

ГАЗОРАЗРЯДНОЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ ПЛАНАРНОГО МАГНЕТРОНА С ИОННЫМ ИСТОЧНИКОМ

© 2020 г. А. П. Семенов^{а,*}, И. А. Семенова^а,
Д. Б.-Д. Цыренов^а, Э. О. Николаев^а

^а Институт физического материаловедения СО РАН
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

*e-mail: alexandersemenov2018@mail.ru, semenov@ipms.bscnet.ru

Поступила в редакцию 24.03.2020 г.

После доработки 04.04.2020 г.

Принята к публикации 05.04.2020 г.

Рассмотрено газоразрядное устройство на основе планарного магнетрона и плазменного ионного источника. Продольная инжекция ионного пучка в магнетрон и распыление ионным пучком катода и центрального анода магнетрона способствует зажиганию аномального тлеющего разряда низкого давления $< 8 \cdot 10^{-2}$ Па в магнетроне. Установлено, что напряжение зажигания разряда падает с повышением энергии ионов и пороговым образом зависит от тока ионного пучка. Показана перспектива расширения функциональных возможностей планарных магнетронов при синтезе наноструктурированных композитных покрытий TiN–Cu.

DOI: 10.31857/S0032816220050213

ВВЕДЕНИЕ

Аномальный тлеющий разряд находит применение в магнетронных распылительных системах планарного типа, широко используемых для выращивания покрытий различного функционального назначения [1, 2]. Разряд зажигается в скрещенных электрическом и магнитном полях, причем магнитное поле удерживает плазму разряда вблизи катода-мишени, что способствует повышению плотности плазмы и, как следствие, росту ионного тока на катод. Разряду характерны [3, 4], во-первых, постоянная площадь на катоде, в которую поступает ток, во-вторых, возрастание тока разряда с повышением напряжения горения.

Обычно разряд устойчиво зажигается и стационарно горит в диапазоне давлений рабочего газа 0.2–6 Па [4]. Однако при этих давлениях не выполняется соотношение $l < \lambda$, где l – расстояние катод–подложка, λ – длина свободного пробега атомов, при этом не осуществляется бесстолкновительный перенос на подложку выбитых атомов, покидающих катод в результате распыления катода плазменными ионами, ускоренными в катодном слое. Длина свободного пробега распыленных атомов в газе при давлении 0.2–6 Па составляет 10^{-3} – 10^{-2} м. В этих условиях выполнение неравенства $l < \lambda$ вряд ли допустимо, учитывая неконтролируемое радиационное и термическое влияние плазмы разряда на покрытие и невозможность достижения его однородной толщины. При

этом столкновительный перенос распыленных атомов затрудняет получение покрытий с совершенной структурой и достижение требуемой точности воспроизведения ростовых режимов.

Условие $l < \lambda$ выполняется при давлениях < 0.1 Па, для которых $\lambda > 10^{-1}$ м. Однако при низких давлениях напряжение зажигания сильно зависит от давления [4] и разряд зажигается при относительно высоких напряжениях > 10 кВ. Поэтому при низких давлениях часто возникает ситуация, когда напряжение зажигания разряда превышает напряжение горения разряда. Длина свободного пробега электронов λ_e оказывается много больше расстояния d между катодом и анодом магнетрона.

Известно, что для снижения напряжения зажигания разряда можно инжектировать в область разряда электроны, что способствует ионизации газа и частичному распылению материала электродов [5]. Инжектировать в газ низкого давления электроны можно с потоком проникающей газоразрядной плазмы [6]. Однако размещение на периферии магнетрона электродов вспомогательного разряда затруднено конструктивно.

Альтернативой проникающей плазме может служить пучок ионов от дополнительного плазменного источника, инжектируемый вдоль оси анодного электрода магнетрона, причем роль ионного пучка может быть весьма существенной. Применение ионного пучка предполагает развитие процессов ионизации газа быстрыми ионами,

