

При токе дуги в несколько кА наблюдается ускорение выпускного канала под действием самогенерируемого азимутального магнитного поля, что является положительным эффектом при использовании плазменного источника в качестве двигателя. С другой стороны, сильное собственное магнитное поле приводит к эффекту пинчевания (контрогирования), который является отрицательным. Очевидно, необходимы дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию геометрии разрядной ячейки и электрических параметров схемы.

Жидкометаллический катод характеризуется режимом стабильной работы без специальных усилий на поставку рабочей жидкости к фактической области катода.

#### **Список литературы:**

1. Laser plasma thruster: patent 6530212 USA / Phipps C. R., Luke J. R. March 11, 2003.
2. N. Chumakov, A. S. Grabtchikov, V. A. Orlovich, P. V. Shpak, N. A. Bosak, A. M. Petrenko, P. V. Chekan, P. N. Malevich, Study of microchip laser use possibility in laser-plasma thrusters for space application, *in Proc of 7<sup>th</sup> Belarussian-Russian Workshop: Semiconductor lasers and systems*, 1-5 June 2009, Minsk, Belarus, pp.124-128 (in russian).
3. S.A. Popov, A.N. Panchenko, A.V. Batrakov, F.N. Ljubchenko, and V.V. Mataibaev, Experimental study of the laser ablation plasma flow from the liquid Ga-In target // *IEEE Trans. Plasma Science*. - V. 39. - 2011. - No. 6, Part 1. - pp. 1412 - 1417.
4. J. Schein, N. Qi, R. Binder, M. Krishnan, J.K. Ziemer, J.E. Polk, and A. Anders, Low mass vacuum arc thruster system for station keeping missions, presented as a paper IEPC-01-228 at the 27<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, Pasadena, CA, 15-19 October, 2001.
5. M. Karima, H. Horisawa, and Y.Oigawa, Characteristics of high-repetition rate operation of a laser-assisted pulsed plasma thruster, presented as a paper IEPC-2013-193 at the 33<sup>rd</sup> International Electric Propulsion Conference, The George Washington University, USA, October 6-10, 2013.
6. G.A.Mesyatz and D.I.Proskurovsky, *Pulsed Electrical Discharge in Vacuum*, Springer-Verlag, Berlin, 1989.

### **Магнетронная распылительная система с жидкофазным катодом**

Николаев М.В. Зайцев Д.А.

[Mvn4@tpu.ru](mailto:Mvn4@tpu.ru)

*Научный руководитель: Юрьева А.В., ассистент кафедры водородной энергетики и плазменных технологий ФТИ*

**Введение.** Получение высококачественных тонкопленочных слоев является едва ли не самой главной задачей среди современных актуальных направлений развития технологий и материаловедения.

Постоянно возрастающие потребности в покрытиях различного назначения – металлизации рулонных материалов, нанесении защитных, износостойких, декоративных покрытий, изготовление различных пленочных элементов изделий электронной техники – приводит к появлению новых и модификации уже давно известных способов получения тонких пленок.

Среди множества различных методов нанесения покрытий особое место занимают вакуумные ионно-плазменные методы. Широкое распространение они получили

благодаря следующим преимуществам: высокая чистота покрытий и однородность их толщины; получение пленок стехиометрического состава; высокая адгезия покрытия и подложки; проведение процесса осаждения при низкой температуре подложки; высокоскоростное нанесение покрытий; безопасность для окружающей среды.

Вакуумные ионно-плазменные методы нанесения покрытий по способу формирования потоков осаждаемых частиц делятся на CVD (Chemical Vapor Deposition) и PVD (Physical Vapor Deposition) методы [1].

*Метод химического газофазного осаждения покрытий (CVD)* практически не имеет ограничений по химическому составу покрытий. Все присутствующие частицы могут быть осаждены на поверхность материала. Какие покрытия при этом образуются, зависит от комбинации материалов и параметров процесса. При химическом осаждении происходят химические реакции на или около поверхности покрываемого материала. Для протекания необходимых химических реакций требуется температура до 1100°. Это условие существенно ограничивает число материалов, на которые можно нанести покрытие методом CVD. Процессы CVD происходят при давлениях между 100 и 1000 Па.

