режущий инструмент. Установки второй группы предназначены в основном для производства тонкопленочных структур ИС в электронике.

Электронно-лучевые испарительные системы используются также для фотопреобразователей солнечных батарей и при нанесении контактных площадок (контактов) в процессе производства силовых полупроводниковых приборов.

Довольно эффективно электронно-лучевое испарение применяется для нанесения защитных антикоррозионных покрытий на стальную ленту для получения ленточных композиционных материалов и при производстве фольги.

В простых системах электронно-лучевых испарителей с нагревом методом электронной бомбардировки катод располагают поблизости от тигля или испаряемого материала. Действие ускоряющего напряжения между тиглем и катодом устремляет поток электронов на испаряемый материал.

Поскольку в этих испарителях катод расположен поблизости от испаряемого материала, при его испарении имеется вероятность загрязнения получаемого слоя материалом, из которого состоит катод. Подбор формы управляющего электрода позволяет избежать прямого попадания на изделие испаряющегося материала катода. Для того, чтобы сечение потока электронов, который попадает на испаряемый материал, соответствовало

поперечному сечению тигля, обычно применяют управляющий электрод, находящийся под потенциалом катода. Если катод выполнен в форме кольца, то и управляющему электроду придают кольцевую форму и располагают concentрично тиглю.

Вакуумные ионно-плазменные методы нанесения пленок основаны на явлении катодного (ионного) распыления материала мишени. Покрытие образуется в результате осаждения на подложку атомов или молекул, выбиваемых из мишени ионами инертного газа (обычно аргона). Энергия частиц наносимого при ионно-плазменном осаждении материала на порядок выше, чем энергия частиц при использовании термических методов. Системы распыления классифицируют по количеству электродов (диодные, триодные, тетродные и т. д.), по виду используемого напряжения (на постоянном токе, ВЧ-системы, СВЧ-системы), по наличию или отсутствию потенциала на подложке и др.

Распылением с помощью автономного источника ионов достигается получение наиболее качественных пленок (с низким коэффициентом загрязнения) за счет более низкого рабочего давления. Однако недостатком метода является низкая скорость распыления мишени при малой плотности ионного тока.

Основными требованиями, предъявляемыми к системам ионного распыления, является обеспечение минимального рабочего давления, максимальных значений коэффициента распыления и коэффициента использования материала мишени, высоких скоростей распыления при минимальных затратах энергии. Магнетронные распылительные системы обладают следующими основными рабочими характеристиками:

1. Напряжение на электродах. Магнетронные системы являются низковольтными, рабочее напряжение составляет обычно 300–700 В.

2. Ток разряда и плотность ионного тока на мишени зависят от рабочего напряжения, давления и состава рабочего газа, индукции магнитного поля, конфигурации магнитов и вида распыляемого материала. Плотность тока влияет на скорость распыления материала мишени и может достигать 2000 А/м. Количество распыленного с мишени материала пропорционально току разряда, коэффициенту распыления материала и его атомной массе.

3. Рабочее давление влияет на чистоту наносимых пленок. Коэффициент осаждения распыляемого материала также в значительной мере зависит от давления в вакуумной системе, так как распыленные молекулы и атомы сталкиваются с молекулами рабочего газа и изменяют свою траекторию.

4. Геометрическая форма мишени и конфигурация магнитных полей оказывают влияние на равномерность и скорость нанесения пленки, а также на коэффициент использования материала мишени. Разнообразие форм и размеров обрабатываемых объектов требует создания магнетронов с различной геометрией мишени для получения равномерных покрытий.

Используемые для распыления материалы мишеней в основном зависят от типа используемого напряжения (постоянное или высокочастотное). ВЧ-магнетронные системы позволяют распылять практически любые материалы (и проводники, и диэлектрики). Пленки магнитных материалов наносят с помощью магнетронов специальной конструкции.

5. Развитие магнетронных систем позволило наносить магнитные пленки для создания элементов памяти, получать бездефектные диэлектрические пленки, сделало возможным создание высококачественных сверхпроводящих пленок.

Выбор способа распыления зависит от требований по качеству и быстрдействию процесса нанесения, а также от заданных свойств тонкопленочных покрытий. Эти свойства формируются в процессе роста тонкой пленки и определяются параметрами технологического процесса и оборудования. Материал пленки, скорость испарения или распыления, давление остаточных и реактивных газов и другие параметры технологического процесса позволяют получать резистивные, диэлектрические, полупроводниковые и токопроводящие элементы интегральных микросхем; отражающие, просветляющие, поглощающие и другие оптические покрытия; защитные, упрочняющие, коррозионно-стойкие, износостойкие и твердосмазочные тонкопленочные покрытия для изделий машиностроения, приборостроения и других отраслей промышленности.

Свойства пленок зависят от большого количества факторов и математическое описание этих зависимостей возможно получить лишь экспериментальным путем и только для конкретных типов установок.



При подборе технологических параметров необходимо учитывать распылительную систему. Протекающие при распылении процессы не должны приводить к перегреву мишени, поэтому необходимо обеспечивать хороший тепловой контакт мишени с изложницей, в которую она устанавливается.

По существу, все методы нанесения тонких плёнок можно представить в виде схемы (рисунок).



Классификация методов нанесения тонких пленок.

Разработка технологических процессов напыления покрытий и создания специального оборудования для их реализации за последние полвека интенсивно проводилась целым рядом отечественных предприятий и институтов, а также зарубежных фирм. К числу зарубежных фирм и исследователей, которые в последние два десятилетия активно предлагают на рынке системы для самых различных процессов напыления покрытий можно отнести: «Форд Мотор Корп.» USA, «Varnan Associates», Ohio, IBM Ватсоновский

исследовательский центр, USA, GTE Prod. Corp., USA, «Лейбон-нов», Германия, «Hewlett Packard», Сан-Хосе, USA, «Thin film systems», Alcatel Cit, Институт М. Фон Арденна, Германия.

Среди отечественных организаций и научно-исследовательских институтов, ведущих работу в этом направлении, можно отметить: ВНИИЭТО, СКБ вакуумных покрытий (г. Рига), НИИТМ (г. Зеленоград).

Благодаря усилиям ученых этих организаций достигнут нынешний уровень развития теории и практики напыления покрытий.

Отмеченные выше технологические процессы используются в различных отраслях промышленности. Однако развитие техники вакуумного нанесения покрытий происходит в настоящее время в направлении создания мощных магнетронных распылительных систем, совершенствования конструкции высокопроизводительных электронно-лучевых испарительных устройств, плёночных устройств инициирования взрывчатых веществ и более высокой автоматизации всех стадий технологического процесса.

Проведенный анализ дает понять, что вопросы конструкций установок и технологии нанесения покрытий в большей степени уже решены. Поэтому в данной работе вопросам технологии тонкопленочных покрытий и конструированию установок для нанесения покрытий уделено меньше внимания. В гораздо меньшей степени решены вопросы автоматизации управления процессом напыления покрытий, что и обусловило проведение исследований в этом направлении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Панфилов Ю. А.* Нанесение тонких пленок в вакууме // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 3. С. 76–80.
2. *Сущенко Н. И.* Основы технологии микроэлектроники: Учебник для ВУЗов. Йошкар-Ола. 2005.

