

# Особенности процесса жидкофазного магнетронного распыления для различных материалов

М. Назаренко<sup>1</sup>, К. Моисеев, к. т. н.<sup>2</sup>, А. Сигов, д. ф.-м. н.<sup>3</sup>

УДК 621.793.182 | ВАК 05.27.06

Формирование слоев металлизации является одной из наиболее распространенных и трудоемких операций при производстве изделий микроэлектроники. При этом толщины таких слоев составляют от нескольких десятых до десятков, а то и сотен микрон. Например, для производства плат для силовых интегральных схем требуются толщины меди от 100 мкм, а для производства элементов Пельтье – не менее 20 мкм [1, 2]. В данной статье рассматривается перспективный метод формирования слоев металлизации различной толщины – жидкофазное магнетронное распыление.

С каждым годом повышаются требования к изделиям и устройствам микроэлектроники, что приводит к ужесточению требований, предъявляемых в том числе к процессам металлизации. Сокращение времени формирования толстых слоев для снижения себестоимости изделия приводит к необходимости повышения производительности, то есть к увеличению скоростей осаждения. Повышение степени миниатюризации изделий требует повышения точности создаваемых микроструктур, например, при создании микросборок, монтаже чипов, элементов оптических схем [3]. Требования к качеству внешнего вида конечного изделия, например, печатных плат на керамическом основании [4], приводят к ужесточению требований к качеству внешнего вида металлизации.

Для ряда современных изделий микро- и наноэлектроники использование гальванических методов получения слоев металлизации недопустимо. Например, при формировании покрытий для миниатюрных термоэлектрических модулей или покрытий на чувствительных к среде элементах, таких как кремниевые детекторы. Это обусловлено агрессивностью среды раствора по отношению к изделиям, а также неравномерностью осаждаемых слоев, которая составляет не менее  $\pm 15\%$  [5]. В качестве альтернативы в первую очередь рассматриваются методы физического осаждения из газовой фазы (PVD-методы). Для большинства методов PVD характерны невысокие скорости осаждения покрытий по сравнению с гальваническими. Наиболее производительными среди PVD-методов являются дуговое испарение (ИД) и ионное распыление

в магнетронных системах в парах мишени, или иначе – жидкофазное магнетронное распыление (ЖФМР).

Метод ЖФМР заслуживает наибольшего внимания, поскольку объединяет в себе высокие скорости осаждения (до 40 мкм / мин на неподвижную подложку) и равномерность покрытия (не более 5%), соизмеримую с классическим магнетронным распылением (МР) [6, 7]. За счет ионизированной фазы, в отличие от термических методов, пленки обладают высокими показателями адгезии, сравнимыми с результатами классического МР. В методе отсутствует капельная фаза, которая является проблемой дугового осаждения. А структура поверхности обеспечивает хороший внешний вид покрытий.

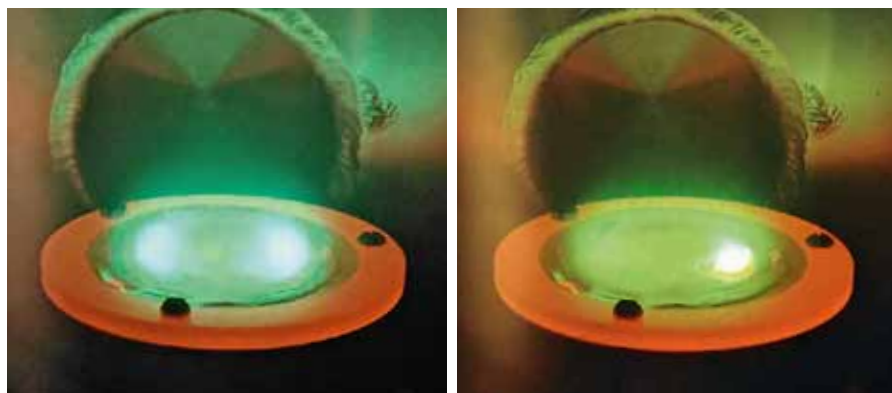
Однако реализация ЖФМР пока не получила широкого распространения в силу относительной сложности процесса и неполноты необходимых результатов исследований в данном направлении. Следствием этого является отсутствие наработанной базы материалов, режимов их осаждения и свойств полученных покрытий. Так, в литературе, в основном, описано осаждение медных пленок [8, 9], при этом практически не приводятся данные по технологическим режимам и их влиянию на свойства получаемых покрытий. Все это не позволяет технологам делать обоснованный выбор в пользу ЖФМР.