Благодаря высокой температуре нанесения, обеспечивающей частичную диффузию материала покрытия в материал основы, покрытия CVD характеризуются хорошей адгезией покрытия и основного материала.

При *физическом газофазном осаждении покрытий (PVD)* материал переходит в газовую фазу из твердого состояния в результате испарения под воздействием тепловой энергии или в результате распыления за счет кинетической энергии столкновения частиц материала. Энергия, распределение и плотность потока частиц определяется методом нанесения, параметрами процесса и формой источника частиц.

Осаждение покрытий методом PVD происходит при невысокой температуре подложки (до 450°C), что не приводит к практическим ограничениям по материалам, на которые наносится покрытие. Все PVD процессы происходят в вакууме или в атмосфере рабочего газа при достаточно низком давлении ( $10^{-5}$  – 1 Па). Это необходимо для облегчения переноса частиц от источника (мишени) к изделию (подложке) при минимальном количестве столкновений с атомами или молекулами газа.

Осаждение тонких пленок в вакууме включает три этапа:

- генерацию атомов или молекул,
- перенос их к подложке,
- конденсация и рост пленки на поверхности подложки.

Каждая из этих стадий нанесения покрытий может контролироваться независимо от остальных, что является большим преимуществом метода PVD над методом химического газофазного осаждения покрытий.

Для нанесения тонких пленок наибольшее применение нашли следующие методы физического осаждения: термическое испарение, ионно-плазменное напыление и магнетронное распыление.

#### **Получение тонкопленочных покрытий в вакууме. Термическое испарение**

До середины прошлого века наиболее распространенным способом получения тонких пленок являлось термическое испарение вещества в вакууме. При температуре, равной либо превышающей температуру испарения, частицы покидают испаритель, переносятся в вакууме на подложку и конденсируются на ее поверхности

в виде тонкой пленки [2]. К достоинствам метода осаждения тонких пленок термическим испарением относятся высокая чистота осаждаемого материала (процесс проводится при высоком и сверхвысоком вакууме), высокая скорость осаждения покрытий (порядка 1 мкм/с) и относительная простота реализации. К недостаткам можно отнести небольшую энергию испаренных частиц (0,1-1 эВ), что приводит к низкой адгезии покрытия и подложки.

**Магнетронное распыление.** Сущность метода заключается в выбивании (распылении) атомов вещества из поверхностных слоев мишени высокоэнергетичными ионами рабочего газа (обычно Ar) и последующем их осаждении на подложке.

Энергия распыленных атомов значительно превышает кинетическую энергию испаренных атомов и составляет 0,1-100 эВ.

В магнетронных распылительных системах (МРС) распыление мишени происходит за счет бомбардировки её поверхности ионами рабочего газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда. Электроны, эмитируемые с мишени под действием ионной бомбардировки, захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям в скрещенных электрическом и магнитном полях.

За счет локализации плазмы у поверхности катода достигается высокая плотность ионного тока и большая удельная мощность, рассеиваемая на мишени. Локализация электронов вблизи мишени предотвращает бомбардировку ими подложек, что снижает температуру и радиационные дефекты в создаваемых структурах [3].

Достоинствами метода осаждения тонких пленок магнетронным распылением являются универсальность (можно наносить металлы, сплавы, диэлектрики, магнитные композиции), регулируемая скорость осаждения, способность получать равномерные по толщине пленки на больших поверхностях и относительно простая конструкция.

К недостаткам относятся невысокая чистота осаждаемой пленки (из-за наличия рабочего газа) и нерегулируемая энергия осаждаемых частиц.

**Магнетронная распылительная система с жидкофазной мишенью.** Эффективность магнетронного распыления характеризуется скоростью осаждения тонких пленок, которая определяется плотностью потока распыленных атомов (скоростью распыления) [4]. Следовательно, чем большее число ионов попадает из плазмы на мишень и осуществляет ее распыление, тем выше производительность магнетрона (больше скорость роста покрытия).

