

Совместное функционирование магнетронной распылительной системы и ионного источника на основе торцевого холловского ускорителя

© Д.А. Голосов,¹ Вуон Еунгсун,² С.М. Завадский¹

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013 Минск, Беларусь
e-mail: dmgoosov@gmail.com

² Korea Institute of Materials Science, Plasma Coating Technology Department, 642-831, Republic of Korea, Changwon, 797 Changwon-Daero, Sungsan-Gu,
e-mail: esbyon@kims.re.kr

(Поступило в Редакцию 28 ноября 2013 г.)

Проведены исследования особенностей совместной работы магнетронной распылительной системы (МРС) с ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя (ТХУ). Отмечено, что при включении разряда магнетрона происходит частичная или полная нейтрализация ионного пучка, генерируемого ТХУ, т. е. при определенных режимах МРС ионный источник функционирует в безнакальном режиме. В данном случае разряд магнетрона является источником электронов, необходимых для поддержания разряда и компенсации ионного пучка ТХУ. Установлены зависимости разрядных характеристик ТХУ и МРС при использовании для компенсации ионного пучка ТХУ накального нейтрализатора и разряда МРС. На основе анализа совместной работы МРС и ТХУ рассмотрен баланс токов системы ионный источник–магнетронная распылительная система. Показано, что максимальный ток разряда ионного источника, при котором сохраняется условие скомпенсированности разряда, зависит от несбалансированности и тока разряда магнетрона.

Введение

В последние годы интенсивно ведутся исследования по разработке и внедрению в промышленность ионно-ассистированных методов нанесения тонких пленок. Это связано прежде всего с тем, что методы ионного ассистирования дают возможность точно контролировать состав и энергию бомбардирующих частиц, активно управлять процессом формирования пленок и тем самым обеспечивать условия для получения пленок с заданными структурно-фазовыми свойствами и воспроизводимостью параметров от процесса к процессу. При этом имеется возможность изменять плотность и пористость пленки, компонентный состав, внутренние напряжения, микроструктуру, а также значительно увеличить адгезию за счет активации поверхности и ионного перемешивания [1]. В этой связи представляется перспективной комбинация магнетронного распыления с процессом ионно-ассистирования, что позволяет совместить высокие скорости нанесения с ионной бомбардировкой растущей пленки. Предлагаемый метод ионно-ассистированного магнетронного распыления (ion-beam assisted magnetron или ИВАМ) позволяет наносить пленки с высокими скоростями и независимо управлять свойствами наносимых слоев за счет одновременной дополнительной ионной бомбардировки растущей пленки ионами с энергией порядка 100 eV из торцевого холловского ускорителя (ТХУ) или до 1000 eV при использовании холловских или сеточных ионных источников [2,3]. При этом возможно обеспечивать режимы ионной бомбардировки независимо от режимов разряда МРС, контролировать

состав, энергию, а также угол падения бомбардирующих подложку ионов.

Основной проблемой реализации метода ИВАМ является различие в диапазонах рабочих давлений магнетронных распылительных систем и ионных источников. Максимальное рабочее давление ионных источников с замкнутым дрейфом электронов (ускорителя с анодным слоем или торцевого холловского ускорителя) обычно не превышает 0.06 Па (рис. 1). При более высоких давлениях даже при больших скоростях откачки разряд ионных источников переходит из вакуумного в „интенсивный“ режим, что сопровождается резким снижением напряжения разряда, ионного тока и появлением

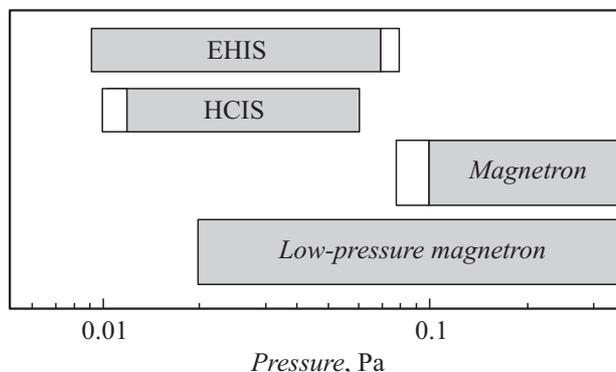


Рис. 1. Диапазоны рабочих давлений магнетронных распылительных систем и некоторых типов ионных источников: EHIS — торцевой холловский ускоритель (End-Hall Ion Source), УАС — ускоритель с анодным слоем (Hall Current Ion Source).

