

На основании анализа результатов численного моделирования, проведенного в данной работе, можно сделать следующие выводы:

- ускорение электронов исходной плазмы в условиях ЭЦР в нарастающем магнитном поле и последующее адиабатическое сжатие плазмы позволяют создавать релятивистский плазменный сгусток, максимум плотности которого находится в его геометрическом центре. Параметры плазмы, достигнутые по окончании стадии адиабатического сжатия: $W = 8$ МэВ, $n_e = 5 \cdot 10^{10}$ см⁻³;

- ускорение протонов сопровождается разделением электронной и ионной компонент; небольшая часть протонов (10 %) на длине ускорения 1 м достигает энергии более 1 МэВ при сравнительно невысокой плотности релятивистского плазменного сгустка ($5 \cdot 10^{10}$ см⁻³).

Результаты численного моделирования показали, что разработанная численная модель позволяет эффективно изучать все стадии работы ускорителя. Численные эксперименты продемонстрировали возможность создания релятивистской плазмы и ускорения протонов в спадающем пространстве магнитного поля. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ускорение ионов в ускорителе ECRIPAC является более устойчивым, чем ускорение ионов релятивистскими электронными кольцами. Авторы работы планируют провести серию численных

экспериментов по созданию релятивистских плазменных сгустков с большей плотностью и ускорением ионов, чтобы оценить возможность использования проектируемого ускорителя в различных приложениях, в том числе в медицине (протонная терапия).

Л и т е р а т у р а

1. Векслер В. И.// Атомная энергия. 1957. Т. 5. С. 427.
2. Векслер В. И.// Там же. 1968. Т. 24. С. 317.
3. Саранцев В. П., Перельштейн Э. А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. — М.: Атомиздат, 1979.
4. Дубинов А. Е. и др.// Успехи физических наук. 2002. Т. 172. № 11.
5. Geller R., Golovanivsky K. S.// C.E.N.G, SPhat — PSI, 1990. № 690. P. 12.
6. Geller R., Golovanivsky K. S.// Nuclear Instruments and Methods. 1992. V. 68. P. 7.
7. Андреев В. В., Головановский К. С.// Физика плазмы. 1985. Т. 11. С. 300.
8. Andreev V. V., Umnov A. M.// Plasma Sources Science and Technology. 1999. V. 8. P. 479.
9. Birdsall C. K., Langdon A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. — Bristol, Philadelphia.: IOP Publishing Ltd, 1995. P. 305.
10. Сигов Ю. С. Вычислительный эксперимент: Мост между прошлым и будущим физики плазмы. — М.: Физматлит, 2001. С. 223.

Статья поступила в редакцию 9 августа 2005 г.

Numerical modeling of collective proton acceleration in ECRIPAC accelerator

M. Koube, V. P. Milantiev, A. M. Umnov
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

A process of a relativistic plasma bunch production and acceleration of protons in a proposed collective ion accelerator ECRIPAC have been studied with the use of three-dimensional numerical model, based on a method of particle in a cell, taking into account both electrostatic and magnetic plasma interactions.

УДК 621.7.043:539.23

Физические процессы в аномальном тлеющем разряде при нанесении оксидных покрытий

Р. Т. Галяутдинов, Н. Ф. Кашапов, Г. С. Лучкин
Казанский государственный технологический университет, г. Казань, Россия

Рассмотрены физические процессы в аномальном тлеющем разряде в процессах нанесения покрытий. Дано описание установки и измерительного оборудования. Приведены результаты исследований низкотемпературной плазмы. Выбрана модель описания состава и структуры покрытий, на основе которой синтезированы оптические покрытия.

Плазменные технологии находят широкое применение в машиностроении, радиоэлектронике и оптическом приборостроении, в том числе при нанесении покрытий на поверхности металлов, полупроводников и диэлектриков в целях придания им требуемых физических свойств.

Магнетронная распылительная система (МРС) позволяет осуществлять процесс испарения пленкообразующего материала с большой скоростью и с одновременной ионизацией и возбуждением распыленных атомов. Возможность управлять параметрами разряда позволяет направленно влиять на свойства получаемых покрытий. Поэтому технологии с применением магнетронной распылительной системы являются перспективными в процессах изготовления тонкопленочных покрытий.

Цель работы — определение влияния параметров разряда в магнетронной распылительной системе на свойства формируемых покрытий и разработка на основе установленных закономерностей новых технологий получения оптических покрытий с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками. Для достижения поставленной цели экспериментально исследовался аномальный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях в процессе нанесения покрытий.

