

ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.382

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОРЦЕВОГО ХОЛЛОВСКОГО УСКОРИТЕЛЯ И
МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

И.В. СВАДКОВСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 8 июня 2007*

Проведен анализ особенностей разрядов торцевого холловского ускорителя (ТХУ) и магнетронной распылительной системы (МРС), на основании чего установлены уравнения балансов токов для двухразрядной системы ТХУ-МРС. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены условия взаимной стимуляции разрядов МРС и ТХУ. Приведен диапазон необходимой величины разрядного тока МРС для поддержания баланса заряженных частиц в безнакальной модификации разряда ТХУ и генерируемом им ионном пучке для реализации процесса ионного ассистирования магнетронному распылению, а также варианта ТХУ и источника электронов на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях в квазизамкнутой области для процессов ионного ассистирования при испарении.

Ключевые слова: выращивание пленок, магнетронное распыление, холловский ускоритель.

Введение

В последние годы широкое распространение получили методы нанесения слоев, в которых ионная бомбардировка выращиваемой пленочной фазы оказывает значительное влияние на электрофизические, оптические и трибологические характеристики наносимых покрытий. Особенно существенным фактором ионная бомбардировка является при различных конфигурациях ионно-лучевых методов — ионного ассистирования в процессе испарения (*ion beam assisted deposition* — IBAD), ионной бомбардировки при распылении, прямого осаждения из ионного пучка, и ионном ассистировании магнетронному распылению (*ion beam assisted magnetron* — IBAM). Для практического применения источники ионов должны создавать максимальный поток ионов заданной энергии при минимальном расходе рабочего газа [1–3]. Величина ионного тока должна быть достаточной для поддержания требуемого соотношения ион/атом для процессов IBAD и IBAM.

Для процессов низкоэнергетичного ионного ассистирования наибольшее распространение получили ионные источники типа торцевой холловский ускоритель (ТХУ) — *End-Hall ion source* [4], обеспечивающие генерацию сильноточных (до нескольких ампер) потоков ионов с энергией около 100 эВ при относительно низком давлении рабочего газа (порядка 10^{-2} Па). В ТХУ магнитное поле имеет в целом осевую направленность, а разрядная область устройства ограничена в радиальном направлении анодом. При этом направление дрейфа электронов в зону ионизации практически совпадает с вектором магнитного поля, а ионный поток имеет широкий профиль пространственного распределения [5].

Для функционирования ТХУ используются сильноточные источники электронов для поддержания процессов ионизации и компенсации объемного заряда: накаливаемые термокатоды, полые катоды, плазменно-мостовые нейтрализаторы [5]. Применение источников электронов с накаливаемыми катодами ограничено в реактивных процессах ассистирования. К недостаткам полых катодов-нейтрализаторов с эмиттером из гексаборида лантана можно отнести сравнительно высокие расходы газа и определенные трудности при поджиге разряда. Одним из перспективных направлений представляется использование нейтрализаторов на основе разряда с холловским током, которые по сути являются одной из модификаций магнетронной распылительной системы (МРС) и при определенных условиях могут являться эффективными источниками электронов для функционирования ТХУ [6, 7]. С другой стороны, в процессах ИВАМ также представляется перспективным использование разряда МРС в качестве источника электронов для ТХУ.

Целью настоящей работы является анализ основных потоков заряженных частиц в разряде торцевого холловского ускорителя и магнетронной распылительной системы и на основании этого определение условия эффективного функционирования двухразрядной системы ТХУ-МРС без дополнительных источников электронов.