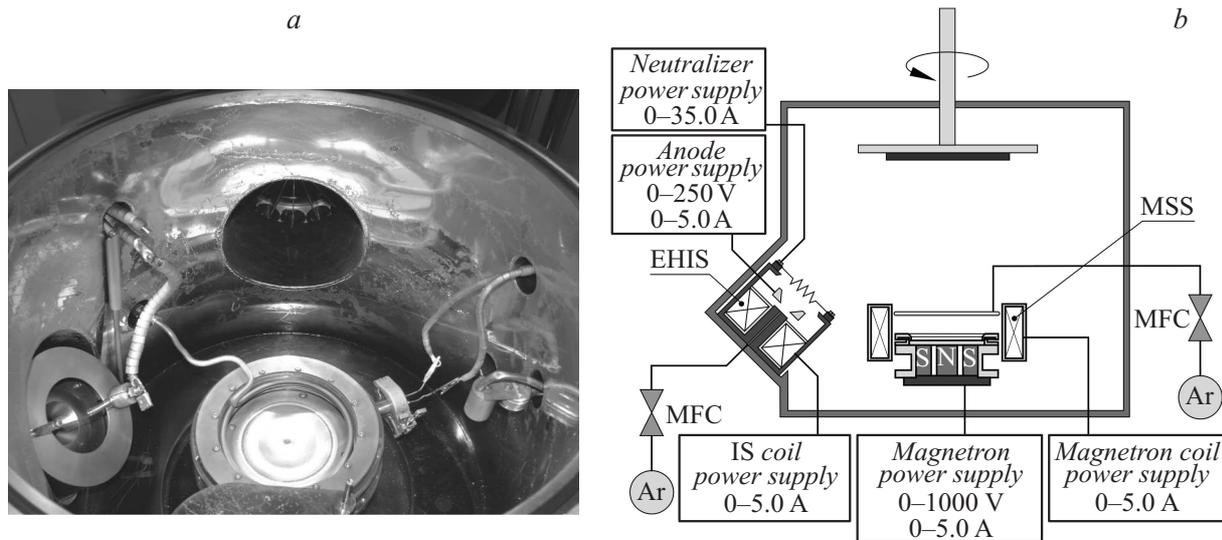


Рис. 2. Внешний вид (а) и схема экспериментальной установки (б) для ионно-ассистированного магнетронного распыления: EHIS — торцевой холловский ускоритель (End-Hall Ion Source), MSS — магнетронная распылительная система (Magnetron Sputtering System), MFC — регулятор расхода газа (Mass Flow Control).

неустойчивости генерации разряда [4]. Для эффективной реализации метода ИВАМ необходимо обеспечить некоторое перекрытие диапазонов рабочих давлений ионно-плазменных устройств за счет снижения минимального рабочего давления MPC до уровня 0.02–0.04 Па. Как отмечено выше, при таких давлениях инициализация разряда традиционных магнетронов весьма затруднительна. Однако такие рабочие давления обеспечивают высоковакуумные MPC с дополнительным соленоидом [5,6].

Таким образом, целью настоящей работы было исследование особенностей совместной работы высоковакуумной MPC с ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя, установление особенностей разрядных характеристик ТХУ при работе с магнетронной распылительной системой.

Эксперимент

Схема и внешний вид экспериментальной установки ионно-ассистированного магнетронного распыления приведены на рис. 2. Система реализована с использованием ионного источника на основе торцевого холловского ускорителя \varnothing 140 мм и высоковакуумной магнетронной распылительной системы с дополнительным соленоидом MAG-100. В качестве мишени магнетрона использовался диск из титана марки VT1-0 \varnothing 100 мм и толщиной 5 мм. Дополнительный соленоид магнетрона использовался для понижения минимального рабочего давления за счет оптимизации конфигурации магнитной ловушки MPC [6,7]. Для питания магнетронной распылительной системы использовался источник питания мощностью 3.0 kW с возможностью работы в режимах стабилизации тока или мощности разряда.

Ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя располагался в непосредственной близости

от MPC под углом 30° – 45° к поверхности подложки. Особенностью данного ионного источника являлось использование в качестве источника магнитного поля соленоида. Применение соленоида позволило изменять индукцию и направление магнитного поля в разрядной зоне ионного источника. Питание соленоида ТХУ осуществлялось от DC блока питания (0–50 В, 0–5.0 А). Питание анодного напряжения ТХУ осуществлялось от DC блока питания (0–250 В, 0–5.0 А). Для компенсации объемного заряда и поддержания разряда ионного источника был использован вольфрамовый накальный катод компенсатор (W нить \varnothing 0.8 мм). Питание компенсатора осуществлялось от DC источника питания, который обеспечивал ток до 25.0 А. Подложкодержатель располагался на расстоянии 18 см от поверхности мишени магнетрона.

Исследованы четыре конфигурации взаимного размещения MPC и ТХУ, которые представлены на рис. 3. В данных конфигурациях использовались два соленоида S1 (2025 витков провода \varnothing 0.7 мм) и S2 (585 витков провода \varnothing 1.0 мм), изменялись угол наклона ионного источника и расстояние между ионным источником и магнетроном.

В ходе экспериментов камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Па. Рабочий газ Ar подавался в газораспределительную систему магнетрона. Поток рабочих газов контролировался автоматическим регулятором расхода газа РРГ-1. Поток Ar изменялся от 20 до 60 ml/min при давлении в камере 0.035–0.1 Па.

