

04;10;12

Нейтрализация ионного пучка торцевого холловского ускорителя плазменным источником электронов на основе разряда в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях

© А.П. Достанко, Д.А. Голосов

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
220013 Минск, Белоруссия
e-mail: dmgoosov@mail.ru

(Поступило в Редакцию 8 декабря 2008 г.)

Исследована возможность использования плазменного источника электронов (ПИЭЛ) с разрядом в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях для компенсации ионного пучка ионного источника на основе торцевого холловского ускорителя (ТХУ). Используемый в качестве нейтрализатора ПИЭЛ располагался в непосредственной близости от области генерации и ускорения ионов ТХУ под углом 90° к оси источника. Установлены зависимости разрядных и эмиссионных характеристик ТХУ при работе с накальным нейтрализатором и плазменным источником электронов. Установлено, что максимальный ток разряда ионного источника, при котором соблюдалось условие скомпенсированности разряда ТХУ, достигал 3.8 А при работе с ПИЭЛ и 4 А при работе с накальным компенсатором. Установлено, что максимальный ток разряда ионного источника показывает сильную зависимость от потока рабочего газа в ТХУ при небольших расходах газа (до 10 ml/min); далее максимальный ток разряда ТХУ зависит только от эмиссионной способности ПИЭЛ. Исследования эмиссионных характеристик ТХУ с накальным и плазменным нейтрализатором показали, что ток ионного пучка и профиль распределения плотности ионного тока не зависят от типа источника электронов, и плотность ионного тока достигает 0.2 mA/cm^2 на расстоянии 25 см от анода ТХУ.

На основе анализа работы ТХУ с различными источниками электронов рассмотрен баланс токов системы ионный источник—источник электронов. Сделан вывод, что для работы ионного источника в режиме скомпенсированности разряда ток нейтрализации должен быть равен или больше тока разряда ионного источника. Использование ПИЭЛ для компенсации ионного пучка торцевого холловского ускорителя продемонстрировало высокую эффективность в процессах ионно-ассистированного нанесения тонких пленок с использованием реактивных газов (O_2 , N_2). Применение ПИЭЛ позволило на порядок повысить ресурс работы системы ионно-ассистированного нанесения, который составил не менее 60 h при использовании Ti-катода и ограничивался временем до замены распыленной катодной вставки.

PACS: 52.59.Bi, 29.27.Eg

Введение

Ионные источники находят все большее применение при нанесении тонкопленочных слоев различного функционального назначения [1–3]. Однако области применения данных устройств несколько ограничиваются необходимостью использования достаточно сильноточных эмиттеров электронов для поддержания процессов ионизации и компенсации объемного заряда. Так, например, в настоящее время для процессов ионно-ассистированного нанесения широко используются низкоэнергетичные (порядка 100 eV) сильноточные (порядка 1 А) ионные источники на основе торцевых холловских ускорителей (ТХУ). Одним из существенных недостатков ТХУ является необходимость использования мощных источников электронов, которые служат для поддержания процесса плазмообразования и компенсации пространственного заряда ионного пучка [4]. Проблема компенсации потока ионов также возникает при формировании сфокусированных ионных пучков. Электрические поля, возникающие при транспортировке фокусируемого ионного пучка, могут достигать высоких

значений, расфокусируя ионы. Как следствие, распространение сфокусированных ионных пучков сопровождается их расплыванием вследствие взаимного расталкивания ионов.

Эффективная нейтрализация ионного пучка позволяет устранить электрические поля объемного заряда. В данном случае только ограничения, связанные с формированием плотной плазмы, ограничивают размер пятна сфокусированного ионного пучка [5]. Кроме того, в процессах ионно-лучевого распыления диэлектрических мишеней или реактивного ионно-лучевого распыления при нанесении диэлектрических слоев возникает проблема возникновения неустойчивости разряда ионных источников и образования поверхностного заряда на поверхности растущей пленки и мишени, что связано с нескомпенсированностью ионного пучка. Данные процессы уменьшают скорость распыления и могут стать источником возникновения электрического пробоя диэлектрической пленки. Особенно это актуально при нанесении конденсаторных диэлектриков и защитных оптических слоев [6]. Применение систем активной компенсации ионных пучков в данном случае позволяет не

только практически устранить нескомпенсированность ионных пучков, но и в некоторых случаях интенсифицировать процессы плазмообразования и диссоциации газов в процессах реактивного распыления.