Анализ функционирования торцевого холловского ускорителя

Теоретические и экспериментальные исследования разряда в ТХУ [4, 5, 8] позволили установить, что для поддержания процесса генерации и ускорения ионов необходимо обеспечить поток электронов из источника электронов (I_{ee}), часть которого (I_{eed}) направлена в разрядную зону (SD) навстречу ионному потоку (I_{sib}), а часть (I_{eeb}) необходима для компенсации создаваемого ионами пространственного и поверхностного зарядов (рис. 1). Последнее имеет принципиальное значение, так как увеличивает концентрации активных компонент плазмы, а это наряду с низкими энергиями ионов обеспечивает благоприятные условия для гетерогенных реакций на поверхности подложки. Механизм существования разряда в ТХУ связан с различной подвижностью электронов вдоль и поперек силовых линий магнитного поля. При этом электроны, движущиеся по направлению к аноду, вследствие замагниченности имеют осевую и азимутальную составляющие движения, что увеличивает длину траектории и вероятность электрон-атомного взаимодействия в разрядной зоне. Установлено, что в соответствии с конфигурацией электрического поля, образующиеся в результате ионы имеют два основных направления ухода из разряда: основная часть ускоряется в электрическом поле по направлению к торцу ионного источника и образует ионный поток (I_{sib}); меньшая часть в соответствии с линиями электрического поля ускоряется в направлении осевого полюсного наконечника ионного источника, находящегося под нулевым потенциалом (I_{sin}) [5]. В результате ион-электронной эмиссии из полюсного наконечника будет наблюдаться определенный электронный ток, который также возможно учитывать в дальнейшем (I_{sen}). И наконец все электроны, пришедшие в разрядную зону, а также электроны, возникшие в результате ионизации уходят на анод и образуют разрядный ток (I_{sea}). Представляется, что нет необходимости учитывать уход электронов на внешние полюсные наконечники ионного источника, ввиду того что они под потенциалом эмиттера электронов и находятся вне зоны разряда. Поэтому при перемещении к аноду электроны, как правило, отражаются от стенок, несмотря на высокую проводимость плазмы вдоль магнитных силовых линий.

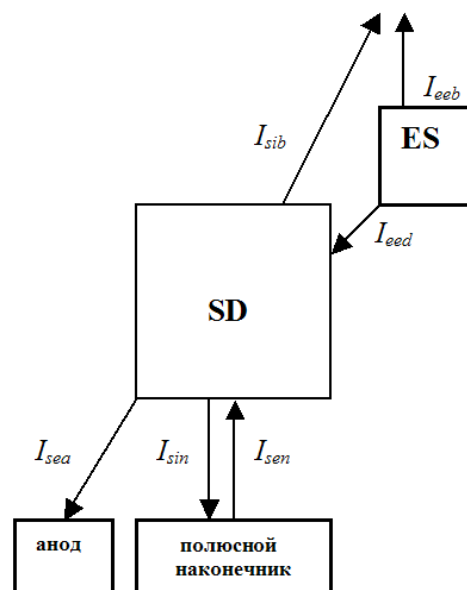


Рис. 1. Схема потоков заряженных частиц торцевого холловского ускорителя

Таким образом, уравнение тока для разряда ионного источника типа ТХУ можно выразить как

$$I_{sib} + I_{eed} + I_{sin} + I_{sen} = I_{sea}, \quad (1)$$

при этом

$$I_{sen} = \gamma_n I_{sin}, \quad (2)$$

где γ_n — коэффициент ион-электронной эмиссии материала осевого полюсного наконечника.

Для устойчивой генерации ионного пучка в ТХУ необходимо обеспечить, во-первых, компенсацию создаваемого ионами пространственного заряда, а во-вторых, условие нейтрализации поверхностного заряда на объекте обработки. Если для выполнения первого условия необходимо обеспечить равенство концентрации ионов и электронов, а, учитывая разницу их энергий, может быть достаточно относительно небольшой величины потока электронов из источника, т.е. $I_{sib} > I_{eeb}$, то реализация второго условия зависит от состояния и величины объекта обработки (подложки), а также от наносимого тонкопленочного покрытия. Если проводится обработка металлических подложек находящейся под потенциалом вакуумной камеры в процессах ионной очистки, либо IBAD при нанесении проводящих слоев, то нейтрализация поверхностного заряда не представляется проблемным фактором. В случае использования диэлектрических подложек или наносимых пленок при реактивных процессах, что на практике применяется гораздо чаще, полная нейтрализация заряда на поверхности подложек возможна при выполнении условия $I_{sib} = I_{eeb}$.