Первоначально включался ионный источник с накальным компенсатором. Ток соленоида ионного источника и ток накального компенсатора во всех экспериментах были постоянными и составляли $I_c^i = 0.5$ А, $I_f = 32$ А соответственно. После этого устанавливался требуемый

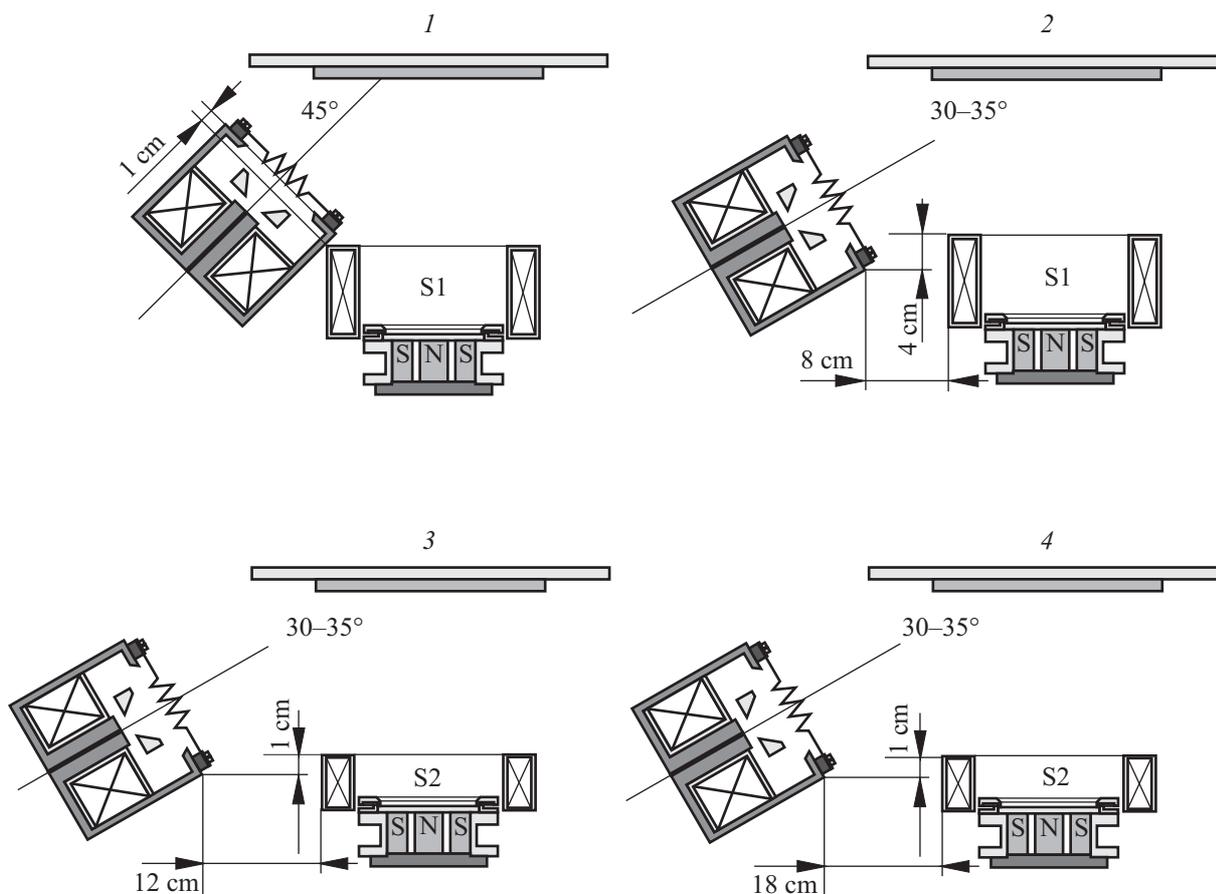


Рис. 3. Конфигурации взаимного размещения магнетронной распылительной системы и ионного источника: в конфигурациях 1 и 2 использовался соленоид S1, 3 и 4 — соленоид S2.

ток разряда ионного источника (ток разряда изменялся от 1.0 до 4.0 А в режиме стабилизации напряжения разряда). Затем включалась магнетронная распылительная система и устанавливался требуемый ток разряда магнетрона (ток разряда изменялся от 1.0 до 4.0 А в режиме стабилизации тока разряда). При работе в безнакальном режиме ионного источника накальный компенсатор выключался после включения магнетрона.

Результаты и обсуждение

Как отмечено выше, для обеспечения совместного функционирования ионного источника и МРС большое значение имеет минимальное рабочее давление магнетрона. Поэтому были проведены исследования влияния магнитного поля дополнительного соленоида на минимальное рабочее давление магнетрона MAG-100 (рис. 4). При токе дополнительного соленоида $I_c^m = -0.8$ А минимальное давление зажигания разряда магнетрона составило 0.058 Па. Поскольку основная магнитная система магнетрона имела некоторую начальную несбалансированность II типа, минимум давления зажигания разряда наблюдался при отрицательном токе дополнительного соленоида. При отрицательном токе соле-

ноида направление магнитного поля дополнительного соленоида совпадало с направлением магнитного поля центрального магнита. При этом формировалась более сбалансированная конфигурация магнитной ловушки магнетрона, что позволило увеличить эффективность ионизации и понизить минимальное рабочее давление магнетрона.

