

## Вакуумно-дуговое технологическое оборудование

Д.К. Кострин, \*А.А. Лисенков, В.Д. Гончаров, М.Л. Виноградов  
Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», ул. Профессора Попова, 5

\*Санкт-Петербург, Институт проблем машиноведения РАН, В.О., Большой пр. 61  
E-mail: [lisran@yandex.ru](mailto:lisran@yandex.ru)

В статье рассмотрены особенности работы и принципы применения вакуумно-дуговых источников плазмы. Данные источники широко используются для нанесения защитных, упрочняющих и износостойких материалов, а также антиэмиссионных покрытий в производстве мощных генераторных ламп.

*Vacuum arc technological equipment. D.K. Kostrin, A.A. Lisenkov, V.D. Goncharov, M.L. Vinogradov. The peculiarities of usage and principles of application of the vacuum arc plasma sources are described. These sources are widely used for applying protective, strengthening and wear-resistant materials and also antiemission coatings in the production of powerful generator tubes.*

Перспективным способом поверхностной обработки материалов остается метод, использующий потоки металлической плазмы, генерируемой вакуумно-дуговым разрядом с интегрально-холодным катодом. Данный тип технологического оборудования обеспечивает высокую эффективность при получении ионизированных и высокоскоростных потоков вещества, открывает возможности управления технологическим процессом нанесения покрытий из плазмы различных чистых металлов (Me), осуществления плазмохимического синтеза простых (MeO, MeC, MeN) и сложных (MeCN, Me<sub>1</sub>Me<sub>2</sub>N) соединений, воспроизведения сплавов (CoCrAlY) и получения сложных комбинированных покрытий, а также проведения как ионного распыления обрабатываемой поверхности, так и легирования приповерхностного объема. Протекание технологического процесса в вакууме обеспечивает чистоту получаемых покрытий и высокие адгезионные свойства на материалах с различными физико-химическими свойствами.

Создание нового класса технологического оборудования, позволяющего расширить области практического применения дуговых источников плазмы и технологических процессов на их основе, связано с теоретическим и экспериментальным изучением физических процессов в плазме вакуумно-дугового разряда. Однако до настоящего времени вопросы генерации потоков металлической плазмы не имеют своей законченной теории и многие детали физической картины как в самом катодном пятне, так и в зоне транспортировки плазменного потока остаются неясными, что связано со сложной взаимосвязью между отдельными параметрами и многообразием протекающих физических явлений.

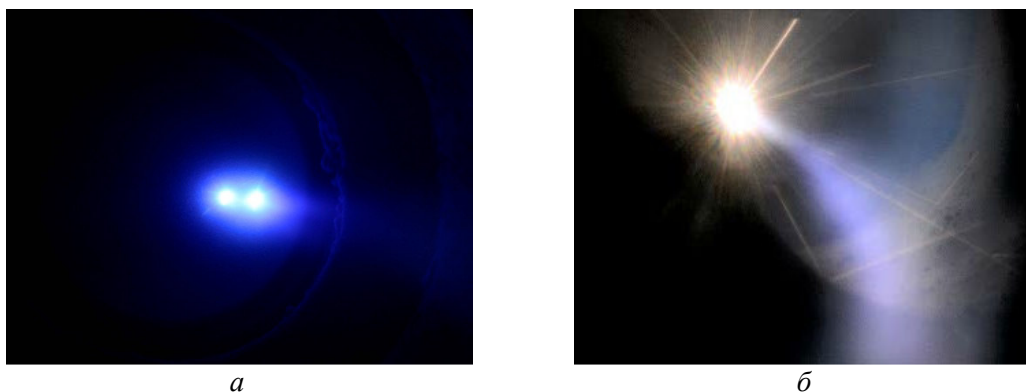
Таким образом, проблемы повышения как надежности и увеличения срока службы деталей, конструкций и их качества, так и обеспечение экономии таких металлов как W, Mo, Ni, Co относятся к числу первоочередных задач науки и техники.

Решение этих задач все теснее связывают с созданием на основе вакуумно-дугового разряда с интегрально-холодным катодом нового класса технологического оборудования, предназначенного для разработки ресурсосберегающих и экологически чистых технологических процессов объемного и поверхностного модифицирования материалов, формирования из потоков металлической плазмы покрытий из чистых металлов и плазмохимических соединений.

**Вакуумно-дуговой разряд** – это самостоятельный разряд, развивающийся в парах материала катода. Эмиссионным центром разряда является катодное пятно, характеризующееся малыми размерами  $10^{-6} \dots 10^{-3}$  м, в котором за очень короткое время возникает температура, значительно превышающая температуру кипения, что и обуславливает интенсивное распыление (разрушение) материала катода, обеспечивающее высокую эффективность генерационных процессов в разряде.

