

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ
СИЛЬНОТОЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ МАГНЕТРОННОЙ
РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

© 2011 г. А. Н. Одиванова, В. Г. Подковыров*, Н. С. Сочугов, К. В. Оскомов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

** ООО “Прикладная электроника”, Россия*

Поступила в редакцию 17.05.2010 г.

Представлены результаты исследований вольтамперных характеристик, пространственных и временных параметров плазмы сильноточной импульсной магнетронной распылительной системы с плоским дисковым катодом диаметром 10 см. Показано, что плотность плазмы превышает значения, характерные для постоянного магнетронного разряда, на три порядка и достигает 10^{13} см^{-3} на расстояниях до 250 мм от катода, при пиковом токе разряда около 500 А. Скорость распространения плазмы из прикатодной области составляет 1 см/мкс в аксиальном направлении, и 0.25 см/мкс в радиальном. Методами оптической эмиссионной спектроскопии зафиксировано многократное повышение степени ионизации плазмы с ростом пикового тока разряда, причем, преимущественно за счет распыляемого материала.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сильноточное импульсное магнетронное распыление привлекает все большее внимание специалистов не только как инструмент для нанесения покрытий с уникальными характеристиками, но и как источник плазмы высокой концентрации. В традиционных магнетронах, работающих на постоянном или импульсном токе, плотность мощности ограничивается нагревом мишени и обычно составляет 1–10 Вт/см². При этом концентрация плазмы вблизи магнетрона составляет 10^9 – 10^{11} см^{-3} [1]. Получаемая плазма в основном состоит из ионизированных частиц инертного газа, в котором содержание ионов распыляемого вещества меньше 10% [2]. Сильноточное импульсное магнетронное распыление реализуется при импульсной плотности мощности на катоде от сотен до тысяч Вт/см², при этом, благодаря высокой скважности импульсов, средняя плотность мощности по прежнему находится в диапазоне 1–10 Вт/см². Увеличение амплитуды тока разряда до сотен ампер обеспечивает генерацию плазмы с концентрацией до 10^{13} см^{-3} [3], при этом степень ионизации распыленного материала увеличивается до 70–90% [4].

Экстремально высокая концентрация плазмы сильноточного магнетронного разряда открывает возможности для разработки на его основе новых методов модификации поверхности, в частности, ионно-плазменного осаждения высококачественных покрытий различного функционального назначения [5], а также трехмерной ионной и электронной плазменно-иммерсионной обработ-

ки. Однако для реализации этих технологий необходимо систематическое экспериментальное исследование пространственных и временных параметров разряда и плазмы при работе магнетронной распылительной системы в сильноточном импульсном режиме.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 приведена принципиальная схема экспериментальной установки. Исследования проводились в вакуумной камере 1 из нержавеющей стали размером 600 × 600 × 600 мм³, стенки которой являлись анодом магнетронного разряда. На камеру крепился магнетрон, основные узлы которого – распыляемый титановый катод 6 (диск диаметром 100 мм и толщиной 5 мм), а также система постоянных магнитов из сплава NdFeB 7. Рабочим газом был аргон, давление в камере поддерживалось на уровне 0.2 Па.

Напряжение на магнетрон подавалось от импульсного источника питания 8, включающего накопительную емкость C_1 , индуктивность L_1 и тиристорный ключ T_1 , частота повторения импульсов изменялась от 1 до 100 Гц. Длительность импульса тока разряда определялась величинами $C_1 = 20 \text{ мкФ}$ и $L_1 = 60 \text{ мкГн}$, а его амплитуда – напряжением зарядки емкости C_1 , которое изменялось от 300 до 1000 В. Для облегчения зажигания импульсного магнетронного разряда использовался вспомогательный слаботочный разряд с током 200 мА, возбуждаемый от источника постоянного напряжения через высокоомное сопротивление R_1 .