По данным [3], процесс ионного распыления происходит в приповерхностной области металла толщиной 0,3-0,8 нм и на него затрачивается менее 3% подводимой энергии, вся остальная энергия переходит в тепло. В типичных МРС мишень и магнитная система имеют хороший тепловой контакт, поэтому требуется обеспечивать непрерывное охлаждение катодного узла для предотвращения выхода из строя магнитной системы. В случае если материал мишени МРС находится в твердом состоянии, удельная мощность ионного тока ограничивается величиной критической удельной мощности, которую выдерживает материал мишени без расплавления.

Этим объясняется один из главных недостатков МРС – относительно невысокая скорость роста покрытий. Так, для магнетрона на постоянном токе при распылении

металлической мишени она составляет 1...10 нм/с [4-6], а при работе магнетрона в среде реактивного газа - еще меньше [7].

Увеличить производительность МРС можно, если использовать жидкофазную мишень, т.е. увеличить плотность потока осаждаемых частиц за счет наличия распылительной и испарительной компоненты.

Добиться этого можно, если теплоизолировать мишень от охлаждаемой магнитной системы и, таким образом, создать условия для разогрева и расплавления материала мишени.

Впервые эта идея была предложена В.К. Сырчиным [5], однако эти устройства не нашли широкого распространения на практике, так как их возможности изучены недостаточно.

### **Конструкции МРС с жидкофазной мишенью**

В ходе выполнения работы были рассмотрены две конструкции МРС с жидкофазной мишенью: с дисковой и кольцевой мишенью (рис. 1).

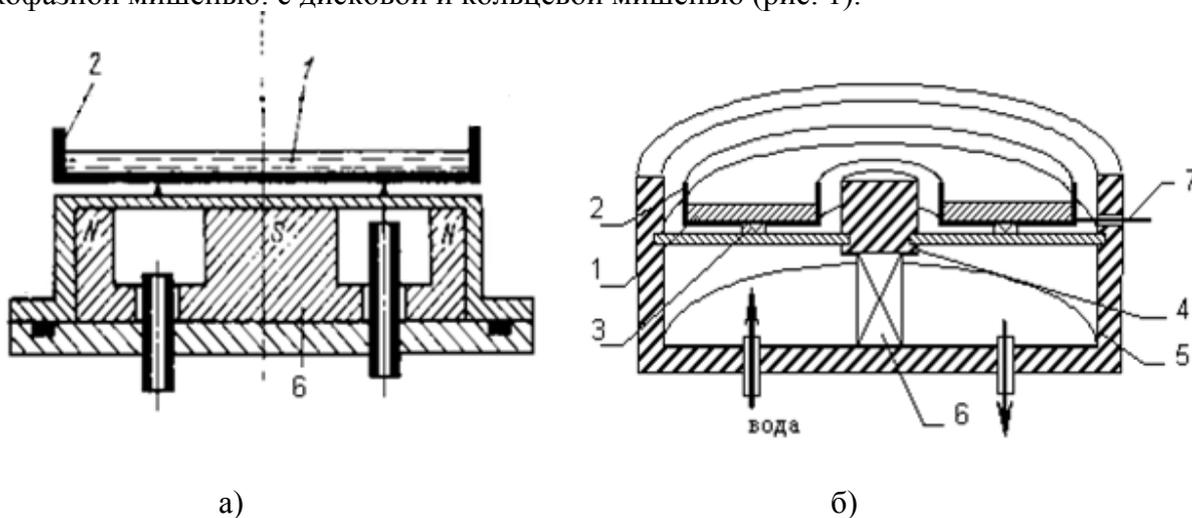


Рис. 1. Конструкции МРС с жидкофазной мишенью (а – дисковая мишень, б – кольцевая мишень) [8]:

1 – мишень; 2 – тигель; 3 – керамические вставки; 4 – центральный магнитопровод; 5 – корпус магнетрона; 6 – постоянные магниты; 7 – термопара.