Затруднения, встречающиеся при изучении катодного пятна, объясняются его малыми размерами и высокой скоростью перемещения на достаточно ограниченной рабочей поверхности, при постоянно изменяющихся параметрах системы, в которой оно находится. Так

для области катодного пятна на материале катода характерны быстрые фазовые переходы из твердого состояния в жидкое, газообразное и плазменное, в котором также следует различать: плотную неидеальную, умеренно разреженную и бесстолкновительную плазму.



*Рис. 1. Вакуумно-дуговой разряд на титановом (а) и графитовом (б) катодах.*

Область высоких температур, создаваемая катодным пятном, значительно больше самих размеров катодного пятна, над которым наблюдается высокая концентрация паров металла электрода, создающая сплошной спектр, характерный для дуг высокого давления.

Катодное пятно включает в себя эмитирующий участок катода и прилегающий к нему бесстолкновительный слой пространственного заряда, в котором локализуется все катодное падение напряжения и обеспечивается передача энергии ионам. Величина этой энергии должна быть достаточна для воспроизводства необходимого количества испаряемого материала, требуемого для процессов ионизации в прикатодной области, и для разогрева катода до температуры, обеспечивающей необходимое распределение по энергиям свободных электронов в теле катода. Из условий существования вакуумно-дугового разряда с интегрально-холодным катодом, процессы эмиссии носят преимущественно авто- и термоавтоэлектронный характер, зависящие от температуры в катодном пятне и напряженности электрического поля. Горение разряда невозможно ниже некоторой температуры в катодном пятне, определяемой теплофизическими свойствами материала катода и электрическими параметрами. Уровень мощности, выделяющейся на катоде, определяется катодным падением напряжения, близким по значению к потенциалу ионизации металла, и величиной разрядного тока.

Технологическое вакуумно-дуговое устройство выполняет свое функциональное предназначение лишь в том случае, если зоной вероятного существования пятна является исключительно рабочая поверхность катода.

**Процесс нанесения покрытия** из металлической плазмы вакуумно-дугового разряда включает в себя: процессы, протекающие на катоде, связанные с генерацией из области катодного пятна электронов, испарения атомов материала катода; формирование плазменного потока и транспортировка его в рабочем объеме; осаждение заряженных и нейтральных частиц на обрабатываемом изделии.

В процессе осаждения из металлической плазмы вакуумно-дугового разряда определяющее значение имеет энергия конденсирующихся частиц, влияющая не только на адгезию формируемого покрытия с подложкой, но и на его структуру, состав и наличие дефектов.

При попадании частицы на поверхность между ними происходят взаимодействия различного типа, определяемые энергией химических связей между атомами обрабатываемой поверхности и падающими частицами; величиной поверхностных электрических полей, возникающих вследствие асимметрии кристаллической решетки на поверхности; поляризацией падающих частиц; постоянных решетки и температурой подложки.

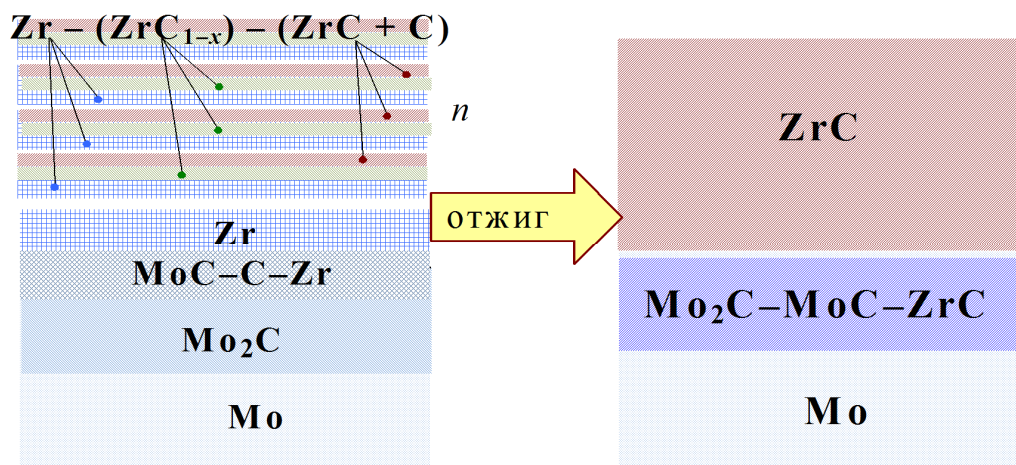


Рис. 2. Структура многослоевого покрытия, состоящего из последовательно напыленных слоев  $[(Zr)-(ZrC_{1-x})-(ZrC + C)]$ , сформированного на предварительно образованном карбиде материала сеточного полотна (слева) и состав покрытия, полученный в результате диффузионного отжига (справа).