Таким образом, для создания и транспортировки сильноточных ионных пучков необходимо применять нейтрализацию. Идея заключается в том, что необходимо смешать электроны с ионами так, чтобы уменьшить создаваемое ионным пучком электрическое поле. Данный процесс возможен, поскольку электроны имеют сравнительно небольшую массу и быстро входят в объем пучка. Существует два способа нейтрализации ионного пучка:

1) зарядами, образующимися при ионизации ионным пучком атомов разреженного газа, через который проходит пучок („самокомпенсация“ или „газовая“ компенсация);

2) зарядами, введенными в пучок извне, в частности, путем совмещения ионного пучка с ранее сформированным и ускоренным пучком другого знака („принудительная“ компенсация);

В технологии нанесения и травления слоев с использованием ионных пучков предпочтительным является метод принудительной компенсации, который позволяет работать при более низких значениях в камере, активно управлять процессом компенсации ионного пучка и потенциалом подложки. В данном методе электроны создаются источниками, расположенными вне области вакуумной транспортировки пучка. Электроны извлекаются путем принудительной экстракции или под действием положительного электрического поля, создаваемого ионным пучком, и в необходимом количестве „присоединяются“ к ионам. В результате нейтрализованный пучок имеет плотность электронов, приблизительно равную плотности пучка.

В последние годы все более широкое применение получают плазменные источники электронов (ПИЭЛ), в которых эмиттером электронов служит газоразрядная плазма. В предыдущих работах [7] было показано, что ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях является эффективным источником электронов и может быть применен для компенсации пространственного разряда ионного источника.

Таким образом, целью работы являлось исследование возможности использования ПИЭЛ с разрядом в скрещенных $E \times H$ полях для компенсации ионного пучка ионного источника на основе ТХУ, установление особенностей разрядных и эмиссионных характеристик ТХУ при работе с накаливаемым нейтрализатором и плазменным источником электронов.

1. Схема проведения экспериментов

Схема экспериментальной установки для исследований разрядных и эмиссионных характеристик ТХУ при работе с накаливаемым нейтрализатором и плазменным

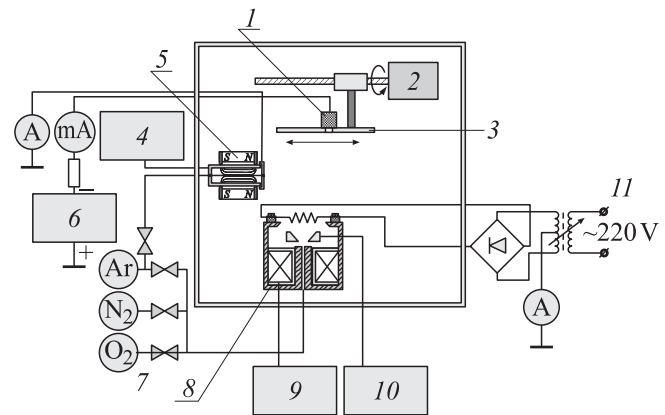


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследований разрядных и эмиссионных характеристик ТХУ при работе с накаливаемым нейтрализатором и ПИЭЛ: 1 — зонд, 2 — электродвигатель, 3 — подложка, 4 — блок питания катода (0–600 В, 3 А), 5 — ПИЭЛ, 6 — блок смещения (0–100 В), 7 — регулятор расхода газа, 8 — ТХУ, 9 — блок питания соленоида (0–3 А), 10 — блок питания анодный (0–200 В, 0–6 А), 11 — блок питания накаливаемого компенсатора.