Проведены исследования разрядных характеристик ТХУ и МРС при совместной работе. Установлено, что

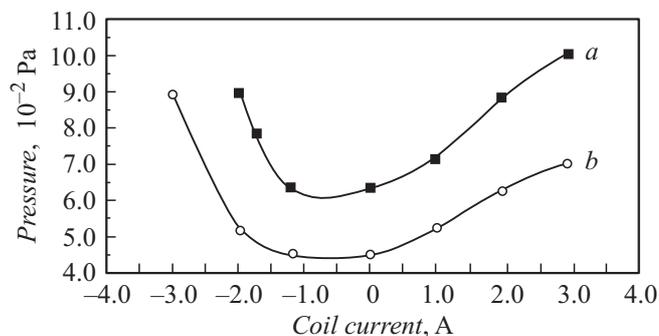


Рис. 4. Зависимость минимального давления зажигания разряда магнетрона MAG-100 от тока дополнительного соленоида S1 (a) и при совместной работе MAG-100 с ТХУ (b).

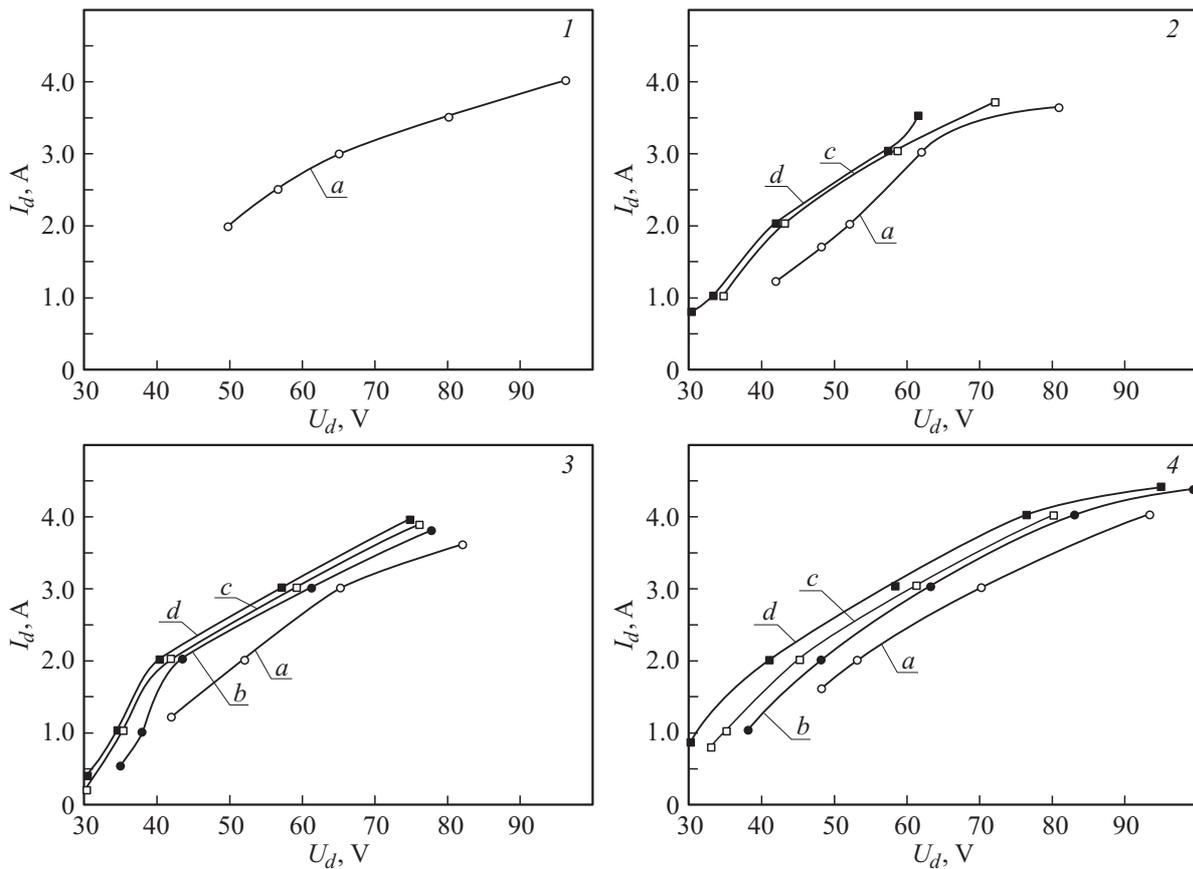


Рис. 5. ВАХ ТХУ для конфигураций 1–4 системы ИВАМ при различном потоке рабочего газа, подаваемого в ионный источник: a — 0, b — 10, c — 20, d — 30 ml/min.

в режиме ИВАМ магнетронная распылительная система и ионный источник оказывали взаимное влияние на параметры разрядов. При включении ТХУ за счет дополнительной ионизации рабочего газа происходила интенсификация разряда магнетрона, и минимальное давление возникновения разряда магнетрона снижалось до 0.044 Па (рис. 4, кривая b), что невозможно было достичь без ионного источника. Кроме того, магнетрон работал в более широком диапазоне токов дополнительного соленоида. На рис. 5 показаны ВАХ ионного источника для представленных на рис. 3 конфигураций системы ИВАМ. ВАХ получены при следующих режимах: напряжение и ток разряда магнетрона $U_t = 500$ В, $I_t = 3.0$ А, поток Ar в газораспределительную систему магнетрона для конфигураций 1, 2 $Q_{Ar} = 50$ ml/min, ток соленоида S1 магнетрона $I_c^m = -0.8$ А, для конфигураций 3, 4 $Q_{Ar} = 60$ ml/min, ток соленоида S2 магнетрона $I_c^m = -0.5$ А. Ток соленоида ионного источника во всех экспериментах был постоянным и составлял $I_c^i = 0.5$ А. Поток рабочего газа в ионный источник изменялся от 0 до 30 ml/min.