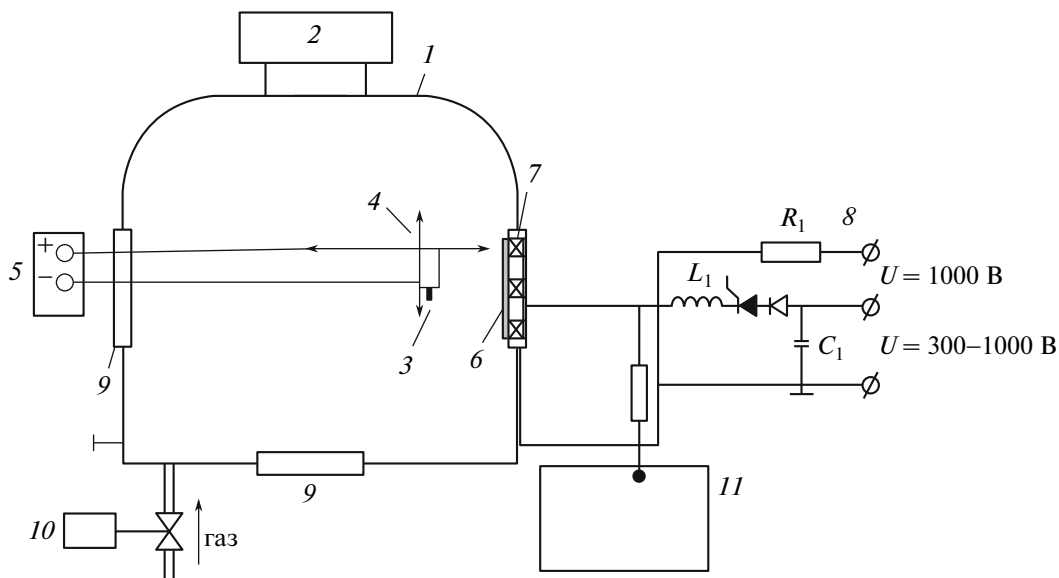


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера; 2 – турбомолекулярный насос; 3 – электрический зонд; 4 – система перемещения зонда; 5 – источник питания зонда; 6 – распыляемая мишень; 7 – постоянные магниты; 8 – униполярный импульсный источник питания магнетрона; 9 – окна камеры; 10 – вакуумметр; 11 – осциллограф.

Плазменные измерения проводились с помощью одиночного ленгмюровского зонда 3, выполненного из нихромовой проволоки диаметром 0.6 мм и длиной 2 мм. Зонд устанавливался на систему перемещения 4, которая обеспечивала его движение в аксиальном и радиальном направлениях относительно мишени. Напряжение, подаваемое на зонд изменялось от -30 В до $+20$ В с шагом 1 В. В аксиальном направлении расстояние до мишени изменялось от 125 до 375 мм, а смещение в радиальном направлении достигало 90 мм от центра мишени. Ток и напряжение на магнетроне, а также ток на зонд регистрировался осциллографом 11.

Фотометрические и спектральные измерения плазмы разряда осуществлялись с помощью установленного на систему перемещения гибкого световода диаметром 0.5 мм с коллиматором на конце. При проведении фотометрических измерений световод находился на расстоянии 4 см от катода и мог перемещаться радиально, а сигнал с него поступал на фотодиод, сигнал с которого затем регистрировался осциллографом. При проведении спектральных измерений световод неподвижно находился напротив центра катода на расстоянии 15 см, а сигнал регистрировался при помощи спектрометра AvaSpec-2048USB2, синхронизированного с осциллографом. Данный спектрометр позволяет регистрировать спектры излучения в диапазоне 237–792 нм, с разрешением 0.7 нм. Идентификация спектральных линий проводилась с использованием таблиц [6].

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При подаче на катод импульсного отрицательного напряжения можно наблюдать несколько режимов горения магнетронного разряда, осциллограммы которых приведены на рис. 2. На рис. 2а приведены осциллограммы разряда в его тлеющей, диффузной форме. До момента включения тиристора T_1 напряжение на разрядном промежутке составляет около 200 В, что соответствует напряжению горения вспомогательного слаботочного разряда. При включении тиристора T_1 напряжение на магнетроне увеличивается до уровня зарядки накопительной емкости, но в течение 1–2 мкс уменьшается за счет падения на индуктивности L_1 и в дальнейшем до конца импульса тока меняется незначительно. Следует отметить, что при увеличении напряжения зарядки емкости C_1 от 500 до 1200 В происходит увеличение пикового тока от 10 до 500 А, однако падение напряжения на разряде остается неизменным и приблизительно соответствует напряжению горения стационарного магнетронного разряда на постоянном токе в аналогичных условиях (давление и состав рабочего газа, материал катода).