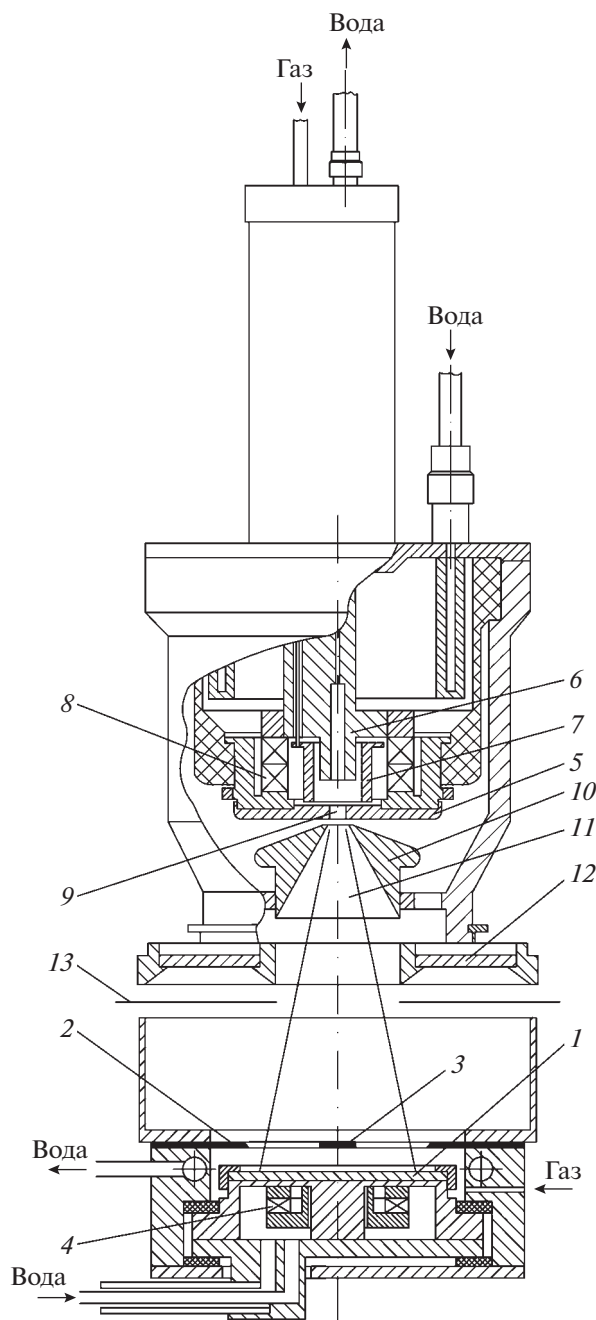


Рис. 1. Газоразрядное устройство. 1, 5, 6 – катоды; 2, 3, 7 – аноды; 4, 8 – кольцевые магниты; 9 – эмиссионный канал; 10 – ускоряющий электрод; 11 – ионный пучок; 12 – подложки; 13 – створчатая заслонка.

приводящей к появлению первичных электронов, ионно-электронной эмиссии и сопутствующих электронной эмиссии процессов ионного физического распыления катода магнетрона, пеннинговской ионизации газа, которая приводит к снижению напряжения зажигания разряда.

В этих условиях достигается совмещение процессов распыления ионным пучком [7] и магнетронного распыления [1, 2, 4, 8]. При этом, наряду с распылением катода, становится возможным распыление ионным пучком анода магнетрона, обуславливающее новые, не свойственные обычным конструкциям планарных магнетронов функциональные возможности. Управление параметрами ионного пучка и мощностью магнетронного разряда упрощает регулирование долевого соотношения распыляемых компонентов и выращивание композитных покрытий. Такой подход впервые был рассмотрен в [9] и получил развитие в [10].

Принятый подход зажигания в магнетроне аномального тлеющего разряда низкого давления < 0.10 Па в условиях бомбардировки катода и анода магнетрона ионным пучком расширяет функциональные возможности магнетрона и заслуживает самостоятельного обсуждения. Тип конкретного газоразрядного устройства, принцип действия и эксплуатационные характеристики рассматриваются в данной работе.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На основе принципа инъекции ионного пучка в планарный магнетрон разработано газоразрядное устройство. Конструкция экспериментального газоразрядного устройства образована планарным магнетроном и ионным источником и схематически показана на рис. 1.

Магнетрон [4] содержит медный катод 1 диаметром 50 мм, кольцевой анод 2 с апертурой 45 мм и центральный анод 3 диаметром 12 мм, установленные соответственно по периметру и на оси устройства. Аноды выполнены из нержавеющей стали. Расстояние d между катодом и анодами 5 мм. Центральный анод 3 выполняет функцию мишени. Кольцевой магнит 4 из самарий-кобальтового сплава создает в апертуре анода 2 и вблизи поверхности катода 1 радиальное магнитное поле с индукцией 0.03 Тл.