Экспериментальное оборудование для нанесения покрытий

Для исследования аномального тлеющего разряда в процессах нанесения покрытий была разработана и создана экспериментальная установка, функциональная схема которой представлена на рис. 1. Вакуумная камера, изготовленная из стали 12Х18Н10Т, представляет собой горизонтально расположенный цилиндр с внутренним диаметром 0,7 м и длиной 0,7 м. Объем вакуумной камеры составляет 0,27 м³. Камера имеет две крышки, на одной из которых закреплены два планарных магнетрона, а на другой — устройство вращения подложек. Имеется также окно для ведения визуального наблюдения. На камере предусмотрены места для крепления тоководов, вакуумных датчиков, трубопроводов форвакуумной линии, паромасляного агрегата, устройств подачи рабочих газов и клапана для напуска атмосферного воздуха.

Управление всеми механизмами осуществляется дистанционно с пульта управления. Система откачки обеспечивает необходимое давление в вакуумной камере и стабильный расход рабочего плазмообразующего газа. Вакуумная система установки обеспечивает остаточное давление в камере $6,5 \cdot 10^{-3}$ Па и последующую работу магнетрона при давлении рабочего газа 0,1—0,4 Па. Время откачки вакуумной камеры до остаточного давления не более 30 мин.

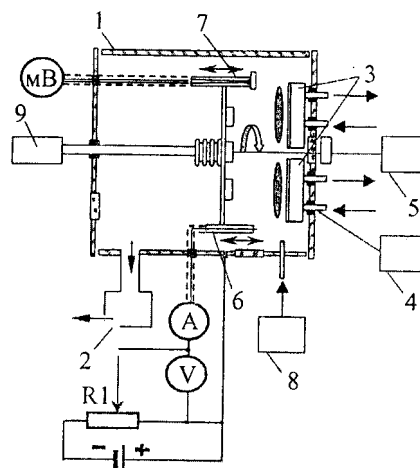


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки:

- 1 — корпус вакуумной камеры; 2 — система откачки;
- 3 — магнетроны; 4 — источник питания магнетрона;
- 5 — система фотометрического контроля толщины покрытий; 6 — одиночный электростатический зонд;
- 7 — термопара; 8 — система подачи плазмообразующего газа; 9 — система вращения подложек

В измерительный комплекс для контроля аномального тлеющего разряда входят вольтметр постоянного тока, амперметр постоянного тока, вакуумметр, термопара, зонд для измерения пространственного распределения потока тепла, одиночный электростатический зонд, магнитный зонд.

Созданная вакуумная установка для осаждения пленок с помощью магнетронной распылительной системы обладает значительными возможностями для напыления функциональных покрытий благодаря следующим достоинствам:

способности получать пленки различных металлов и их оксидов;

высокой скорости осаждения и возможности ее регулирования;

низкой температуре нагрева подложки и возможности наносить покрытия на материалы с низкой термостойкостью;

возможности получать пленки с высокой адгезионной прочностью;

возможности варьирования давлением, составом газовой среды и потенциалом смещения на подложке;

возможности контролировать толщину покрытий в процессе их нанесения;

возможности нанесения многослойных покрытий в одном технологическом цикле благодаря наличию двух магнетронов.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Магнетронная распылительная система характеризуется напряжением на катод, током разряда, плотностью тока на мишени, величиной индукции магнитного поля, составом и дав-

лением рабочего газа, материалом мишени (катода) [1].

Основные параметры разряда изменялись в следующих пределах: напряжение на катоде U — от 375 до 600 В, давление p аргона в камере поддерживалось в пределах 0,1–0,4 Па, материалом катода служили алюминий, медь, титан и нержавеющая сталь, время напыления t изменялось от 0,5 до 25 мин, индукция магнитного поля катода магнетрона составляла $B = 0,02; 0,04$ и $0,08$ Тл.

Наиболее полное представление о механизме разряда в магнетронной распылительной системе можно получить из вольт-амперной характеристики (ВАХ) (рис. 2). С уменьшением давления ВАХ сдвигаются в область больших рабочих напряжений. Сравнение кривых показывает, что даже незначительное изменение давления сильно влияет на напряжение разряда, что в свою очередь сказывается на режимах и скорости распыления мишени [2].