источником электронов приведена на рис. 1. Экспериментальная установка выполнена на базе вакуумного поста ВУ-2МП. Камера вакуумной установки была оборудована ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя $\varnothing 12$ см. Особенностью данного ионного источника является использование в качестве источника магнитного поля соленоида, что позволяет значительно расширить области рабочих режимов и добиться оптимизации разрядных характеристик. Для питания ионного источника использовался блок питания постоянного тока (200 В, 6 А).

Используемый в качестве нейтрализатора плазменный источник электронов на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях располагался в непосредственной близости от области генерации и ускорения ионов ионного источника под углом 90° к оси источника. Более подробно конструкция ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях описана в работе [7]. В качестве материала катода ПИЭЛ использовались медь М1 (чистота 99,95%) и титан ВТ1-0. Диаметр эмиссионного отверстия анода ПИЭЛ изменялся от 1 до 3 мм путем замены анодных вставок. На катод нейтрализатора подавалось отрицательное напряжение от источника питания постоянного тока (600 В, 5 А).

Для сравнения работы ТХУ с накаливаемым и плазменным нейтрализатором ионный источник был также оборудован накаливаемым компенсатором. В качестве накаливаемого компенсатора использовалась проволока из торрированного вольфрама диаметром 0,5 мм. Для измерения тока эмиссии электронов с накаливаемого компенсатора использовался трансформаторный источник питания накаливаемого компенсатора со схемой двухполупериодного выпрямления со средней точкой. Выходная цепь была оторвана от земли, и ток эмиссии изме-

рялся во внешней цепи: компенсатор—стенки камеры—земля—амперметр—компенсатор.

Для измерения распределения плотности ионного тока в камере на расстоянии 25 см от анода ионного источника был расположен зонд (чашка Фарадея) с системой перемещения. Для устранения влияния электронного тока при измерении ионного тока на зонд подавалось отрицательное смещение (до 60 В).

Для проведения экспериментов камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Па. В зависимости от условий эксперимента использовались различные схемы подачи рабочих газов (Ar, N₂, O₂): 1) подача Ar в нейтрализатор; 2) подача Ar как в нейтрализатор, так и ионный источник; 3) подача Ar в нейтрализатор, а активных газов (N₂, O₂) — в ионный источник. Расход рабочих газов контролировался с помощью автоматических регуляторов расхода газа РРГ-1.

2. Результаты и обсуждение

Исследованы разрядные характеристики ТХУ при использовании в качестве источника электронов ПИЭЛ и зависимости максимального тока разряда ТХУ, при котором обеспечивается условие скомпенсированности разряда. Исследования показали, что при работе ПИЭЛ без ионного источника все образующиеся в разрядной камере ПИЭЛ электроны попадают на анод нейтрализатора. При этом ток анода нейтрализатора был равен току разряда. Электронный ток возникал при подаче на анод ТХУ положительного потенциала. При включении ионного источника положительный объемный заряд ионного пучка вытягивал электроны из области разряда нейтрализатора. При этом наблюдалось увеличение тока нейтрализатора при практически постоянном напряжении разряда.

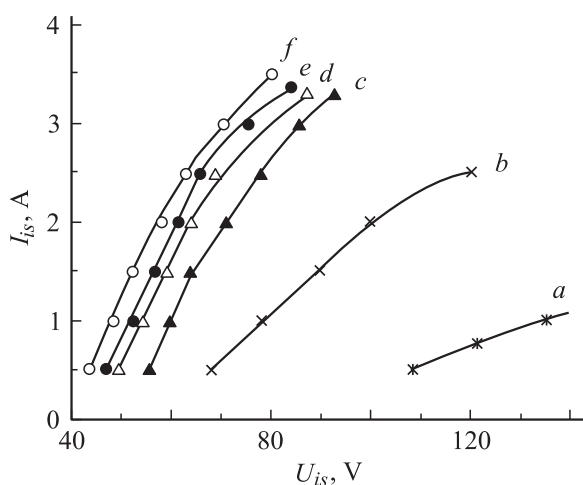


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики ионного источника при работе с ПИЭЛ при различном потоке рабочего газа в источнике: *a* — 5, *b* — 10, *c* — 15, *d* — 20, *e* — 25, *f* — 30 ml/min. Катод ПИЭЛ — Cu ($\varnothing 26$ mm), диаметр выходного отверстия 1.6 mm, $Q_n = 5$ ml/min, $I_n = 3$ A.