Как видно из рис. 5, разрядные характеристики ионного источника практически не зависели от положения и расстояния от ионного источника до магнетрона и типа дополнительного соленоида магнетрона. Также рабочие режимы всей системы не зависели от поляр-

ности включения соленоида ионного источника, т.е. наблюдались эффекты замкнутой области (closed field), характерные для дуальных магнетронов [8]. Следует отметить, что ионный источник устойчиво работал без подачи в него рабочего газа, т.е. когда газ подавался только в газораспределительную систему магнетрона. При увеличении потока рабочего газа, подаваемого в ионный источник, ВАХ ТХУ незначительно смещалась в сторону увеличения разрядного тока при постоянном напряжении. При возникновении разряда магнетрона ток разряда ТХУ при постоянном напряжении разряда увеличивался примерно на 20% по сравнению с работой без MPC.

Особо следует отметить, что при включении разряда магнетрона происходила частичная или полная нейтрализация ионного пучка, генерируемого ТХУ, т.е. при определенных режимах MPC ионный источник работал в безнакальном режиме (рис. 6). В данном случае разряд магнетрона являлся источником электронов, необходимых для поддержания разряда и компенсации ионного пучка ТХУ. Максимальный ток разряда ионного источника, при котором сохранялось условие скомпенсированности разряда, немного превышал ток разряда магнетрона и зависел от несбалансированности и тока разряда магнетрона. При превышении максимального тока разряда появлялись эффекты нескомпенсированно-



Рис. 6. Система ИВАМ в безнакальном режиме работы ТХУ.

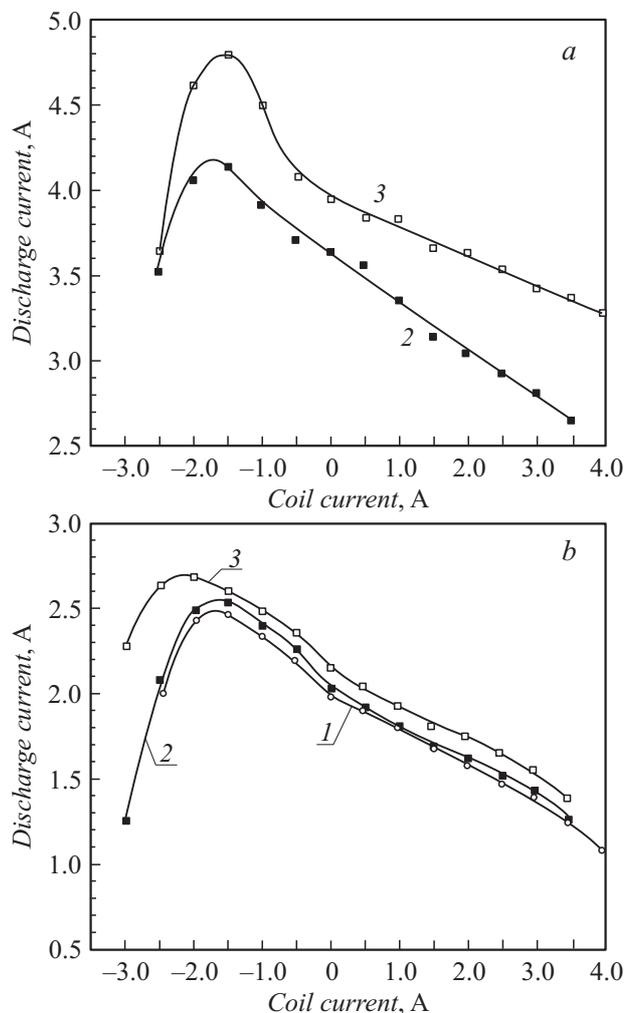


Рис. 7. Зависимость максимального тока разряда ионного источника от тока дополнительного соленоида S1 магнетрона при тока разряда магнетрона $I_t = 2.0$ А (а) $I_t = 4.0$ А (б) при различном потоке Ar, подаваемого в газораспределительную систему магнетрона: 1 — 40, 2 — 50, 3 — 60 ml/min.