Рассмотрим два предельных случая необходимой величины электронного тока из источника электронов: при обработке диэлектриков и незначительной величине тока на осевой полюсный наконечник ($I_{sin} \rightarrow 0$); и при обработке металлов ($I_{eeb} \rightarrow 0$) и значительной величине I_{sin} . Из приведенных выше заключений получаем:

$$I_{ee \max} = I_{sea}, \quad (3)$$

$$I_{ee \min} = I_{sea} - I_{sib} - I_{sin}(\gamma_n + 1). \quad (4)$$

Таким образом, в результате анализа процессов в ТХУ установлен диапазон необходимой эмиссии электронов для поддержания баланса заряженных частиц в разряде и ионном пучке.

Анализ функционирования магнетронной распылительной системы

В общем случае для обеспечения поддержания самостоятельного разряда магнетронной распылительной системы (МРС) необходимо, чтобы длина свободного пробега электронов была менее длины траектории электрона от катода к аноду (d). В случае отсутствия анода характерным параметром является длина траектории от катода до выхода из разрядной зоны магнетрона (МД) (рис. 2). В стационарном состоянии ток электронов на выходе из разрядной зоны определяется как:

$$I_{meo} = I_{met} \exp(\alpha d), \quad (5)$$

где I_{met} — электронный ток из мишени; α — ионизационный коэффициент.

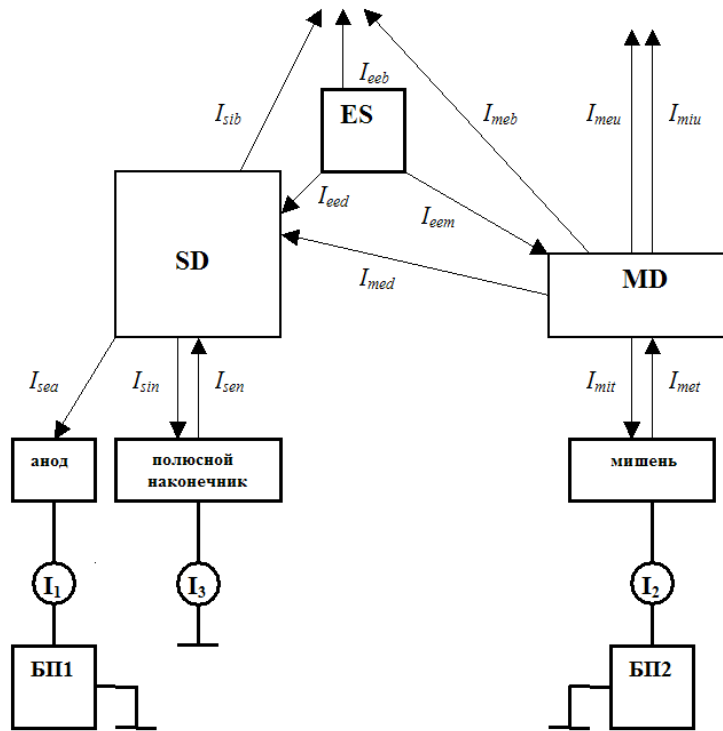


Рис. 2. Схема потоков заряженных частиц при совместном функционировании торцевого холловского ускорителя и магнетронной распылительной системы

Один вышедший из катода электрон рождает $\exp(\alpha d) - 1$ положительных ионов. Основная часть ионов ускоряется по направлению к мишени, при этом каждый ион, приходящий на мишень, вырывает γ_m электронов за счет ионно-электронной эмиссии, т.е. $I_{met} = \gamma_m I_{mit}$ [9]. Меньшая часть ионов (I_{mio}) за счет амбиполярной диффузии вытягивается из области разряда и ускоряется в направлении подложки для компенсации возникающего объемного отрицательного заряда. Величина ионного тока по направлению к подложке зависит от I_{mio} и несбалансированности МРС, что подробно рассмотрено в работах [10–12]. Таким образом, уравнение тока для разряда МРС можно выразить в виде

$$I_{mit} + I_{met} + I_{mio} = I_{meo}, \quad (6)$$

при этом

$$I_{met} = \gamma_m I_{mit}. \quad (7)$$

Анализ совместного функционирования торцевого холловского ускорителя и магнетронной распылительной системы