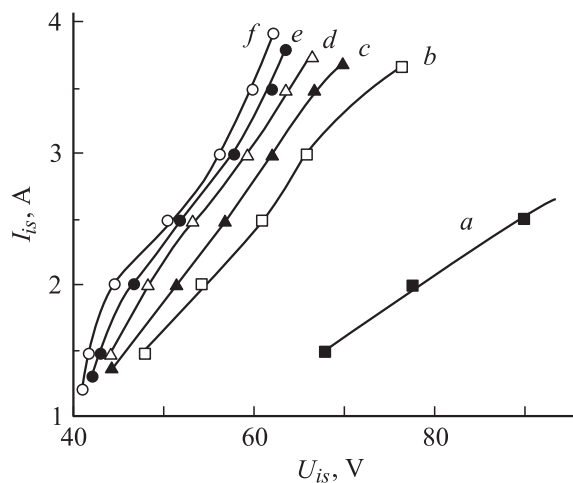


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики ионного источника при работе с ПИЭЛ при различном потоке рабочего газа в источнике: *a*–*f* — как на рис. 2. Катод ПИЭЛ — Ti ($\varnothing 20$ mm), диаметр выходного отверстия — 2 mm, $Q_n = 10$ ml/min, $I_n = 3$ A.

На рис. 2 и 3 представлены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) ионного источника при различном потоке рабочего газа в источник. В качестве источника электронов использовался ПИЭЛ с Cu-катодом (рис. 2) и Ti-катодом (рис. 3). Во всех экспериментах ток соленоида ТХУ поддерживался постоянным $I_c = 1$ А, поток рабочего газа Ar в ТХУ изменялся от 0 до 30 ml/min. Параметр рабочего режима ПИЭЛ при использовании Cu-катада: внутренний диаметр катада 26 mm, диаметр выходного отверстия 1.6 mm, поток Ar в нейтрализатор $Q_n = 5$ ml/min, ток разряда $I_n = 3$ А. Параметры рабочего режима ПИЭЛ при использовании Ti-катада: внутренний диаметр катада 20 mm, диаметр выходного отверстия 2 mm, поток Ar в нейтрализатор $Q_n = 10$ ml/min, ток разряда $I_n = 3$ А.

Для сравнения на рис. 4 представлены ВАХ ионного источника при использовании в качестве источника электронов накаливаемого нейтрализатора. Поток Ar в ионный источник составлял 15 ml/min, материал накаливаемого катада — вольфрам $\varnothing 0.5$ mm. Ток накаливаемого компенсатора изменялся в пределах 16–20 А. При этом эмиссия электронов изменялась от 1.5 до 4 А. Установлено, что максимальный ток разряда ионного источника, при котором соблюдалось условие скомпенсированности разряда ТХУ, зависит от тока эмиссии электронов накаливаемым компенсатором или ПИЭЛ. При превышении максимального тока разряда возникали эффекты нескомпенсированности разряда, которые проявлялись в виде точечных разрядов на поверхности подложки и стенках камеры. Как видно, максимальный ток разряда ионного источника при использовании ПИЭЛ несколько был ниже по сравнению с накаливаемым катодом компенсатора. Это объясняется эмиссионной способностью катодов, которая для ПИЭЛ на описанных выше режимах не превышала 3 А, а для накаливаемого компенсатора достигала 4 А.