Мишень из испаряемого материала помещается в теплоизолированный тигель, выполненный из немагнитного тугоплавкого материала. Непосредственно под тиглем расположена водоохлаждаемая магнитная система. Между тиглем и корпусом магнитной системы находится зазор порядка 2 мм, препятствующий отводу тепла от мишени в процессе ее разогрева.

Рабочий объем откачивается до необходимого давления, затем напускается аргон и между тиглем и анодом прикладывается напряжение. При этом загорается разряд, локализованный у поверхности мишени магнитным полем. Материал мишени за счет интенсивной ионной бомбардировки нагревается до такого значения температуры, при котором испарение атомов с поверхности мишени становится заметным. Сначала расплавляется зона горения разряда, затем центральная часть мишени и краевая область, в течение ~10 минут мишень полностью переходит в жидкое состояние.

При определенной плотности ионного тока начинается интенсивное испарение материала мишени, причем при достижении высокой упругости паров распыляемого вещества начинается процесс самораспыления, в котором магнетронный разряд способен поддерживаться только атомами, удаляемыми с поверхности мишени. Тогда можно прекратить напуск аргона, что существенно снизит загрязнение получаемых тонкопленочных покрытий. Этот режим работы МРС с жидкофазной мишенью вызывает наибольший интерес.

Основной недостаток конструкции, имеющей дисковую мишень (рис.1, а) – неравномерное плавление мишени. Из-за разницы температур зоны расплава и относительно холодных краев мишени происходит ее разрыв, что приводит к нестабильности разряда.

Конструкция с кольцевой мишенью (рис. 1, б) лишена этого недостатка, так как вся мишень находится непосредственно в зоне горения разряда и, следовательно, происходит ее равномерное расплавление.

#### ***Распределение магнитного поля***

Для обеспечения стабильной работы МРС с жидкофазной мишенью следует создать вблизи её поверхности достаточно сильное и равномерной магнитное поле.

Анализ распределений электрического и магнитных полей в различных конструкциях магнетронов показывает, что высота области скрещенных полей над поверхностью мишени не велика - до 0,5- 1 см, а требуемая величина индукции на поверхности мишени составляет около 0,03 – 0,1 Тл, что обеспечивает стабильное горение разряда [9].

Для сравнительной оценки обеих конструкций в программном комплексе ELCUT было смоделировано распределение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля по поверхности мишени. Результат моделирования представлен на рисунке 2.

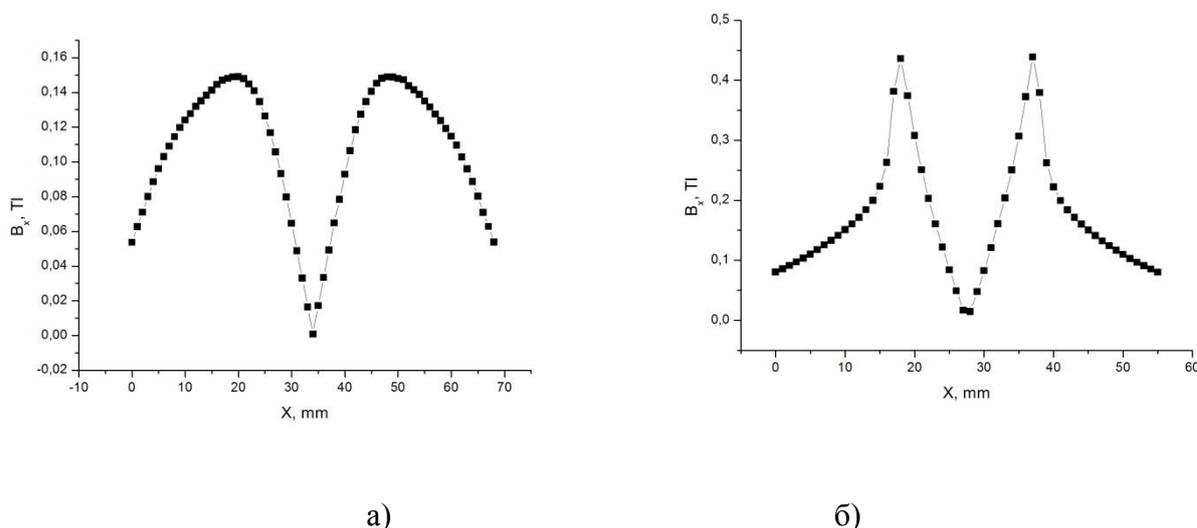


Рис. 2 – Распределение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля в МРС с жидкофазной мишенью: а) дисковая мишень, б) кольцевая мишень