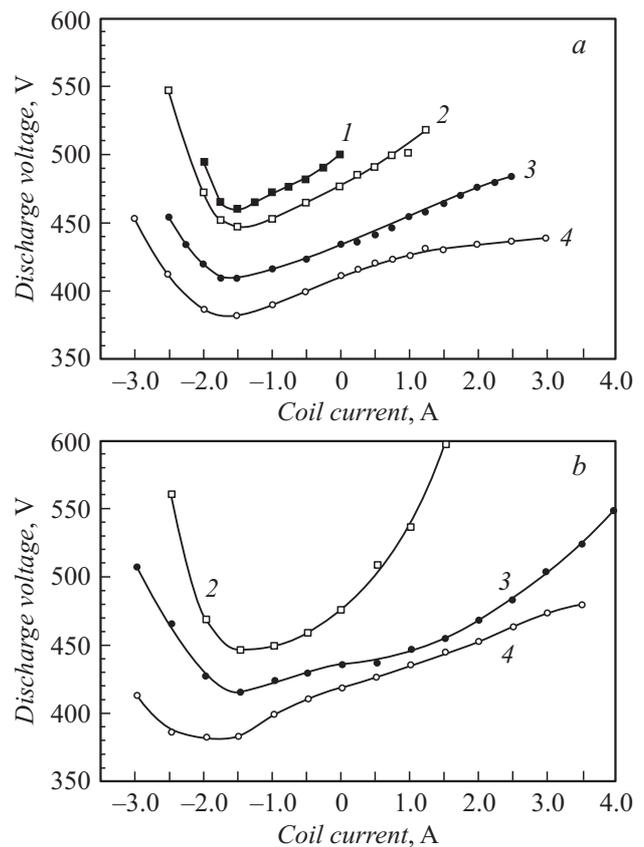


Рис. 8. Зависимость напряжения разряда магнетрона от тока дополнительного соленоида при работе магнетрона MAG-100 без (а) и совместно с ионным источником (б) при различном потоке Ar, подаваемого в газораспределительную систему магнетрона: 1 — 35, 2 — 40, 3 — 50, 4 — 60 ml/min. Ток разряда магнетрона $I_t = 2.0$ А.

сти ионного пучка ТХУ, которые проявлялись в виде точечных разрядов на поверхности подложки и стенках камеры. При постоянном токе разряда магнетрона максимальный ток разряда ионного источника увеличивался при увеличении потока газа, подаваемого в ионный источник.

Исследованы разрядные характеристики ТХУ при использовании в качестве источника электронов магнетронного разряда и зависимости максимального тока разряда ТХУ, при котором обеспечивается условие скомпенсированности разряда, от параметров разряда магнетрона. На рис. 7 представлены зависимости максимального тока разряда ионного источника от тока дополнительного соленоида S1 магнетрона при различном токе разряда магнетрона и потоке газа. Максимум тока разряда ионного источника достигался при токе дополнительного соленоида магнетрона $I_c^m = -1.5 - -2.0$ А. При таком токе дополнительного соленоида магнитная ловушка магнетрона имеет несбалансированность I типа конфигурации магнитного поля магнетрона [7], т.е. наиболее эффективная нейтрализация ионного пучка ТХУ обеспечивается при низком ионном токе магнетрона.

На рис. 8, *b* представлена зависимость напряжения разряда магнетрона от тока дополнительного соленоида при совместной работе с ионным источником в без-накальном режиме. При работе магнетрона в режиме ИВАМ характеристики разряда магнетрона практически не изменились по сравнению с работой магнетрона без ионного источника (рис. 8, *a*). Однако при наличии разряда ионного источника магнетрон работал в более широком диапазоне токов дополнительного соленоида. Отсутствие накального нейтрализатора имеет несколько важных преимуществ. Во-первых, катод нейтрализатора является одним из наименее надежных компонентов систем ионно-ассистированного нанесения. Его отсутствие значительно увеличивает надежность системы. При этом стоимость устройства уменьшается за счет отсутствия высокопоточного источника питания нейтрализатора. Во-вторых, катод нейтрализатора ограничивает время между техническим обслуживанием системы. Ресурс накальных катодов составляет десятки часов, но резко сокращается при использовании химически активных газов [9]. Отсутствие катода нейтрализатора может иметь большое значение в шлюзовых вакуумных системах, где обычно время между техническим обслуживанием должно быть как можно большим. В-третьих,

отсутствие накального нейтрализатора позволяет значительно снизить тепловое воздействие на подложку. Это особенно важно при нанесении тонких пленок на полимерные подложки.

На основе полученных данных рассмотрен механизм взаимодействия разрядов ТХУ и магнетрона (рис. 9, *b*). Ранее в работе [10] был рассмотрен баланс токов системы ионный источник–нейтрализатор (рис. 9, *a*), и показано, что в торцевых холловских ускорителях основным механизмом генерации ионов является ударная ионизация. Количество образующихся в разряде электронов равно количеству образующихся ионов

$$I_{i1} = I_{e1}. \tag{1}$$

Однако разряд ТХУ не может существовать самостоятельно без дополнительной инжекции электронов в разряд I_{e2} . Также часть генерируемого нейтрализатором потока электронов I_{e3} используется для компенсации ионного пучка ТХУ I_{i1} . В условиях скомпенсированности объемного заряда ток ионов должен быть равен току электронов

$$I_{i1} = I_{e3}. \tag{2}$$

Таким образом, система нейтрализации должна обеспечивать электронный ток I_n , достаточный для компенсации объемного заряда и поддержания процесса плазмообразования,

$$I_n > I_{e2} + I_{e3}. \tag{3}$$

Ток разряда ионного источника складывается из тока электронов из разряда и нейтрализатора

$$I_d = I_{e1} + I_{e2}. \tag{4}$$

Из выражений (2) и (4) следует, что $I_{e2} = I_d - I_{i1}$, а

$$I_n \geq I_d, \tag{5}$$

т.е. для работы ТХУ в режиме скомпенсированности разряда, электронный ток нейтрализатора I_n должен быть равен или больше тока разряда ионного источника.