При увеличении пикового тока до некоторого предельного значения (которое в зависимости от давления в камере и материала мишени изменялось от 100 до 800 А), происходил переход от тлеющей к дуговой (с образованием катодного пятна) форме разряда (рис. 2б). Обнаружено также, что между тлеющей и дуговой стадией может существовать форма разряда, характеризующаяся наличием глубоких колебаний напряжения на

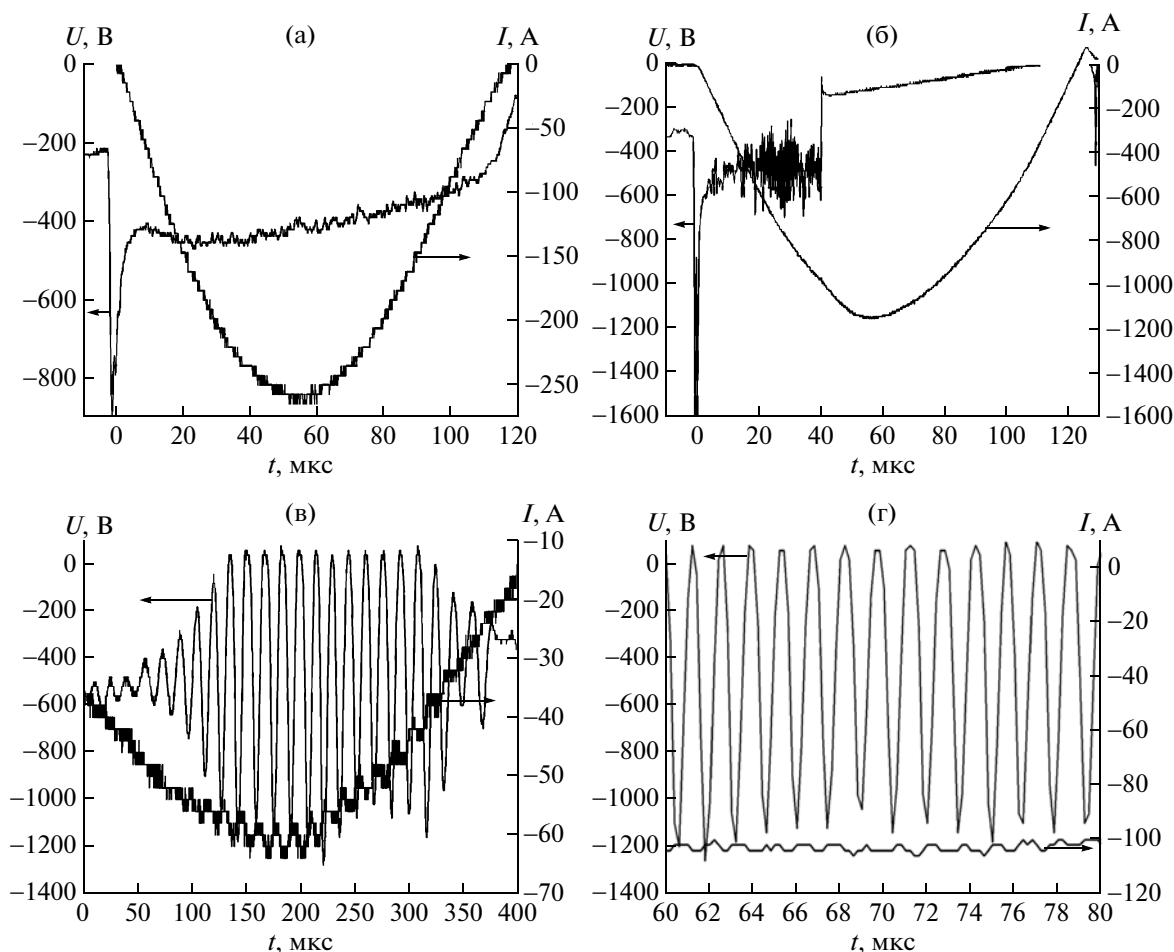


Рис. 2. Характерные осциллограммы тока и напряжения импульсного сильноточного магнетронного разряда в тлеющем (а), дуговом (б), (в) и (г) переходном режимах горения.