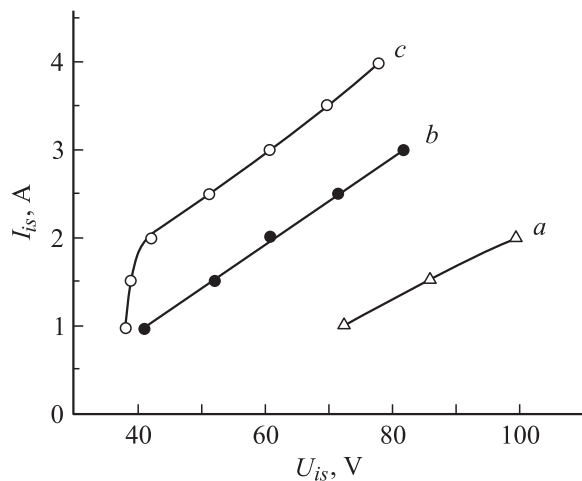


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики ионного источника при работе с накаливаемым компенсатором при различном токе накального компенсатора: *a* — 16, *b* — 18, *c* — 20 А. Поток рабочего газа в ТХУ 15 ml/min.

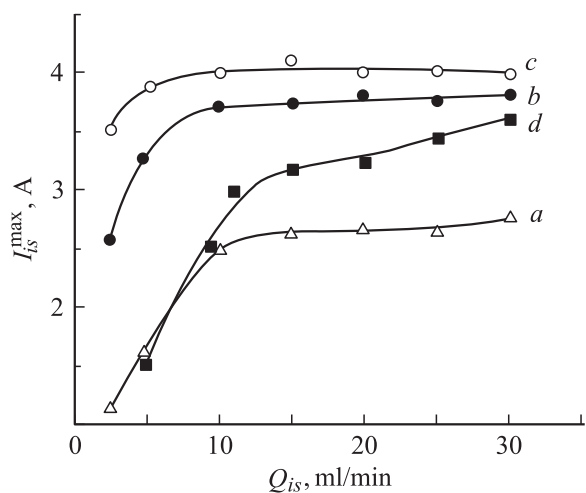


Рис. 5. Зависимость максимального тока разряда ТХУ при работе с ПИЭЛ от потока рабочего газа в ионный источник при различном потоке газа в ПИЭЛ: *a* — 5, *b* — 10, *c* — 15 (Ti-катод $\varnothing 20$ mm), *d* — 5 ml/min (Cu-катод $\varnothing 26$ mm).

Кроме того, при работе ТХУ с ПИЭЛ максимальный ток разряда ионного источника зависел от потока рабочего газа, подаваемого в ионный источник.

На рис. 5 представлена зависимость максимального тока разряда ионного источника от потока газа в ионный источник при различном потоке газа в ПИЭЛ. Кривые *a*–*c* получены при использовании в качестве катода ПИЭЛ Ti-катодной вставки внутренним диаметром 20 mm, диаметр выходного отверстия 2 mm. Кривая *d* получена при использовании в качестве катода ПИЭЛ Cu катодной вставки внутренним диаметром 26 mm, диаметр выходного отверстия 1.6 mm. Ток разряда ПИЭЛ составлял $I_n = 3$ А. При этом эмиссия электронов ПИЭЛ составляла: для Ti-катода 5 ml/min — 0.2 А,

10 ml/min — 2.3 А, 15 ml/min — 2.7 А; для Cu-катода при 5 ml/min — 0.8 А. Как видно, максимальный ток разряда ТХУ показывает сильную зависимость от потока рабочего газа в ТХУ при небольших расходах газа (до 10 ml/min). Далее максимальный ток разряда ТХУ зависит только от эмиссионной способности ПИЭЛ.

Исследования эмиссионных характеристик ТХУ с накаливаемым и плазменным нейтрализаторами показали, что ток ионного пучка и профиль распределения плотности ионного тока не зависят от типа источника электронов.