При ионно-ассистированном магнетронном распылении таким источником электронов является разряд магнетрона. Электронный ток магнетрона I_e^m равен току разряда магнетрона

$$I_e^m = I_t = I_i^m (1 + \gamma),$$

где I_t — ток разряда магнетрона, I_i^m — ионный ток мишени магнетрона, γ — коэффициент ионно-электронной эмиссии материала мишени. Отсюда следует, что максимальный ток разряда ТХУ должен зависеть только от тока разряда магнетрона. Однако, как видно из рис. 7, максимальный ток разряда ионного источника при постоянном токе разряда магнетрона также зависит от тока дополнительного соленоида магнетрона. Как отмечено выше, от тока дополнительного соленоида зависит

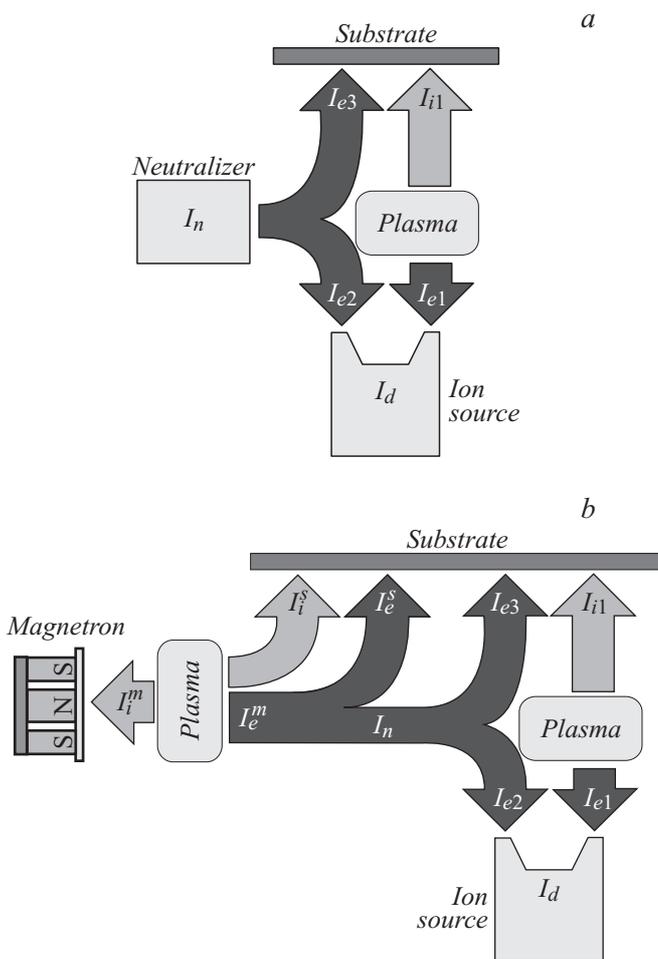


Рис. 9. Баланс электронных и ионных токов при работе ТХУ нейтрализатором (а) и в режиме ИВАМ (b).

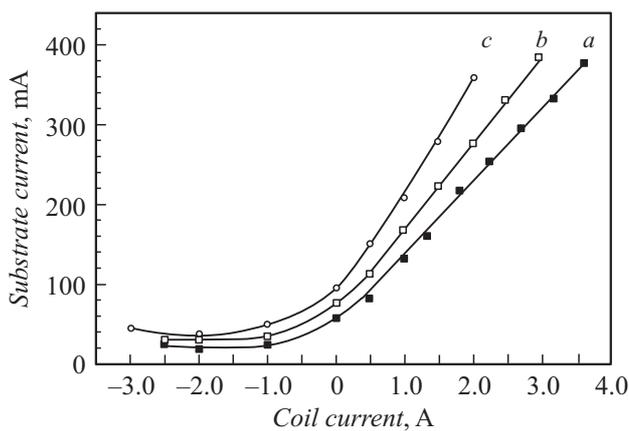


Рис. 10. Зависимость ионного тока подложки I_i^s от тока дополнительного соленоида магнетрона при различном потоке Ar, подаваемого в газораспределительную систему магнетрона: *a* — 60, *b* — 50, *c* — 35 ml/min. Ток разряда магнетрона $I_t = 2.0$ А.