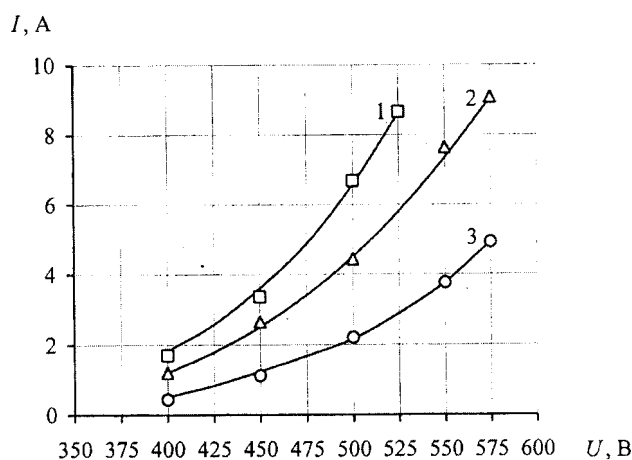


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики магнетрона при различном материале катода:
1 — Al; 2 — Cu; 3 — Ti
($p = 0,25$ Па; $B = 0,04$ Тл)

С увеличением индукции магнитного поля магнетрона наблюдается рост тока разряда при одних и тех же значениях напряжения на катоде. Магнитная индукция повышает эффективность ионизации атомов рабочего газа, поскольку электроны, эмиттируемые с катода, захватываются магнитным полем и совершают циклоидальное движение у поверхности мишени. Они оказываются в ловушке, создаваемой, с одной стороны, магнитным полем, возвращающим электроны, а с другой — поверхностью мишени, отталкивающей их. Электроны движутся в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа. Прежде чем электрон попадет на анод, его энергия используется на ионизацию и возбуждение атомов рабочего газа, что приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это в свою оче-

редь приводит к увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени. Таким образом, наложение магнитного поля эквивалентно увеличению давления рабочего газа [3].

Из рис. 2 видно, что при одном и том же напряжении ток разряда на магнетроне с алюминиевой мишенью выше, чем на магнетроне, имеющем медную или титановую мишень, т. е. процесс распыления алюминия происходит интенсивнее, чем меди или титана.

Проведены измерения и получены значения распределения плавающего потенциала вблизи магнетрона. Результаты представлены на рис. 3. Линии 1, 2, 3 показывают распределение потенциала на расстоянии 6, 12 и 18 см от поверхности катода МРС, соответственно. Проведенные измерения указывают на наличие сильной неоднородности плавающего потенциала вблизи поверхности мишени катода. По мере увеличения расстояния до катода неоднородность плавающего потенциала уменьшается.

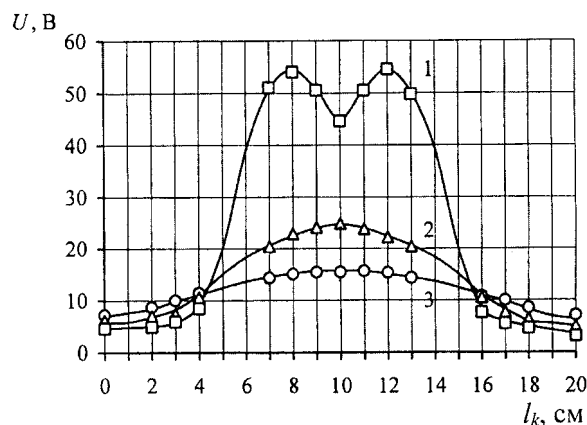


Рис. 3. Плавающий потенциал разряда МРС, измеренный вдоль поверхности катода зондовым методом на расстоянии l :
1 — $l = 6 \cdot 10^{-2}$ м; 2 — $l = 12 \cdot 10^{-2}$ м; 3 — $l = 18 \cdot 10^{-2}$ м
($I = 5,5$ А; $U = 470$ В; $p = 0,25$ Па; $B = 0,04$ Тл)

При напылении покрытий поверхность подложек нагревается. Это происходит за счет радиационного нагрева и бомбардировки их поверхности электронами и нейтральными частицами. В процессе напыления температура подложек возрастает, асимптотически стремясь к пределу, определяемому мощностью разряда и расстоянием между магнетроном и подложкой. Выбор режима напыления, соответствующего небольшой скорости осаждения, объясняется тем, что в этом случае можно без дополнительного охлаждения поддерживать температуру подложки не выше 100°C , что важно при напылении на подложки из материала с низкой термостойкостью, например из пластика [4]. На рис. 4 представлено пространственное распределение температуры в МРС относительно продольной оси мишени магнетрона. Результаты показывают, что нагрев подложек вблизи рабо-

тающего магнетрона происходит неравномерно. При увеличении расстояния между магнетроном и подложками неравномерность нагрева уменьшается, и на расстоянии, превышающем 18 см, нагрев подложек происходит практически равномерно. Однако необходим предварительный нагрев последних для устранения быстрого роста температуры в начальный период нанесения покрытия для предотвращения возникновения остаточных напряжений в пленке. С этой целью подложки необходимо нагревать до температуры, равной или большей той, которая установится на них в процессе осаждения покрытия.