На периферии магнетрона, вдоль оси анода 2 на расстоянии 0.1 м устанавливается разрядная камера плазменного источника ионов на основе отражательного разряда с полым катодом [9, 11, 12]. Разрядная камера образована катодами 5 (эмиссионным) и 6 (полым) и цилиндрическим анодом 7. Катоды являются полюсными наконечниками кольцевых магнитов 8 из самарий-кобальтового сплава. Индукция магнитного поля на оси анода 7 составляет 0.1 Тл. Плазмообразующий газ аргон натекает через отверстие на боковой стенке анода 2 [4] магнетрона и отдельно в катодную полость 6 [13] разрядной камеры ионного источника.

Разряд зажигается напряжением, подаваемым между электрически соединенными катодами 5 и 6 и анодом 7. Ионы из прикатодной плазмы раз-

ряда извлекаются через эмиссионный канал 9 и ускоряются электродом 10. Пучок ускоренных ионов 11 падает на центральный анод 3 и, проникая в апертуру кольцевого анода 2, падает на катод 1. Диаметр ионного пучка в плоскости катода 30 мм.

При инъекции ускоренных ионов, разряд в магнетроне инициируется подачей напряжения до 3 кВ от высоковольтного выпрямителя между электрически соединенными анодами 2 и 3 (положительный потенциал) и катодом 1 (отрицательный потенциал). Инжектируемые продольно ионы инициируют эмиссионные процессы – распыление анода 3 и катода 1 и ионно-электронную эмиссию, выполняя функцию инициирования зажигания аномального тлеющего разряда низкого давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основными эксплуатационными параметрами магнетрона являются напряжение на электродах, ток разряда, плотность ионного тока на мишени, мощность разряда, радиальная составляющая индукции магнитного поля и давление газа [2].

Рассмотрим особенности зажигания разряда низкого давления в магнетроне (катод 1 выполнен из меди) при инъекции ионного пучка в магнетрон (рис. 2). Напряжение зажигания (кривая 1) резко снижается от 1.5 до 0.67 кВ в области ускоряющих напряжений пучка 3.5–6 кВ. Давление аргона $8 \cdot 10^{-2}$ Па, ток разряда 50 мА, ток пучка ионов $0.5 \leq I_i \leq 0.7$ мА. Рост ускоряющего напряжения приводит к перемещению эмиссионной поверхности плазмы. Снижаются потери ионов на стенке эмиссионного канала 9 (рис. 1), изменяется радиус и кривизна поверхности эмитирующей плазмы и наблюдается слабое возрастание тока ионного пучка (рис. 2, кривая 1) с ростом ускоряющего напряжения U_i . Тенденция к насыщению наблюдается при $U_i > 6$ кВ и $I_i > 0.6$ мА. При ускоряющем напряжении $U_i < 3.5$ кВ разряд при бомбардировке ионами катода не зажигался во всем диапазоне напряжений до 1.5 кВ, подаваемых на электроды магнетрона, при этом ток пучка ионов $I_i < 0.5$ мА.

На рис. 2 кривой 2 представлена зависимость напряжения зажигания от тока ионного пучка при ускоряющем напряжении 8 кВ с ростом тока разряда в ионном источнике. Поскольку ток ионного пучка однозначно зависит от тока разряда и при постоянном ускоряющем напряжении монотонно увеличивается до 1.75 мА в диапазоне роста тока разряда до 100 мА, наблюдается немонотонное изменение напряжения зажигания с увеличением тока ионного пучка.

С повышением тока ионного пучка от 0.15 до 1.2 мА напряжение зажигания уменьшается от 0.9

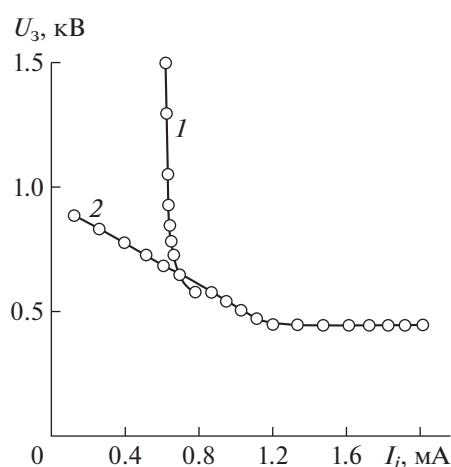


Рис. 2. Зависимости напряжения зажигания U_z от тока ионного пучка I_i : 1 – ток разряда в ионном источнике 50 мА, ускоряющее напряжение U_i растет от 0 до 10 кВ, давление аргона $8 \cdot 10^{-2}$ Па; 2 – ускоряющее ионы напряжение 8 кВ, ток разряда в ионном источнике растет от 0 до 100 мА, давление аргона $8 \cdot 10^{-2}$ Па.