Из немногочисленных работ [10–13] известно, что параметры процесса ЖФМР, а также сам характер его протекания очень сильно зависят от материала мишени. В данной работе предпринята попытка разработки универсальной классификации характера протекания процесса ЖФМР в зависимости от материала мишени. Такая классификация позволит на начальном этапе определять характер протекания процесса и обоснованно назначать диапазоны режимов осаждения при формировании покрытий этим методом.

<sup>1</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, аспирант, m.v.makarova@list.ru.

<sup>2</sup> МГТУ им. Н. Э. Баумана, доцент.

<sup>3</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, профессор.



**Рис. 1.** Работа магнетрона: а – в классическом режиме в среде аргона; б – в режиме самораспыления

### ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКИ ПРОЦЕССА ЖФМР

Процесс ионного распыления в магнетронных системах в парах мишени является разновидностью классического магнетронного распыления [7], но имеет свои особенности. В классическом МР нагрев мишени под воздействием ионной бомбардировки является негативным явлением и устраняется системой охлаждения магнетронного источника, что в целом делает процесс неэффективным с точки зрения КПД. В методе ЖФМР мишень (материал) помещают в тигель и специально изолируют от катода магнетрона для дополнительного разогрева и перевода в жидкое состояние. После полного расплавления мишени в дополнение к физическому распылению начинается более интенсивный процесс испарения, благодаря чему суммарная скорость образования паровой фазы увеличивается на порядок.

Концентрация частиц мишени над ней становится сопоставимой с концентрацией рабочего газа (аргона) и позволяет обеспечить в области горения разряда необходимое давление для его поддержания, в диапазоне от  $10^{-2}$  до  $10^{-1}$  Па. Это дает возможность убрать подачу аргона и продолжать стабильный процесс в собственных парах материала мишени в так называемом режиме самораспыления (рис. 1).

Исходя из описанных выше особенностей процесса можно заключить, что одним из основных факторов, определяющих переход в режим самораспыления, является достижение давления паров мишени в области над магнетроном, достаточного для горения разряда в собственных парах мишени.

### КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОЦЕССА ЖФМР

Анализируя физические свойства твердых материалов [14], используемых для получения функциональных слоев, а именно значения температуры плавления, давления насыщенных паров в вакууме при давлении  $10^{-2}$  Па и температуры его достижения, возможно классифицировать материалы по трем группам.

I группа – материалы, температура плавления которых ниже температуры, при которой достигается давление насыщенных паров при давлении  $10^{-2}$  Па. Примерами таких материалов являются Sn, Pb, Sb, Bi.

**Таблица 1.** Особенности технологического процесса для материалов I группы

Критерий ТП	Описание ТП	Характеристики ТП
Температура мишени ниже температуры ее плавления. Давление насыщенных паров мишени $<10^{-2}$ Па	Классическое магнетронное распыление. Фаза мишени – твердая	Невысокие скорости осаждения. Низкое тепловое воздействие на подложки.
Температура мишени совпадает с температурой плавления мишени или немного превышает ее. Давление насыщенных паров мишени $<10^{-2}$ Па	ЖФМР с частичным добавлением рабочего газа для поддержания горения разряда. Фаза мишени – жидкая	Скорости осаждения выше, чем при классическом МР, но ниже, чем при ЖФМР в режиме самораспыления (без рабочего газа). Тепловая нагрузка на подложки значительно ниже, чем при полноценном ЖФМР
Температура мишени превышает температуру плавления мишени. Давление насыщенных паров $\geq 10^{-2}$ Па	ЖФМР в режиме самораспыления (без рабочего газа). Фаза мишени – жидкая	Высокие скорости осаждения. Значительное тепловое воздействие на подложки