разряде. Пример такой осциллограммы приведен на рис. 2в, а на рис. 2г показана часть этой же осциллограммы с более высоким временным разрешением. Видно, что на осциллограмме напряжения появляются колебания с периодом около 1.5 мкс, причем, напряжение на магнетроне может менять полярность. Отсутствие заметных колебаний на осциллограмме тока объясняется наличием в разрядной цепи большой индуктивности $L_1 = 60$ мкГн. Природа этих пульсаций, по-видимому, связана с возникновением на поверхности катода эмиссионных центров, ток электронов из которых приводит к разряду конструктивной емкости магнетрона, составляющей около 1 нФ, на цепь, включающую сопротивление плазмы и индуктивность разрядного контура. Смена полярности напряжения на катоде приводит к обрыву электронного тока из эмиссионного центра и электрическая прочность катодного слоя восстанавливается. Происходит зарядка конструктивной емкости через индуктивность L_1 до напряжения, существенно превышающего напряжение

горения разряда, поэтому процесс повторяется. Отметим, что падение напряжения до нуля говорит о шунтировании разрядного промежутка плазмой с высокой проводимостью, которая может образовываться при возникновении микродуг без образования катодного пятна. Это подтверждается наличием выбросов на осциллограмме тока фотодиода (рис. 3а), причиной которых может быть локальное (в области среза световода) увеличение интенсивности свечения плазмы. Несовпадение частоты колебаний напряжения разряда и частоты появления выбросов на осциллограмме тока фотодиода объясняется тем, что коллимированный световод регистрирует только те микродуго, которые локализованы в области его среза. Предположительно, причинами появления микродуг и других неустойчивостей в плазме тлеющего разряда является перегрев катода при росте плотности тока, а также наличие на его поверхности загрязнений, оксидных пленок и других неоднородностей. Поэтому для стабильной работы магнетрона в режиме импульсного сильноточного разряда поверхность катода должна

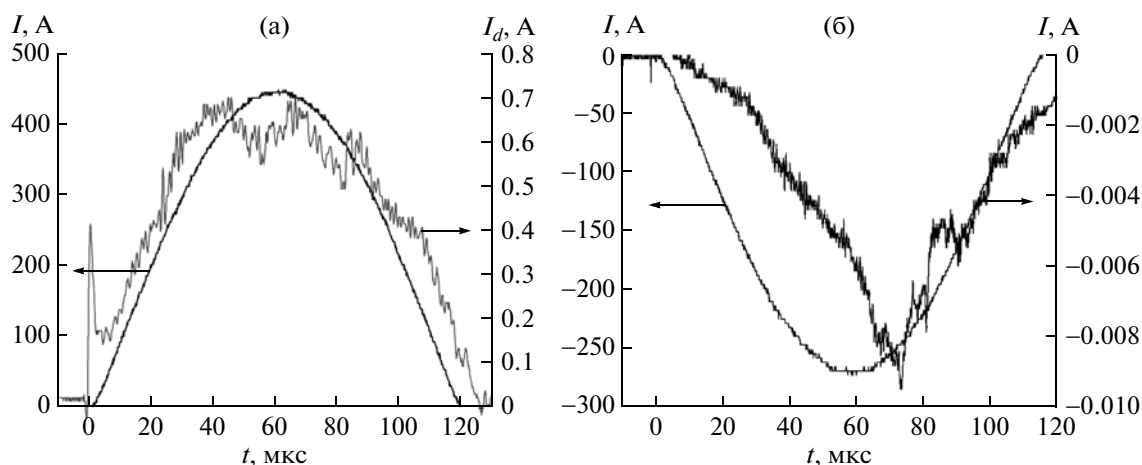


Рис. 3. Характерные осциллограммы тока импульсного сильноточного магнетронного разряда и тока фотодиода (а), а также тока импульсного сильноточного магнетронного разряда и ионного тока на зонд (б).

предварительно расплыться некоторое время в стационарном режиме на постоянном токе. В то же время, пульсирующая форма разряда может оказаться перспективной для повышения импульсной плотности мощности сильноточного импульсного магнетронного разряда.

На рис. 3б приведена осциллограмма импульса тока магнетрона и ионного тока на зонд. Зонд находился при потенциале -40 В на оси системы на расстоянии 125 мм от катода. Видно, что импульс максимума тока на зонд запаздывает относительно максимума тока разряда на 15 мкс, что связано с конечной скоростью разлета плазмы, генерируемой в катодном слое магнетронного разряда. Измерение времени задержки максимума ионного тока на зонд, расположенный на различных расстояниях от магнетрона, относительно максимума тока разряда позволяет определить аксиальную скорость разлета плазмы, которая в нашем случае составляет 1 см/мкс для всех токов разряда в пределах ошибки измерения. Радиальная составляющая скорости разлета плазмы определялась на расстоянии 125 мм от катода и составляла 0.25 см/мкс.