Представляется перспективным развитие метода ИВАМ, когда процесс распыления сопровождается ионной бомбардировкой подложки из независимого ионного источника. При этом разряд в скрещенных $E \times H$ полях, используемый в МРС, может являться источником электронов для ТХУ. Необходимым условием для реализации подобной конфигурации процесса является понижение рабочего давления МРС до уровня 0,02–0,09 Па, что может быть обеспечено за счет увеличения напряженности магнитного поля, оптимизации конфигурации силовых линий над поверхностью мишени, а также за счет использования магнитной системы с двумя источниками поля [9]. Магнитное поле, существенно увеличивая путь электронов от катода до выхода из разрядной зоны магнетрона, повышает число ионизирующих столкновений. В результате каждого столкновения электрон отдаляется от мишени на дистанцию порядка ларморовского радиуса. Для возникновения разряда низкого давления в МРС необходимо наличие источника первичных электронов для несамостоятельного разряда

или обеспечение условий для поддержания самостоятельного разряда, описываемое уравнением [5]

$$\gamma_m(\exp(\alpha d)-1)=1. \quad (8)$$

Источником первичных электронов для возникновения разряда в МРС может выступать источник электронов ТХУ. В этом случае в момент зажигания разряда МРС эмиссия электронов раскладывается (рис. 2):

$$I_{ee}=I_{eed}+I_{eeb}+I_{eem}. \quad (9)$$

Следует предположить, что первоначальный электронный ток из эмиттера электронов в разряд МРС (I_{eem}) крайне незначителен и служит лишь для зажигания разряда при некотором понижении предельного рабочего давления магнетрона. При этом, в процессе функционирования часть электронного тока при выходе из разряда МРС (I_{med}) направлена в разрядную зону (SD) навстречу ионному потоку ТХУ, а часть (I_{meb}) служит для компенсации создаваемого ионами пространственного заряда. Таким образом, уравнения балансов токов для общего случая двухразрядной системы ТХУ-МРС можно выразить как

$$I_{sib}+I_{eed}+I_{sin}+I_{sen}+I_{med}=I_{sea}, \quad (10)$$

$$I_{mit}+I_{mer}+I_{miu}=I_{meu}+I_{meb}+I_{med}, \quad (11)$$

где I_{meu} — электронный ток из разряда магнетрона, не участвующий в компенсации разряда ТХУ, а I_{miu} — сопутствующий ему ионный ток.

При выключенном источнике электронов и взаимно "сбалансированных" режимах работы ТХУ и МРС уравнения баланса приобретают вид

$$I_{sib}+I_{sin}(\gamma_n+1)+I_{med}=I_{sea}, \quad (12)$$

$$I_{mit}(\gamma_m+1)=I_{med}+I_{meb}. \quad (13)$$

Для предельного случая необходимой величины электронного тока из разряда МРС — при обработке диэлектрических подложек либо нанесении пленок диэлектриков и незначительной величине тока на осевой полюсный наконечник ТХУ:

$$I_{mit \max}(\gamma_m+1)=I_{sea},$$

или

$$I_{2 \max}=I_1. \quad (14)$$

Минимально необходимый разрядный ток МРС для компенсации ТХУ при обработке металлов и значительной величине I_{sin}

$$I_{mit \min}(\gamma_m+1)=I_{sea}-I_{sib}-I_{sin}(\gamma_n+1),$$

или

$$I_{2 \min}=I_1-I_3-I_{sib}. \quad (15)$$

Таким образом, в результате теоретического анализа процессов при совместном функционировании ТХУ и МРС установлен диапазон необходимой величины разрядного тока МРС для поддержания баланса заряженных частиц в разряде ТХУ и ионном пучке.