конфигурация магнитного поля и степень несбалансированности магнетрона. В обычных (сбалансированных) МРС потерявшие большую часть энергии электроны покидают магнитную ловушку и попадают на анод или стенки камеры. В несбалансированных МРС II типа область распространения покинувших ловушку электронов ограничена усиленным боковым магнитным полем. Наличие вертикального магнитного поля заставляет электроны, покинувшие область разряда МРС, двигаться вдоль линий магнитного поля и одновременно двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной вектору магнитного поля **B**. Результирующее движение частицы происходит по спирали, осью которого является силовая линия, к которой „привязана“ частица. Для компенсации возникающего объемного отрицательного заряда, положительно заряженные ионы вытягиваются из области разряда МРС и ускоряются отрицательным смещением подложки, что позволяет сохранить условие квазинейтральности плазмы. В несбалансированных МРС I типа незамкнутые линии магнитного поля с усиленного центрального полюсного наконечника направлены в радиальном направлении к стенкам камеры. При этом практически устраняется осевая составляющая магнитного поля. Электроны с разряда магнетрона двигаются вдоль линий магнитного поля к стенкам камеры, что дает низкую плотность электронного и ионного токов в области подложки [5]. Таким образом, ионный ток подложки при магнетронном распылении зависит от несбалансированности магнетрона и возрастает при увеличении несбалансированности (тока дополнительного соленоида) (рис. 10).

При работе магнетрона как ионная, так и электронная составляющие дают совершенно независимый вклад в суммарный ток подложки. При этом должно соблюдаться условие квазинейтральности плазмы:

$$n_e v_e^s = n_i^s v_i^s,$$

где n_e^s и n_i^s — концентрация электронов и ионов соответственно, v_e^s — скорость электронов, v_i^s — скорость ионов. Поэтому в магнетронном разряде часть электронов расходуется на компенсацию ионного потока I_i^m , создаваемого магнетроном. При увеличении несбалансированности магнетрона все большее количество электронов расходуется на компенсацию возрастающего ионного потока магнетрона. Кроме того, при этом увеличение индукции магнитного поля вне магнитной ловушки магнетрона (как при несбалансированности I-го, так и II-го типов) снижает подвижность электронов в направлении, перпендикулярном магнитному полю, что фокусирует поток электронов. При больших токах дополнительного соленоида (как положительном, так и отрицательном) это приводит к уменьшению количества электронов, достигающих зоны разряда ионного источника (рис. 7). Таким образом, при работе в режиме ИВАМ максимальный ток разряда ТХУ в режиме скомпенсированности ионного пучка не превышает ток разряда магнетрона и достигается при сбалансированной конфигурации магнитного поля МРС. При увеличении несбалансированности магнетрона максимальный ток разряда ТХУ снижается за счет расхода электронов на компенсацию ионного пучка и уменьшения их подвижности в направлении, перпендикулярном магнитному полю

$$I_d \leq I_t - I_e^s.$$

Заключение

Предложен метод ионно-ассистированного магнетронного распыления, при котором ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя функционирует одновременно с магнетронной распылительной системой. Показана возможность использования магнетрона не только в качестве источника распыленного материала, но и в качестве источника электронов для поддержания разряда и компенсации пространственного заряда ионного пучка ТХУ. На основе анализа совместной работы МРС и ТХУ показано, что максимальный ток разряда ионного источника, при котором сохраняется условие скомпенсированности разряда, зависит от несбалансированности и тока разряда магнетрона.

Отсутствие накаливаемого нейтрализатора позволяет существенно расширить возможности использования системы ИВАМ, повысить ее надежность и значительно снизить тепловое воздействие на подложку. Важным преимуществом системы ИВАМ является возможность разделения зон распыления материала мишени и взаимодействия нанесенного материала с ионным потоком. Это особенно важно для проведения процессов реактивного нанесения тонких пленок методом ИВАМ. В данном методе можно обеспечить распыление материала мишени в среде инертного газа (Ar), а взаимодействие распыленного потока с реактивным газом — за счет ионной бомбардировки ионами реактивного газа.

Список литературы

- [1] *Arnell R.D., Kelly P.J.* // Surf. Coat. Technol. 1999. Vol. 112. p. 170–176.
- [2] *Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M.* // II Intern. Sympos. of New Electrical and Electronic Technologies and Their Industrial Implementation NEET' 2001. Kazimierz Dolny, Poland, February, 14–17, 2001. P. 217–221.
- [3] *Svadkovski I.V., Eungsun Byon, Gun-Hwan Lee, Golosov D.A., Sang-Jo Jeon, Young-Shin Kim* // Interfinish 2008 17-th World congress & Exposition. Busan, Korea, June 16–19, 2008. P. GO-27.
- [4] *Свадковский И.В.* Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий: Монография / Под ред. А.П. Достанко. Минск: Беспринт, 2002. 214 с.
- [5] *Svadkovski I.V., Golosov D.A., Zavatskiy S.M.* // Vacuum. 2002. Vol. 68. N 4. P. 283–290.
- [6] *Голосов Д.А., Свадковский И.В., Завадский С.М.* Матер. VI Междунар. конф. по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками. Томск, Россия, 23–28 сент. 2002 г. С. 148–150.
- [7] *Голосов Д.А., Свадковский И.В., Завадский С.М.* // Электронная обработка материалов. 2002. № 6. С. 66–74.
- [8] *Kelly P.J., Arnell R.D.* // Surf. Coat. Technol. 1998. Vol. 108–109. P. 317–322.
- [9] *Kaufman H.R., Robinson R.S., Seddon R.I.* End-Hall Ion Source // J. Vac. Sci. Technol. A. 1987. Vol. AS. P. 2081–2084.
- [10] *Достанко А.П., Голосов Д.А.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 10. С. 59–64.