до 0.42 кВ с последующей его стабилизацией в области повышения тока пучка ионов от 1.2 до 1.75 мА. Характер зависимости напряжения зажигания от тока ионного пучка (кривая 2 на рис. 2) свидетельствует о существовании нижнего предельного значения напряжения зажигания, в нашем случае ~0.42 кВ, меньше которого разряд не зажигается. Предельное напряжение зажигания в области малых ионных токов $I_i < 0.15$ мА ограничивалось значением 0.9 кВ. Это обусловлено тем, что устойчивый разряд с полым катодом [8] при малых токах затруднен. Инициированный ускоренным ионным пучком разряд в магнетроне устойчиво горел и после гашения разряда в разрядной камере ионного источника.

Бомбардировка ускоренными ионами катода магнетрона влияет на пробой разрядного промежутка магнетрона. Пробойное напряжение, при котором зажигается аномальный тлеющий разряд, сильно зависит от энергии ионов E_i , падающих на катод магнетрона (для однозарядных ионов $E_i = eU_i$, где e – заряд электрона) – кривая 1, и тока ионного пучка (кривая 2). Чем больше скорость ионов и ионный ток, тем ниже напряжение зажигания. Очевидно, что в результате взаимодействия с газом и катодом магнетрона ионы пучка могут затрачивать свою энергию на ионизацию газа. Кроме того, в ионизации могут участвовать вторичные электроны и распыленные атомы, выбитые с катода магнетрона ионным пучком.

Инициирование процесса электрического пробоя начинается с появления затравочных γ -электронов [3] в результате ионно-электронной эмиссии. Вероятен также процесс пеннинговской

ионизации. Так, при распылении медного катода ускоренными ионами атомы меди (потенциал ионизации меди $U_i^{\text{Cu}} = 7.724 \text{ В}$ [14]), соударяясь с атомами аргона, возбужденными ионным пучком на метастабильный уровень $4s^3P_1$ (потенциал возбуждения аргона $U_a^{\text{Ar}} = 11.5 \text{ В}$ [15]), могут быть ионизованы, поскольку выполняется условие $U_i^{\text{Cu}} < U_a^{\text{Ar}}$. Поэтому потенциал зажигания разряда будет определяться не ионизацией атомов аргона (потенциал ионизации аргона $U_i^{\text{Ar}} = 15.759 \text{ В}$), а возбуждением их на метастабильный уровень. При этом предполагается, что метастабильные атомы аргона в подавляющем большинстве “разряжаются”, сталкиваясь с атомами меди.

Проанализируем в какой мере и какие электроны в рассмотренных условиях могут вносить основной вклад в электрический пробой разрядного промежутка. Число электронов N_e , испускаемых медным катодом, определяется соотношением: $N_e \sim \gamma I_i / e$, где γ — коэффициент ионно-электронной эмиссии. В области энергий 3.5–10 кэВ при $\gamma \sim 0.35\text{--}0.58$ [16] $N_e \sim 10^{15}$.

При соударении быстрых ионов пучка с атомами газа может иметь место ударная ионизация. Доля ионов N/N_i , которые пройдут путь $L = 0.1 \text{ м}$ от ионного источника до катода магнетрона в газе, не испытав при этом ни одного столкновения, определяется выражением $N/N_i \sim \exp(-L/\lambda_i)$, где λ_i — длина свободного пробега ионов.

Хотя в рассматриваемых условиях доля ионов, не претерпевших столкновений мала, $N/N_i < 10^{-2}$, из всех $(N_i - N)$ столкновений к ионизации приведет только часть из них: $(N_i - N)\omega_i$, где ω_i — вероятность ионизации. Расчет показывает, что при скоростях ионов $> 10^5 \text{ м/с}$ вероятность ω_i низка и сечение возбуждения атомов аргона мало.

По-видимому, доминирующим фактором, порождающим первичные электроны, является кинетическая ионно-электронная эмиссия, возбуждаемая с катода магнетрона ускоренными ионами. При этом появление затравочных электронов является необходимым, но недостаточным условием пробоя при пониженном давлении $\lambda_e \gg d$. При давлении $< 0.10 \text{ Па}$ выполняется соотношение $pd < 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}$, где p — давление, электроны пролетают короткий пробивной промежуток магнетрона без столкновений и не способны “спровоцировать” [15] возникновение электронной лавины.