Из полученных зондовых измерений по формуле Бома [7] были рассчитаны электронная температура и концентрация плазмы. При определении этих параметров использовались следующие предположения: плазма аргоновая, однозарядная, электронная температура не зависит от расстояния до мишени и мощности разряда. Для расчета концентрации плазмы была выбрана ионная ветвь ВАХ. Расчет электронной температуры проводился на оси симметрии катода, на расстоянии 125 мм от него через каждые 10 мкс в течение импульса разряда. В начальной части импульса тока происходит резкий рост электронной температуры, на 20 мкс она достигает своего максимума 2.5 эВ. С дальнейшим ростом тока происходит

спад электронной температуры и в максимуме тока при 50 – 60 мкс, она имеет значение 1.8 – 2 эВ. В конце разряда, когда ток спадает до нуля, средняя энергия электронов составляет 1 эВ.

Из рассчитанной электронной температуры и осциллограмм ионного тока была определена плотность плазмы в разных точках пространства. Из рис. 4 видно, что область с наибольшей плотностью плазмы находится на оси магнетрона, а при удалении от магнетрона и оси системы концентрация ионов уменьшается. Отметим, что для токов разряда более 500 А плотность плазмы превышает 10^{13} см $^{-3}$ на расстояниях до 250 мм от мишени.

На рис. 5 представлены зависимости интенсивности спектральных линий 375 нм (Ti^+), 334 нм (Ti^{2+}), 374 нм (Ti^*) и 763 нм (Ar^+), отобранных по причине их высокой интенсивности и однозначности при идентификации [8], от пикового тока сильноточного импульсного магнетронного разряда при распылении титановой мишени в аргоне (давление 0.1 Па). Видно, что с увеличением разрядного тока содержание ионов Ti^+ и Ti^{2+} в плазме растет быстрее всех остальных составляющих. Это может свидетельствовать о том, что при большом разрядном токе происходит более интенсивная ионизация распыленных атомов мишени, а также о том, что заметную роль начинают играть процессы самораспыления материала катода (без участия ионов рабочего газа) и вытеснения рабочего газа из области распыления мишени в объем камеры за счет его нагрева [9].

Отметим, что приводимые здесь нами характеристики плазмы импульсного сильноточного магнетронного разряда и типичные параметры плазмы вакуумного дугового катодного разряда (ВДКР) достаточно близки между собой. Как известно, ВДКР достаточно эффективен для оса-

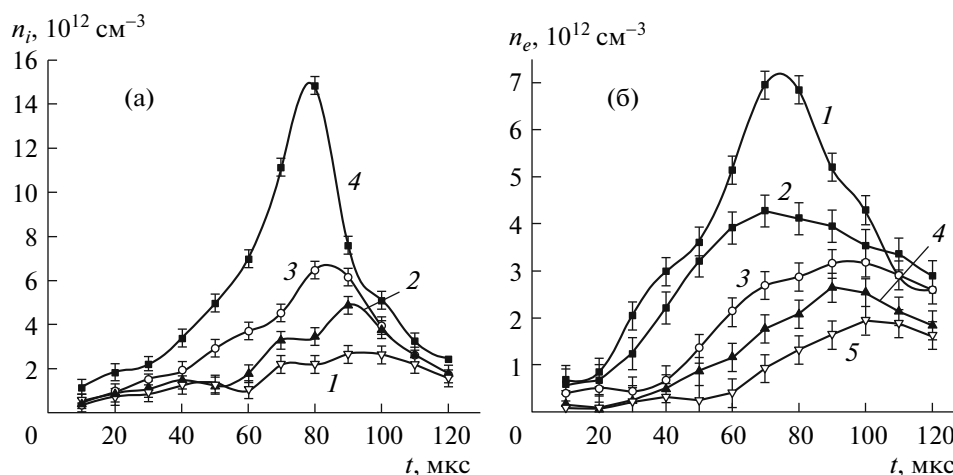


Рис. 4. Зависимость концентрации ионов от времени на оси симметрии магнетрона на разном расстоянии от катода при пиковом токе разряда 450 А: 1 – 325 мм, 2 – 275 мм, 3 – 225 мм, 4 – 175 мм (а); зависимость концентрации ионов от времени на расстоянии 125 мм от катода на разном расстоянии от оси симметрии магнетрона при пиковом токе разряда 290 А: 1 – 0 мм, 2 – 20 мм, 3 – 50 мм, 4 – 60 мм, 5 – 90 мм (б).