На рис. 6 и 7 представлены зависимости плотности ионного тока при использовании в качестве источника электронов ПИЭЛ и накаливаемого компенсатора. Плотность ионного тока измерялась на оси ионного источника на расстоянии 25 cm от анода. Ток ионного пучка достигал 0.2 mA/cm^2 . При одинаковом токе эмиссии электронов ПИЭЛ или накаливаемым нейтрализатором зависимости имели сходный характер.

На основе анализа работы ТХУ с различными источниками электронов рассмотрен баланс токов системы

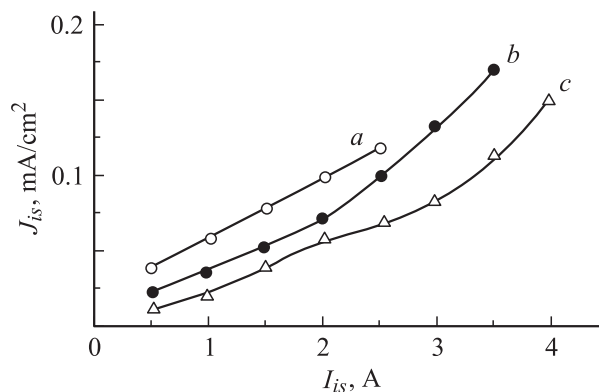


Рис. 6. Зависимость плотности ионного тока при работе ТХУ с ПИЭЛ от тока разряда ионного источника при различном потоке газа в ПИЭЛ: *a* — 5, *b* — 10, *c* — 15 ml/min (Ti-катод $\varnothing 20$ mm). Поток рабочего газа в ТХУ 15 ml/min.

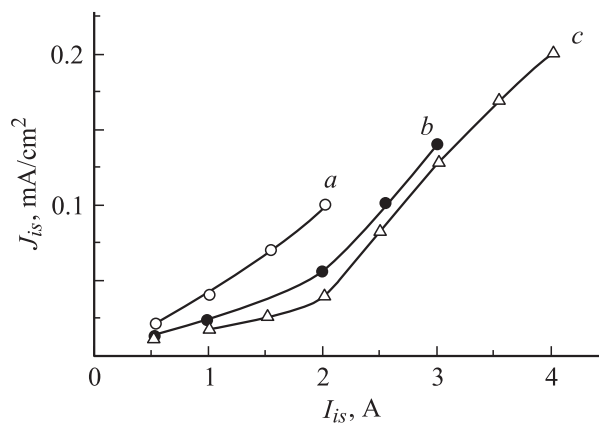


Рис. 7. Зависимость плотности ионного тока при работе ТХУ с накаливаемым компенсатором от тока разряда ионного источника при различном токе накального компенсатора: *a* — 16, *b* — 18, *c* — 20 А. Поток рабочего газа в ТХУ 15 ml/min.

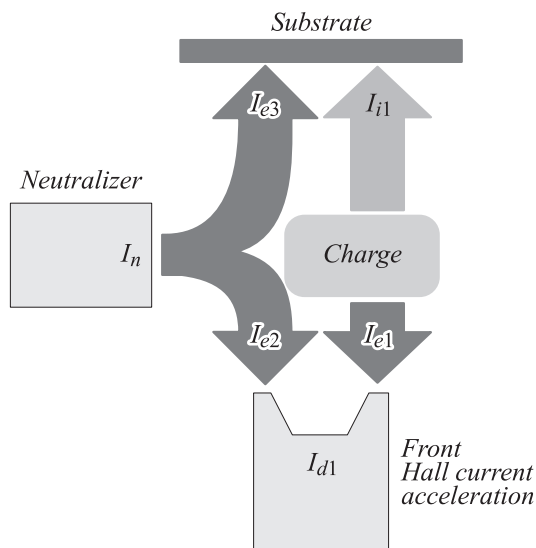


Рис. 8. Баланс электронных и ионных токов при работе ТХУ с накальным или плазменным источником электронов.