**Таблица 2.** Особенности технологического процесса для материалов II группы

Критерий ТП	Описание ТП	Характеристики ТП
Температура мишени ниже температуры ее плавления. Давление насыщенных паров мишени $<10^{-2}$ Па	Классическое магнетронное распыление. Фаза мишени – твердая	Невысокие скорости осаждения. Низкое тепловое воздействие на подложки
Температура мишени совпадает с температурой плавления мишени или немного превышает ее. Давление насыщенных паров $\geq 10^{-2}$ Па	ЖФМР в режиме самораспыления (без рабочего газа). Фаза мишени – жидкая	Высокие скорости осаждения. Значительное тепловое воздействие на подложки

**Таблица 3.** Особенности технологического процесса для материалов III группы

Критерий ТП	Описание ТП	Характеристики ТП
Температура мишени ниже температуры ее плавления. Давление насыщенных паров мишени $<10^{-2}$ Па	Классическое магнетронное распыление. Фаза мишени – твердая	Невысокие скорости осаждения. Низкое тепловое воздействие на подложки
Температура мишени ниже температуры ее плавления. Давление насыщенных паров $\geq 10^{-2}$ Па	ЖФМР в режиме самораспыления (без рабочего газа). Фаза мишени – твердая	Высокие скорости осаждения. Повышенное тепловое воздействие на подложки
Температура мишени совпадает с температурой плавления мишени или превышает ее. Давление насыщенных паров $\geq 10^{-2}$ Па	ЖФМР в режиме самораспыления (без рабочего газа). Фаза мишени – жидкая	Сверхвысокие скорости осаждения. Крайне высокое тепловое воздействие на подложки

**Таблица 4.** Особенности процесса осаждения материалов различных групп

Этап	Материалы I группы	Материалы II группы	Материалы III группы
Разогрев мишени до достижения необходимого давления насыщенных паров (зоны 1–3 на рис. 2)	Быстрый переход из твердой фазы в жидкую, при этом давление насыщенных паров еще недостаточно для горения разряда в собственных парах мишени	Происходит разогрев мишени. При достижении необходимого давления насыщенных паров начинается переход мишени в жидкую фазу, так как температура плавления совпадает с температурой достижения необходимого давления	Происходит разогрев мишени без перехода в жидкую фазу. О достижении давления насыщенных паров свидетельствует резкий рост ионного тока
Переход в режим самораспыления (зона 4 на рис. 2)	Мишень в жидком состоянии	Мишень в жидком состоянии	Мишень в твердом состоянии
Окончание процесса (зона 5 на рис. 2)	Самопроизвольно при окончании материала (так как происходит снижение ионного тока и давления насыщенного пара) или принудительно по времени	Самопроизвольно при окончании материала (так как происходит снижение ионного тока и давления насыщенного пара) или принудительно по времени	Как правило происходит принудительно по времени





II группа – материалы, температура плавления которых совпадает (или близка  $\pm 100$  °С) к температуре, при которой достигается давление насыщенных паров при давлении  $10^{-2}$  Па. Примеры таких материалов – Cu, Ag, Au, Al.

III группа – материалы, температура плавления которых значительно превышает температуру, при которой достигается давление насыщенных паров при давлении  $10^{-2}$  Па. Примерами таких материалов являются Mo, W, V, Ti, Cr, Ta.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЖФМР ДЛЯ РАЗНЫХ ГРУПП МАТЕРИАЛОВ

В зависимости от принадлежности материала к определенной группе технологический процесс (ТП) осаждения имеет свои особенности (табл. 1, 2 и 3).

Характер протекания процесса ЖФМР для материалов всех трех групп носит общий характер (рис. 2), однако для каждой из них имеются свои особенности (табл. 4).