Падающий ион при определенных условиях может быть отражен обратно атомом или группой атомов бомбардируемого образца, что обычно приводит к отклонению иона от первоначального направления своего движения и к обмену энергией между ионом и атомом мишени. При этом обмен энергией может быть как упругим, так и неупругим, что определяется типом взаимодействующих частиц и энергией иона.

Для протекания атомной дислокации энергия иона должна быть достаточна, для смещения поверхностного атома из положения, со слабой связью с кристаллической структурой образца, в положение, где эта связь значительно сильнее. Ионы с более высокими энергиями способны вызывать и внутренние дислокации в глубине образца.

При ионной имплантации ионы проникают в глубь кристаллической решетки и остаются там, полностью израсходовав свою энергию. Химическое распыление происходит в результате взаимодействия ионов с поверхностными атомами, сопровождающееся образованием на поверхности новых химических соединений. Вследствие этого самый верхний слой атомов может оказаться в газообразном состоянии и испариться.

Если взаимодействующие с поверхностью образца ионы обладают настолько большой энергией, что полностью освобождают от связей один или несколько атомов, то происходит физическое распыление поверхности. Коэффициент распыления  $S_{\text{расп}}$  в этом случае определяется числом атомов (в основном нейтральных), выбиваемых с поверхности одним падающим ионом. Считают, что коэффициент распыления является функцией атомного номера, причем для него характерна периодичность, согласующаяся с периодической таблицей элементов.

**Плазмохимический синтез соединений** в плазме вакуумно-дугового разряда осуществляется при вводе реакционно-способного газа в генерируемый плазменный поток. Скорость подачи газа основывается на согласовании потоков взаимодействующих частиц металлических ионов с молекулами газа. Основными параметрами, оказывающими влияние на структуру и свойства покрытий, являются: давление газа (отвечает за элементный и фазовый состав покрытия), ток разряда (определяет состав плазменного потока и скорость роста покрытия), потенциал смещения (обеспечивает скорость роста покрытия, микроструктуру, твердость и напряжения покрытия), температура подложки (микроструктура и остаточные напряжения).

Отличительной особенностью рассматриваемых фаз являются присущие им широкие области гомогенности, где при сохранении типа кристаллической структуры наблюдается образование значительного числа вакансий как по металлоидной, так и по металлической подрешеткам.

Кроме того, как и многие иные фазы внедрения, карбиды и нитриды способны образовывать многочисленные твердые растворы, ряд которых отличается повышенными (по отношению к исходным) эксплуатационными характеристиками.



*Рис. 3. Сеточный электрод перед обработкой (слева) и электрод на оправке после напыления покрытия на основе углерода (справа).*

Эффективность плазмохимических реакций синтеза соединений зависит как от степени и характера возбуждения молекул, так и от кинетической энергии ионов плазменного потока. Повышение энергии ионов и атомов, бомбардирующих поверхность конденсации, приводит к увеличению поверхностной диффузионной подвижности адатомов, обуславливая при этом преимущественный рост кристаллитов в плоскости конденсации.

Для технологии нанесения комбинированных покрытий применяются технологическая установка, позволяющая использовать одновременную работу двух испарителей или использование сплавного катода.

**Заключение.** Проведены теоретические и экспериментальные исследования физико-химических основ использования потоков металлической плазмы для формирования покрытий и условий направленного поверхностного модифицирования свойств обрабатываемой поверхности.

Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований физических процессов, протекающих в плазме вакуумно-дугового разряда, позволивший выявить основные закономерности характера перемещения катодных пятен и их эмиссионных характеристик с изменением температуры катода, оказывающих влияние на параметры генерируемого потока металлической плазмы и на свойства формируемого покрытия.

Изучено движение заряженных частиц в осесимметричном магнитном поле источника плазмы и систем транспортировки плазменных потоков, на основе чего разработаны теоретическая модель и математическая программа расчета траекторий движения плазменных потоков, позволившие создать новые электромагнитные системы для формирования равномерных покрытий на крупногабаритных изделиях и изделиях сложной геометрической формы.