Экспериментальные результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментальных исследований трех конструкций ТХУ установлено, что ионный ток I_{sib} в общем случае пропорционален разрядному току и составляет величину (0,15–0,3) I_{sea} . Величина I_{sib} зависит также от конструктивных особенностей устройств, напряженности магнитного поля в разрядной зоне и расхода рабочего газа. При этом наблюдается некоторое увеличение отношения I_{sib}/I_{sea} с ростом B , что связано с возрастанием времени пребывания электронов в разрядном слое и увеличением вероятности электрон-

атомного взаимодействия. В первом приближении предельная величина ионного потока ограничивается расходом рабочего газа, подаваемого в источник при условии однозарядности ионов:

$$I_{sib}=0,0167eqQN_{ls} \quad (16)$$

где I_{sib} — генерируемый ионный ток, А; q — коэффициент газовой экономичности источника; $q=I_{sib}/I_q$; I_q — эквивалентный ток нейтралов через разрядный слой; Q — расход газа, см³/мин; $N_{ls}=2,687 \cdot 10^{19}$ см⁻³ — число Лошмидта (количество молекул идеального газа в см³ объема при давлении 10⁵ Па).

Сопоставление предельных режимов ТХУ в зависимости от расхода рабочего газа (Ar) позволяет сделать вывод о высоком (около 1) коэффициенте газовой экономичности в диапазоне давлений 0,01–0,06 Па. Экспериментально установлено, что суммарный ток $I_3=I_{sin}(\gamma_n+1)$ на осевой полюсный наконечник зависит от параметров разряда, расстояния между анодом и полюсным наконечником и составляет величину от 0,3 до 0,85 от I_{sib} , причем в общем случае при увеличении ионного тока на подложку наблюдается тенденция к уменьшению отношения I_3/I_{sib} [5].

Экспериментальные исследования совместного функционирования ТХУ и разряда магнетронного типа проводились для двух вариантов процессов: ТХУ и МРС для реализации процесса ИВАМ [12], а также ТХУ и источника электронов на основе разряда в скрещенных Е×Н полях в квазизамкнутой области для процессов ИВАД [6].

В частности установлено, что в определенных режимах МРС является эффективным источником электронов для поддержания разряда ТХУ, что дает возможность отказаться от других эмиттеров электронов. Полная компенсация разряда ТХУ в этом случае достигается при $I_2 \geq 0,75 I_1$ и давлении в рабочей камере более 0,085 Па. С другой стороны, при включенном ионном источнике разряд МРС с дополнительным соленоидом возникал при давлении 0,022 Па за счет электронной эмиссии с накаливаемого катода ТХУ (минимальное давление зажигания самостоятельного разряда составляло 0,03 Па). Таким образом, происходит взаимная стимуляция МРС и ТХУ при функционировании в двухразрядной системе. В определенных случаях наблюдалось влияние полярности включения магнитных систем разрядных устройств на эффективность стимуляции (эффект замкнутой области) [12]. Реализация безнакального режима работы ТХУ существенно расширяет возможности использования данного метода ИВАМ.

Одним из перспективных вариантов источников электронов для ТХУ представляется конструкция на основе разряда в скрещенных Е×Н полях в квазизамкнутой области [7]. Разрядная камера нейтрализатора представляет собой водоохлаждаемый трубчатый катод, в который подается рабочий газ (Ar) и формируется магнитное поле осевой направленности. Одна из боковых заземленных стенок камеры выполняет функции анода. Небольшая апертура выходного отверстия на аноде обеспечивает эффективную ионизацию при минимальном уровне расхода газа и загрязнении растущей пленки. Исследование двухразрядной системы нейтрализатора и ТХУ продемонстрировало, что необходимая величина электронной эмиссии примерно составляет величину, равную анодному току ионного источника ($I_2 \approx I_1$) при нулевом токе на анод нейтрализатора. При этом использование устройства в качестве источника электронов для ТХУ обеспечивалась при давлении более 0,05 Па. Ресурс работы нейтрализатора составил не менее 100 ч.