В зоне 1 (от 0 до 2 мин) мишень находится в твердом состоянии, в зоне 2 (от 2 до 3 мин) происходит расширение мишени, увеличение ее толщины из-за нагрева. Ионный ток падает из-за повышения уровня материала над магнетроном при сохранении коэрцитивной силы магнитной системы. В зоне 3 происходит активное испарение мишени (от 3 до 4 мин), что приводит к увеличению ионного тока, но процесс горения разряда пока невозможен без рабочего газа. Зона 4 (от 4 до 14 мин) – разряд может существовать без рабочего газа, стабильный режим самораспыления. Зона 5 (от 14 до 19 мин) – полное испарение материала мишени и самопроизвольное угасание разряда (может отсутствовать для материалов III группы, поскольку мишень может полностью не выработаться).

\*\*\*

В заключение можно отметить, что метод жидкофазного магнетронного распыления благодаря своей универсальности и экологичности обладает большим потенциалом к замещению существующих производственных методов, предназначенных для формирования толстых слоев металлизации различного назначения. Основным препятствием для более широкого использования метода является недостаточное количество исследований, позволяющих обоснованно выбирать метод и определять начальные параметры и режимы процесса в зависимости от осаждаемых материалов.

В результате анализа физики процесса жидкофазного магнетронного распыления и свойств осаждаемых материалов удалось классифицировать материалы на три группы по критерию соотношения температуры плавления и температуры достижения давления насыщенных паров, достаточного для поддержания процесса распыления в собственных парах осаждаемого материала в диапазоне от  $10^{-2}$  до  $10^{-1}$  Па.

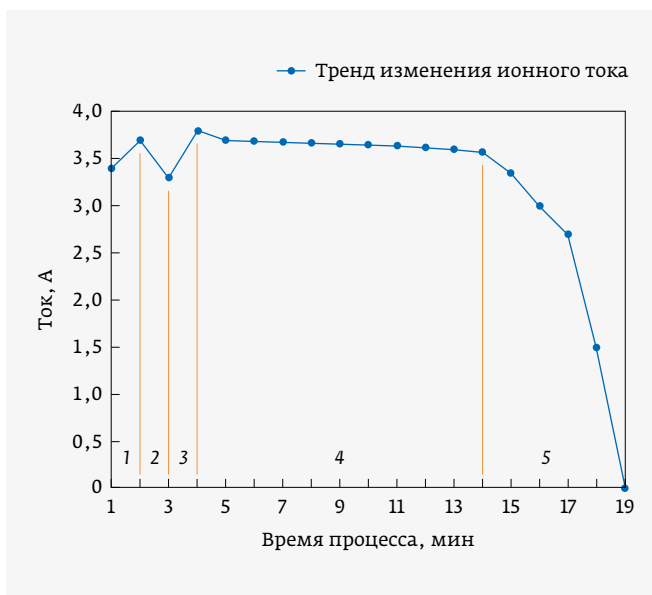


Рис. 2. Зависимость ионного тока от времени процесса ЖФМР (при стабилизации по мощности; стабилизированная мощность – 1,2 кВт)

Данная классификация позволила выделить этапы процесса жидкофазного магнетронного распыления и описать особенности протекания процесса на каждом из них. Такое описание является достаточно универсальным и может быть предложено для разработки процессов осаждения методом ЖФМР любого материала, а также для выбора начальных диапазонов режимов и параметров процесса ЖФМР как в лабораторных установках, так и в производственных.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Медведев А. М.** Сборка и монтаж электронных устройств. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2007. 256 с.
2. **Громов Г. Г.** Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули // Компоненты и технологии. 2014. № 8. С. 108–113.
3. **Третьяков С. Д.** Современные технологии производства радиоэлектронной аппаратуры. Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2016. 102 с.
4. Печатные платы. Справочник: в 2-х т. / Под ред. К. Ф. Кумбза. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. Т. 1. С. 898–927.
5. **Гамбург Ю. Д.** Гальванические покрытия. Справочник по применению. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2006. 216 с.
6. **Блейхер Г. А., Кривобоков В. П., Юрьева А. В.** Магнетронное осаждение покрытий с испарением мишени // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 12. С. 56–61.
7. **Кузьмичев А. И.** Магнетронные распылительные системы. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. М.: Аверс, 2008. 244 с.