Поэтому особенностью электрического пробоя при пониженном давлении является то, что пробой может развиваться только благодаря выделению электродами паров металлов в пробивной промежуток [17] в присутствии потока электронов. Очевидно, что по мере распыления ионным пучком медного катода пробивной промежуток

заполняется парами меди. Это происходит более интенсивно с увеличением энергии и тока распыляющих ионов [18], что способствует газовому усилению. Давление паров меди растет с увеличением тока ионов и их энергии, что обуславливает низкие напряжения зажигания разряда (рис. 2).

Испытание планарного магнетрона с ионным источником показало высокую надежность разработанного газоразрядного устройства и стабильность параметров.

Наряду с расширенными возможностями иницирования аномального тлеющего разряда низкого давления новый подход позволяет упростить управление элементарным и химическим составом наращиваемых реактивным магнетронным распылением покрытий на подложках 12 (рис. 1), в частности сверхтвердых композитных покрытий TiN—Cu [19–21]. Створчатая заслонка 13 перекрывает подложки 12 в период вывода газоразрядного устройства в режим стационарного горения разрядов.

Применяя катод 1 магнетрона из Ti, центральный анод 3 из Cu и плазмообразующую смесь газов Ar и N₂ (в плазме магнетронного разряда молекулярный азот диссоциирует на химически активный атомарный N₂ ↔ 2N), можно направленно вести синтез TiN в парах Cu [20]. Тонкое регулирование долевого наполнения наращиваемого покрытия примесью Cu, вносимой распылением дополнительной мишени (центрального анода) ионным пучком, позволяет направленно воздействовать на внутреннее строение и фазовый состав TiN—Cu-покрытий и выращивать композитные нитридные покрытия состава TiN—Cu с нанокристаллической структурой [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показана возможность снижения давления зажигания аномального тлеющего разряда низкого давления воздействием на катод планарного магнетрона ускоренными ионами, инжектируемыми вдоль оси анодного электрода. Доминирующими процессами зажигания аномального тлеющего разряда низкого давления, $p < 8 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$, в магнетроне являются ионно-электронная эмиссия и распыление катода магнетрона ионным пучком. Продольная инжекция ионного пучка в магнетрон, сочетающая достоинства нового принципа построения газоразрядной техники выращивания покрытий в вакууме путем распыления мишеней плазменными ионами аномального тлеющего разряда и ионным пучком, существенно расширяет функциональные возможности магнетрона и позволяет принципиально улучшить его физико-технические характеристики.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 20-08-00207_а и государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, тема № 0336-2019-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982.
2. Белянин А.Ф., Пащенко П.В., Семенов А.П. // ПТЭ. 1991. № 3. С. 220.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
4. Семенов А.П., Батуев Б.-Ш.Ч. // ПТЭ. 1991. № 5. С. 192.
5. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
6. Lee K.J., Musset A. Patent 4,716,340 USA // Dec. 29. 1987. 315/111.41 (H 01 j 7/24).
7. Семенов А.П. Техника распыления ионными пучками. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 1996.
8. Семенов А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 1999.
9. Семенов А.П. // Сибирский физико-технический журнал. 1993. Вып. 6. С. 68.
10. Семенов А.П., Семенова И.А. // ПТЭ. 2009. № 1. С. 110.
11. Семенов А.П. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 2. С. 131.
12. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / Под ред. П.М. Щанина. Екатеринбург: УИФ Наука, 1993.
13. Семенов А.П. // ПТЭ. 1993. № 5. С. 128.
14. Фелдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок. М.: Мир, 1989.
15. Левитский С.М. Сборник задач и расчетов по физической электронике. Киев: Изд-во КГУ, 1964.
16. Брусиловский Б.А. Кинетическая ионно-электронная эмиссия. М.: Энергоатомиздат, 1990.
17. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984.
18. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твердых тел / Под ред. Р. Бериша. М.: Мир, 1984.
19. Семенов А.П., Цыренов Д.Б.-Д., Семенова И.А. Патент на изобретение № 2649355 RU // Оpubл. 02.04. 2018. Бюл. № 10.
20. Семенов А.П., Цыренов Д.Б.-Д., Семенова И.А. // ПТЭ. 2017. № 6. С. 119.
<https://doi.org/10.7868/S0032816217060106>
21. Ivanov Yu.F., Koval N.N., Krysina O.V., Baumbach T., Doyle S., Slobodsky T., Timchenko N.A., Galimov R.M., Shmakov A.N. // Surface and Coatings Technology. 2012. V. 207. P. 430.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.07.037>