Как видно из рис.2 распределение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля для обоих случаев являются похожими на классические. Однако есть и отличия. Распределение магнитного поля в МРС с дисковой мишенью в большей степени похоже на распределение магнитного поля в МРС с твердой мишенью (рис.2 а). Величина магнитного поля в этом случае будет напрямую зависеть от толщины мишени, т.к. она находится над магнитной системой. С увеличением толщины мишени магнитная индукция будет уменьшаться, а значит, и рабочие характеристики МРС с дисковой мишенью тоже будут ухудшаться. В частности, будет увеличиваться рабочее давление, рабочее напряжение, при котором разряд будет стабильно гореть, также будет увеличиваться. Кроме того, с увеличением рабочего давления мишень будет эффективней охлаждаться, что приведет к увеличению времени выхода мишени в жидкое состояние. Достоинством МРС с дисковой мишенью является большая площадь расходуемого материала мишени.

Распределение магнитного поля в МРС с кольцевой мишенью также имеет вид, близкий к классическому. Однако максимальное значение индукции сдвинуто ближе к центру МРС. Это происходит из-за того, что в центре МРС установлены полюсные наконечники из магнитного материала. Эти наконечники позволяют вывести силовые линии магнитного поля гораздо выше уровня магнитов. Как видно из рис. 2 б индукция магнитного поля на поверхности кольцевой мишени в несколько раз выше, что понижает рабочее давление и рабочее напряжение МРС. Форма силовых линий магнитного поля тут не имеет решающего значения, т.к. после расплавления мишени осаждение происходит со всей ее площади. Кроме того в случае кольцевой мишени ее толщина может быть достаточно большой, т.к. изменяя высоту полюсного наконечника можно вывести силовые линии магнитного поля на достаточно большое расстояние от магнитов.

#### ***Скорость осаждения***

При работе МРС с жидкофазной мишенью одновременно осуществляется процесс распыления и испарения, причем при определенных режимах испарение становится преобладающим над распылением. Таким образом, благодаря наличию испарительной компоненты в осаждаемом потоке можно увеличить скорость осаждения покрытий на 1-2 порядка по сравнению с МРС с твердой мишенью.

Для экспериментов использовался магнетрон, конструкция которого представлена на рис. 1,б. В тигель, изготовленный из нержавеющей стали, помещалась алюминиевая мишень. В атмосфере аргона (давление порядка 0,5 Па) производилось осаждение покрытия на стеклянные подложки. Ряд экспериментов проводился из твердой фазы, т.е. плавления мишени не было. На часть же образцов напыление производилось после перехода мишени МРС в жидкую фазу. На рисунке 3 представлена зависимость скорости осаждения алюминия от плотности мощности разряда при наличии (рис.3, кривая 2) и отсутствии испарения (рис.3, кривая 1).

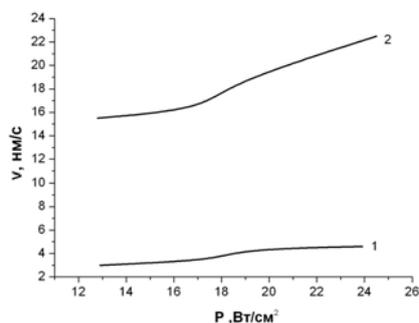


Рис. 3 – Зависимость скорости осаждения пленок алюминия от плотности мощности разряда

Из графика следует, что скорость осаждения покрытий из жидкой фазы в несколько раз превосходит скорость осаждения из твердой фазы при прочих равных условиях (при плотности мощности на мишени 12-25 Вт/см<sup>2</sup> скорости осаждения покрытий из жидкой фазы составляли 15-25 нм/с, из твердой фазы составила 3-5 нм/с).