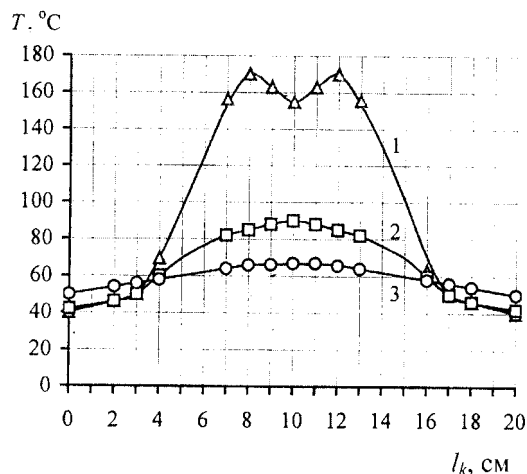


Рис. 4. Пространственное распределение температуры в МРС относительно продольной оси мишени на расстоянии l от ее поверхности:

1 — $l = 6 \cdot 10^{-2}$ м; 2 — $l = 12 \cdot 10^{-2}$ м; 3 — $l = 18 \cdot 10^{-2}$ м
($I = 5,5$ А; $U = 470$ В; $p = 0,25$ Па; $B = 0,04$ Тл)

Толщина получаемых покрытий увеличивается прямо пропорционально продолжительности процесса напыления. В свою очередь скорость распыления зависит от мощности разряда. При увеличении последней рост скорости распыления имеет линейную зависимость (рис. 5). С увеличением мощности разряда число атомов аргона, бомбардирующих поверхность катода в единицу времени, растет. Это ведет к возрастанию числа распыленных атомов и, следовательно, увеличению скорости роста толщины покрытия. В свою очередь мощность разряда МРС зависит от давления рабочего газа — аргона. Изменяя такие параметры разряда как мощность и давление рабочего газа и используя полученные зависимости, можно регулировать скорость напыления покрытий.

Подача отрицательного напряжения на подложку изменяет пространственное распределение потенциала вокруг магнетрона и подложки так, что ионизированные атомы аргона начинают бомбардировать поверхность растущего покрытия. Такое воздействие оказывает влияние на оптические свойства покрытия.

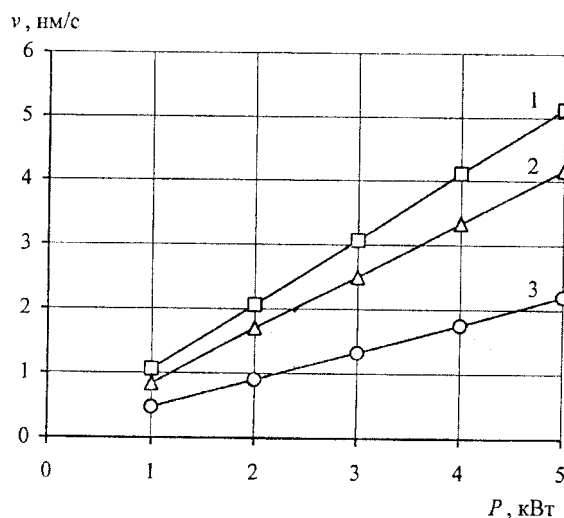


Рис. 5. Зависимость скорости напыления покрытия различных материалов от мощности разряда:

1 — Al; 2 — Cu; 3 — Ti
($p = 0,3$ Па; $B = 0,04$ Тл; $l = 15 \cdot 10^{-2}$ м; $T = 400$ К)

Таким образом, формирование пленок оксидов с помощью МРС происходит при следующих характерных условиях:

низкая концентрация инертного газа у поверхности подложки;

наличие пространства, которое атомы, распыленные с поверхности мишени, преодолевают практически без столкновений с атомами плазмообразующего газа;

в процессе роста поверхность пленки подвергается непрерывной бомбардировке электронами, движущимися со стороны мишени;

температура подложки в процессе нанесения покрытия составляет 370—500 К.