#### Литература

1. Фролов В.Я., Лисенков А.А., Барченко В.Т. Физические основы применения низкотемпературной плазмы. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2010. 221 с.
2. Lisenkov A.A., Valuev V.P. Vacuum Arc Discharge on Integrally Cold Cathode // *Vakuum in Forschung und Praxis*. 2011. Vol. 23, № 6. P. 32–36.
3. Фролов В.Я., Лисенков А.А. и др. Электротехнологические промышленные установки. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2010. 572 с.
4. Bystrov Yu.A., Vetrov N.Z., Lisenkov A.A. Plasmachemical synthesis of carbide compounds in metal-containing plasma jet from vacuum arc discharge // *Technical Physics Letters*. 2008. Vol. 34, № 9. P. 734–736.

5. Bystrov Yu.A., Vetrov N.Z., Lisenkov A.A. Anti-Emission Intermetallic Coating Based on Platinum and Zirconium // Technical Physics Letters. 2009. Vol. 35, № 7. P. 618–621.
6. Bystrov Yu.A., Vetrov N.Z., Lisenkov A.A. Barrier Layer of an Anti-Emission Coating // Technical Physics Letters. 2010. Vol. 36, № 6. P. 570–573.
7. Bystrov Yu.A., Vetrov N.Z., Lisenkov A.A. Special Aspects of Structure Formation of a Multicomponent Layer from Arc-Vacuum Plasma // Technical Physics Letters. 2013. Vol. 39, № 10. P. 914–916.
8. Барченко В.Т., Ветров Н.З., Лисенков А.А. Технологические вакуумно-дуговые источники плазмы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 243 с.
9. Bystrov Yu.A., Vetrov N.Z., Lisenkov A.A. Kostrin D.K. Technological Capabilities of Vacuum Arc Plasma Sources // Vakuum in Forschung und Praxis. 2014. Vol. 26, № 5. P. 19–23.
10. Kostrin D.K., Lisenkov A.A. Surface Modification by Vacuum Arc Plasma Source // Materials Science Forum. 2016. Vol. 843. P. 278–283.
11. Лисенков А.А., Ветров Н.З., Кострин Д.К. Антиэмиссионное покрытие на основе карбида циркония // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, № 8. С. 55–62.

## **Конкурентоспособное отечественное оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии материалов АЗВ5**

*А.Н. Алексеев*

*г. Санкт-Петербург, ЗАО «НТО», пр. Энгельса, 27, к.5, лит.А, sales@semiteq.ru*

*Обладание самостоятельными компетенциями для аппаратного и технологического обеспечения критически важных технологий микро- и оптоэлектроники является определяющим для успешной конкуренции государства на мировом рынке. Важнейшим направлением для радиоэлектронной отрасли является разработка и производство ЭКБ на основе сложных полупроводников АЗВ5. В докладе представлены результаты одной из последних разработок ЗАО «НТО» - система МЛЭ STE35 для выращивания высококачественных эпитаксиальных гетероструктур на подложках Ø100мм.*

### ***Competitive domestic molecular beam epitaxy systems for A3B5 materials epitaxial growth.***

*A. Alexeev. The availability of independent competencies for hardware and technology provision of critical technologies of micro- and optoelectronics is crucial for successful Russia competition worldwide. The most important direction in radio electronics industry is the development and production of electronic components based on A3B5 compound semiconductors. The report presents SemiTEq JSC development results of MBE STE35 system for growing high-quality epitaxial heterostructures on Ø100mm substrates.*

Полупроводниковые гетероструктуры на основе материалов АЗВ5 (арсениды, фосфиды, антимониды, нитриды) являются важнейшим базовым материалом для разработки и производства широкого класса приборов микро- и оптоэлектроники. Технологии материалов АЗВ5 обеспечивает производство таких важнейших приборов, как СВЧ-транзисторы и МИС, применяемые в современной радиолокации, инфракрасные фотодетекторы различных диапазонов, широкоформатные QWIP-матрицы для тепловизионных приборов, перспективные системы скоростной оптоволоконной связи, вертикально-излучающие лазеры на квантовых ямах и квантовых точках (VCSEL), мощные лазерные диоды для накачки твердотельных лазеров и многое другое. Именно поэтому, в России, как и за рубежом, базовые технологические процессы и специальное технологическое оборудование, которые лежат в основе технологических маршрутов создания данных приборов, относятся к категории критических.

Одним из таких критических процессов является получение гетероструктур на основе материалов АЗВ5 с заданными свойствами. Качество гетероструктур, наряду с ключевыми технологиями кристального производства, во многом определяет параметры конечного