**Заключение.** Рассмотрены некоторые конструкции МРС с жидкофазной мишенью. Показано, что использование мишени в виде кольца может оказаться более предпочтительным, поскольку в этом случае величина магнитной индукции на поверхности мишени больше, что приводит к более высокой концентрации ионов в прикатодном пространстве.

Использование такой конструкции позволяет понизить рабочее давление в вакуумной камере примерно на порядок по сравнению с жидкофазным магнетроном, имеющим дисковую мишень.

В совокупности с возможностью данных магнетронов работать в режиме «самораспыления» (распыление в собственных парах мишени, когда рабочий газ используется только для «зажигания» магнетронной плазмы) понижение рабочего давления в камере приведет к значительному улучшению свойств получаемых покрытий.

**Список литературы:**

1. Thin-Film Deposition: Principles and Practice. – Boston: McGraw Hill, 1995. – 616 р.
2. Панфилов Ю.В. Нанесение тонких пленок в вакууме // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – №3. – С. 76-80.
3. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. – М.: Радио и связь, 1982. – 72 с.
4. Марахтанов М.К. Магнетронные системы ионного распыления. – Изд. МГТУ, 1990. – 76 с.
5. Данилин Б.С., Какурин М.В., Минайчев В.Е., Одинокоев В.В., Сырчин В.К. Осаждение металлических пленок путем распыления из жидкой фазы // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника.- 1978.- В. 2(24).- С. 84-87.
6. Духопельников Д.В. Магнетронные распылительные системы: устройство, принцип работы, применение. – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 54 с.
7. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. – М.: Техносфера, 2010. – 528 с.

8. Р.С. Третьяков, В.П. Кривобоков, С.Н. Янин Эрозия жидкофазной мишени в плазме магнетронного разряда // Известия ВУЗов. Физика. – 2007. – Т.50 №9. – с. 487-490
9. Магнетронные распылительные системы / Кузьмичёв А. И.. Кн. 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. – Киев: Аверс, 2008. – 244 с.

### **Взаимодействие мощных ионных пучков с металлическими поглотителями**

Пименов Э.Ю., Лисов В.И.  
*pimenov-eduard@mail.ru*

*Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент, Данейкин Ю.В., Томский политехнический университет*

**Введение.** Пучково-плазменные (аддитивные) технологии в настоящее время, являются наиболее перспективными и эффективными методами получения поверхностных слоёв материалов с заданными свойствами. При обработке поверхности металлов мощными ионными пучками (МИП) добиваются улучшения твердости, износо- и коррозионной стойкости. С точки зрения прогнозирования свойств поверхностных слоев облучаемых материалов, исследование результатов облучения в зависимости от параметров МИП является актуальной задачей. В натурном эксперименте не всегда удается определить причинно-следственные связи между процессами взаимообусловлено протекающими в системе «МИП-металл». Математическое моделирование является мощным инструментом позволяющим в непрерывном режиме рассматривать всю совокупность протекающих процессов.

#### **Описание системы «МИП-металл»**

Описание параметров металлов, испытывающих мощное энергетическое воздействие проводилось с использованием авторских гидродинамических кодов реализующих обобщенную модель упруго-пластической среды испытывающей мощное импульсное воздействие [1]. Для описания поведения материального континуума в основу модели положен Лагранжев формализм. Элементы модели подробно описаны в работе [2].

Рассмотрим закономерности формирования ударно-волнового возмущения, генерируемого в результате взаимодействия МИП [3] (протонно-углеродный пучком (60% – протоны, 40% – ионы углерода) плотностью мощности  $1,1 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность пучка  $\tau = 120$  нс) с металлической мишенью. Амплитудно-временная развертка импульсов ускоряющего напряжения и плотности тока представлена на рисунке 1. В качестве мишени рассмотрен алюминиевый поглотитель.