ждения различных функциональных покрытий, обладающих высоким качеством и адгезией, методом КИБ (конденсация, совмещенная с ионной бомбардировкой) [10], а также для реализации технологий плазменно-иммерсионной ионной имплантации (РПИ) [11]. Причина этой эффективности – высокие плотность и степень ионизации плазмы ВДКР, которые достигаются за счет ионизации именно паров материала катода, а не рабочего газа. Однако к недостаткам ВДКР относится присутствие капельной фазы в ионно-плазменном потоке на подложку, генерируемой при плавлении материала в катодном пят-

не. В исследованных нами режимах горения сильнооточного магнетронного разряда образования катодного пятна не происходит, поэтому плазма не содержит капельной фракции, а по своим характеристикам (плотности, степени ионизации материала катода) не уступает плазме ВДКР. Таким образом, импульсное сильнооточное магнетронное распыление потенциально может с успехом применяться для осаждения высококачественных покрытий, а также для трехмерной плазменно-иммерсионной электронной и ионной обработки поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследованы вольтамперные характеристики и параметры плазмы сильнооточного импульсного магнетронного разряда. Показано, что его основными преимуществами являются высокая плотность плазмы (до 10^{13} cm^{-3}) и степень ионизации распыляемого материала на больших расстояниях (до 250 мм) от катода при отсутствии капельной фракции в потоке. Это делает сильнооточный импульсный магнетронный разряд привлекательным для реализации трехмерной плазменно-иммерсионной обработки деталей сложной формы и большой площади, а также для осаждения высококачественных покрытий на их поверхность.

Работа была выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию в рамках ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (ГК № 1931 от 29 октября 2009 г.).

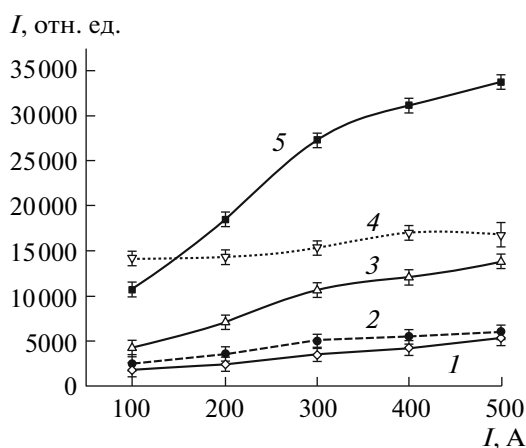


Рис. 5. Зависимость интенсивности спектральных линий компонентов плазмы от пикового тока разряда при импульсном сильнооточном магнетронном распылении титановой мишени в аргоне: 1 – Ar^{2+} (611 нм), 2 – Ti^* (374 нм), 3 – Ti^{2+} (334 нм), 4 – Ar^+ (763 нм), 5 – Ti^+ (375 нм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bradley J.W., Thompson S., Gonzalvo Y.A.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. V. 10. P. 490.
2. *Christou C., Barber Z.H.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 2000. V. 18. P. 2897.
3. *Alami J., Gudmundsson J.T., Bohlmark J. et al.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. V. 14. P. 525.
4. *Bohlmark J., Lattemann M., Gudmundsson J.T. et al.* // Thin Solid Films. 2006. V. 515. P. 1522.
5. *Sproul W.D.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 2003. V. 21. № 5. P. S222.
6. *Зайдель А.Н.* Таблицы спектральных линий. М.: Наука, 1969.
7. *Чен Ф.* Введение в физику плазмы. М.: Мир, 1987.
8. *Ehiasarian A.P.* // 47th Annual Technical Conf. Proc. Dallas, TX USA. 2004. V. II. P. 486.
9. *Alami J., Sarakinos K., Mark G., Wuttig M.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 154.
10. *Aksenov I.I., Strelnitskij V.E.* // Surf. Coat. Technol. 1991. V. 47. P. 98.
11. *Anders A.* // Surf. Coat. Technol. 1997. V. 93. P. 157.