В связи с этим наиболее предпочтительной моделью описания состава и строения пленок оксидов (в нашем случае SiO_x и TiO_x , где $0 \leq x \leq 2$), является модель макроскопической смеси (МС). Согласно этой модели пленки TiO_x представляют собой смесь кластеров Ti и TiO_2 , погруженных в субоксиды (ненасыщенные оксиды), состоящие из $\text{TiO}_v\text{Ti}_{1-x}$, $v = 0, 1, 2, 3$. Конфигурация TiO_3Ti и TiOTi_3 в модели МС появляется из-за наличия переходного слоя между кластерами Ti и TiO_2 [5].

Заключение

В результате исследования аномального тлеющего разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях в процессе нанесения покрытий определено влияние параметров разряда в магнетронной распылительной системе на свойства формируемых функциональных покрытий. Это позволило выбрать модель описания состава и структуры покрытий, на основе которой можно разрабатывать и синтезировать покрытия с требуемыми свойствами [6, 7].

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ, проект № 04-02-9750200/4 по теме "Разработка технологии плазменного нанесения неоднородных оптических покрытий многоцелевого назначения".

Литература

1. Данилин Б. С. Магнетронные распылительные системы/ Под ред. Б. С. Данилина, В. К. Сырчина. — М.: Радио и связь, 1982.
2. Galiautdinov R. T., Kashapov N. F., Luchkin G. S.// Welding International, 2003. № 17 (8). P. 655—658.

3. Зиганшин Р. Р., Ибрафиллов З. Х., Кашапов Н. Ф.// Межвузовский сб. науч. тр. Сер. Физика газового разряда. — Казань, 1993. С. 13.
4. Галаяутдинов Р. Т., Кашапов Н. Ф., Лучкин Г. С.// Инженерно-физический журнал АН Беларуси. 2002. Т. 75. № 5. С. 170—173.
5. Галаяутдинов Р. Т., Кашапов Н. Ф.// Известия вузов. Сер. Авиационная техника. 2001. № 2. С. 79—80.
6. Лучкин Г. С. Аномальный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях в процессах нанесения оптических покрытий: Автореф... дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. — Казань, 2005.
7. Галаяутдинов Р. Т., Кашапов Н. Ф., Лучкин Г. С. Многослойное зеркало заднего вида для транспортных средств: Пат. РФ на изобретение № 2213362.

Статья поступила в редакцию 16 июня 2005 г.

Physical processes in an anomalous glow discharge during deposition of oxide coatings

R. T. Galiautdinov, N. F. Kashapov, G. S. Luchkin
Kazan State Technological University, Kazan, Russia

Physical processes in an anomalous glow discharge in the process of deposition of coatings are considered. The set-up and measuring equipment are described. The results of investigation of the low temperature plasma are presented. Model for describing composition and structure of coatings had chosen. On basis of that model optical coatings are sintesed.

УДК 677.674

Экспериментальное исследование влияния плазмы ВЧЕ-разряда на адгезионные свойства композиционных материалов

И. Ш. Абдуллин, В. В. Хамматова, Е. В. Кумпан
Казанский государственный технологический университет, г. Казань, Россия

Представлен выбор оптимальных режимов модификации композиционных материалов потоком плазмы высокочастотного емкостного разряда пониженного давления в целях повышения адгезионной прочности клеевых соединений деталей одежды.

В швейной промышленности широко применяется клеевой способ соединения деталей одежды, позволяющий существенно улучшить внешний вид и качество готовых изделий, повысить производительность труда. Повышение адгезионной прочности клеевых соединений деталей одежды — важная проблема швейной отрасли. Практически все текстильные материалы подвергаются различным видам заключительной отделки, которые очень негативно влияют на качество клеевого соединения. Сырьевая база текстильного производства испытывает все большую зависимость от качества синтетических волокон, которые более чувствительны к действию повышенных температур [1].

Одним из способов повышения адгезионной прочности клеевых соединений текстильных материалов является обработка потоком плазмы высокочастотного емкостного разряда пониженного давления в среде плазмообразующего газа аргона.

Цель работы — повышение адгезионной прочности клеевых соединений при дублировании деталей одежды с использованием потока плазмы ВЧЕ-разряда и выбор оптимальных режимов установки.

В качестве композиционного материала выбран пакет, состоящий из костюмной ткани (арт. Тюнинг) и термоклеевого прокладочного материала (арт. 4-C216/4).