8. **Moiseev K. M., Nazarenko M. V.** Use of magnetron sputtering with liquid target in manufacturing of electronic components for spacecraft // AIP Conference Proceedings 2019, 2171, 170010.
9. **Блейхер Г. А., Кривобоков В. П., Юрьева А. В.** Анализ возможностей магнетронных распылительных систем для высокоскоростного осаждения функциональных покрытий // Известия ВУЗов. Физика. 2014. № 57. С. 104–108.
10. **Данилин Б. С., Какурин М. В., Минайчев В. Е., Одинокое В. В., Сырчин В. К.** Осаждение металлических пленок путем распыления из жидкой фазы // Микроэлектроника. 1977. С. 84–87.
11. **Сиделёв Д. В.** Осаждение покрытий из хрома и никеля с помощью магнетронного диода с «горячей» мишенью: Дисс. на соиск. уч. ст. канд. тех. наук: М., 2018. 138 с.
12. **Kaziev A. V., Tumarkin A. V. et al.** Discharge parameters and plasma characterization in a dc magnetron with liquid Cu target // Vacuum. 2018. PP. 48–54.
13. **Tumarkin A., Zibrov M., Khodachenko G., Tumarkina D.** High-rate deposition of silicon films in a magnetron discharge with liquid target // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 768. PP. 1–4.
14. **Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М.** Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1188 руб.

## СПРАВОЧНИК ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ

*Под ред. Д. Хоффмана, Б. Сингха, Дж. Томаса III*

*При поддержке ФГУП «Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского»*

*Перевод с англ. под ред. В.А. Романько, С.Б. Нестерова*

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2011. – 736 с.,  
978-5-94836-294-6

Предлагаемый справочник по вакуумной технике и технологиям является переводом книги, созданной американскими специалистами. В справочнике приведены фундаментальные положения технологии вакуума и физики поверхности, рассмотрены конструкции различных типов насосов и средств измерения вакуума и течеискания. Подробно описаны различные вакуумные системы и технологии. Приведены примеры применения вакуумной техники. Большое внимание в справочнике уделено описанию технологии получения и поддержания безмасляного вакуума. Справочник состоит из пяти частей:

- 1) введение;
- 2) получение вакуума (насосы и технологии, используемые в настоящее время в эксплуатации и конструкции);
- 3) вакуумные измерения (давление, парциальное давление, поток газа, обнаружение течей, калибровка и технологии, связанные с вакуумметрией);
- 4) элементы и конструкции вакуумных систем, включая материалы, клапаны, фланцы, эксплуатацию и техническое обслуживание, а также очистку и поддержание чистоты системы;
- 5) применение высоковакуумной и сверхвысокововакуумной технологии. Информация, включенная в настоящий справочник, предназначена для тех, кто практически использует вакуумную технологию.

Справочник содержит множество ссылок для получения подробных сведений в конкретных представляющих интерес областях.

Издание содержит значительный объем экспериментальных данных, необходимых при проектировании и эксплуатации специального вакуумного технологического оборудования. Справочник является прекрасным дополнением к отечественным изданиям и будет полезен для инженерно-технических работников и специалистов, занимающихся конструированием, изготовлением и эксплуатацией вакуумных систем, а также для студентов и аспирантов технических вузов.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; ✉ [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru), [sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)



Стоимость 2200 р. за номер  
Периодичность: 10 номеров в год  
[www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)



Стоимость 1450 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.photonics.ru](http://www.photonics.ru)



Стоимость 1450 р. за номер  
Периодичность: 6 номеров в год  
[www.j-analytics.ru](http://www.j-analytics.ru)

# ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

[www.technosphere.ru](http://www.technosphere.ru)



Стоимость 1300 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.lastmile.ru](http://www.lastmile.ru)



Стоимость 1300 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.nanoindustry.ru](http://www.nanoindustry.ru)



Стоимость 1800 р. за номер  
Периодичность: 4 номера в год  
[www.stankoinstrument.ru](http://www.stankoinstrument.ru)