Таким образом, на основании проведенных экспериментов установлена удовлетворительная адекватность полученных результатов соотношениям (3), (4), (14), (15) для: ТХУ с различной конфигурацией разрядной зоны; ТХУ и МРС — как с магнитной системой с одним источником поля, так и с дополнительным соленоидом; ТХУ и источника электронов на основе разряда в скрещенных Е×Н полях — как с магнитной системой на соленоиде, так и на постоянных магнитах [5–9, 12]. Вопросы влияния давления и в определенных случаях величины магнитного поля в ТХУ и МРС на эффективность функционирования двухразрядной системы требуют дополнительных теоретических и экспериментальных исследований. Представляет также интерес в теоретическом и

практическом аспекте исследования потоков заряженных частиц в двухразрядной системе ТХУ несбалансированная МРС при $I_2 > I_1$.

Заключение

В результате проведенного анализа потоков заряженных частиц в разрядах ТХУ и МРС определены условия эффективного функционирования двухразрядной системы ТХУ-МРС в режимах взаимной стимуляции для процессов ИВАД и ИВАМ. Теоретически определены предельные случаи необходимой величины электронного тока из разряда МРС для поддержания разряда ТХУ в безнакальном режиме: при обработке диэлектрических подложек либо нанесении пленок диэлектриков и незначительной величине тока на осевой полюсный наконечник ТХУ; а также при обработке металлов и значительной величине ухода ионного тока на корпус ионного источника. В целом получено экспериментальное подтверждение аналитически установленного баланса заряженных частиц в безнакальной модификации разряда ТХУ и генерируемом им ионном пучке для реализации процесса ионного ассистирования магнетронному распылению, а также варианта ТХУ и источника электронов на основе разряда в скрещенных Е×Н полях в квазизамкнутой области для процессов ионного ассистирования при испарении.

ANALYTICAL TREATMENT OF JOINT FUNCTIONING OF END-HALL ION SOURCE AND MAGNETRON SPUTTERING SYSTEM

I.V. SVADKOVSKI

Abstract

The discharge features of the End-Hall ion source and magnetron sputtering systems have been investigated, on the bases of which the current balance equations for a dual-discharge system composed of the End-Hall ion source and the magnetron sputtering system were derived. The conditions of mutual stimulation of the End-Hall ion source and magnetron sputtering system discharges were theoretically estimated and experimentally proved. The range of values for the magnetron sputtering system discharge current essential to support the charged particles balance was obtained. The found range of values was employed to implement two processes, namely in the non-filament modification discharge End-Hall ion source for the ion beam assisted magnetron, and also for the End-Hall ion source and the electron source based on the discharge in the crossed E×H fields.

Литература

1. *Martin P.J., Netterfield R.P.* / Progress in Optics XXIII, Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam, 1986, P. 113–182.
2. *Wolf G.K., Ensinger W.* // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 1991. B59/60. P. 173–181.
3. *Enginger W.* // Rev. Sci. Instrum., 1992. Vol. 63 (11), P. 5217–5233.
4. *Kaufman H.R., Robinson R.S., Seddon R.I.* // J. Vac. Sci. Technol. 1987. Vol. A5(4). P.2081–2084.
5. *Свадковский И.В.* Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий. Минск, 2002.
6. *Голосов Д.А., Свадковский И.В.* // Материалы междунар. науч. школы-конференции "Тонкие пленки и наноструктуры", Москва, Россия, 7–10 сент. 2004 г. М., 2004. С. 148–151.
7. *Голосов Д.А., Свадковский И.В., Завадский С.М.* // Материалы 6-й Междунар. конф. "Взаимодействие излучений с твердым телом", Минск, Беларусь, 28–30 сент. 2005 г. Минск, 2005. С. 363–365.
8. *Свадковский И.В., Акулич Е.С., Ширшов В.Я., Достанко А.П.* // Журн. прикладной спектроскопии. 1991. Т. 55, № 2. С. 322–325.
9. *Свадковский И.В.* // Докл. БГУИР. 2007. № 2. С. 112–121.
10. *Musil. J.* // Vacuum. 1998. Vol. 50, № 3–4. P. 363–372.
11. *Kelly P.J., O'Brien J., Arnell R.D.* // Vacuum. 2004. Vol. 74. P. 1–10.
12. *Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M.* // Vacuum. 2003. Vol. 68, № 4. P. 283–290.