ионный источник—источник электронов. Как известно, в ТХУ основным механизмом генерации ионов является ударная ионизация. Количество образующихся в разряде электронов равно количеству образующихся ионов

$$I_{i1} = I_{e1}. \quad (1)$$

Для поддержания процесса плазмообразования и компенсации объемного заряда ТХУ необходим дополнительный источник электронов. Разряд ионного источника не может существовать самостоятельно без дополнительной инжекции электронов в разряд I_{e2} .

Дополнительная инжекция электронов чаще всего обеспечивается накальным или плазменным нейтрализатором (рис. 8). Ток разряда ионного источника складывается из тока электронов разряда и дополнительного источника электронов (нейтрализатора)

$$I_{d1} = I_{e1} + I_{e2}. \quad (2)$$

Поток электронов, генерируемый нейтрализатором, также используется для компенсации объемного заряда, создаваемого ионным пучком. При этом в режиме скомпенсированности разряда должно соблюдаться условие квазинейтральности плазмы

$$n_e v_e = n_i v_i, \quad (3)$$

где n_e и n_i — концентрация электронов и ионов соответственно, v_e и v_i — скорости электронов и ионов соответственно. В условиях скомпенсированности заряда на заземленной подложке $V_{sb} = 0$ ток ионов должен быть равен току электронов (идеальная компенсация):

$$I_{i1} = I_{e3}. \quad (4)$$

В случае изолированной подложки на поверхности подложки создаются условия для „принудительной“ компенсации, т.е. на подложке образуется положительный

или отрицательный потенциал, который тормозит один из типов зарядов, обеспечивая условие (4). В случае нескомпенсированности ионного пучка на поверхности подложки и стенках камеры возникают точечные разряды, обеспечивающие электронами ионный пучок.

Таким образом, нейтрализатор должен обеспечивать электронный ток для компенсации объемного заряда и поддержания процесса плазмообразования

$$I_n = I_{e2} + I_{e3}. \quad (5)$$

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

$$I_n = I_d. \quad (6)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что для работы ионного источника в режиме скомпенсированности разряда ток нейтрализации должен быть равен или больше тока разряда ионного источника. Однако в нашем случае на большинстве режимов работы ионного источника ток разряда ТХУ превышал ток эмиссии электронов нейтрализатором. Причем при увеличении потока рабочего газа в ТХУ эта разница увеличивалась. Данное поведение, по-видимому, связано с несколькими механизмами: при увеличении общего давления в камере усиливается эффект газовой компенсации, что позволяет повышать ток разряда выше значений тока эмиссии электронов нейтрализатором; изменение режимов работы ионного источника приводит к изменению потенциала подложки, что создает условия для принудительной компенсации, и изменению соотношения тока ионного пучка к току нейтрализации.

Использование ПИЭЛ для компенсации ионного пучка торцевого холловского ускорителя продемонстрировало высокую эффективность в процессах ионно-ассистированного нанесения тонких пленок с использованием реактивных газов (O_2 , N_2). При этом использовалась дифференцированная подача газов: Ag задувался в нейтрализатор, а реактивные газы — в ионный источник. В реактивной атмосфере ресурс накальных катодов не превышал нескольких часов. Применение ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных $E \times H$ полях позволило на порядок повысить ресурс работы системы ионно-ассистированного нанесения, который составил не менее 60 h при использовании Ti-катода и ограничивался временем до замены распыленной катодной вставки.

Заключение

Показана возможность использования ПИЭЛ с разрядом в скрещенных $E \times H$ полях для компенсации ионного пучка ионного источника на основе ТХУ. Исследования совместного функционирования плазменного источника электронов и ТХУ продемонстрировали, что максимальный ток разряда ионного источника показывает сильную зависимость от потока рабочего газа в ТХУ при небольших расходах газа (до 10 ml/min).

Далее максимальный ток разряда ТХУ зависит только от эмиссионной способности ПИЭЛ.

Исследования эмиссионных характеристик ТХУ с накатным и плазменным нейтрализатором показало, что ток ионного пучка и профиль распределения плотности ионного тока не зависят от типа источника электронов.

Использование ПИЭЛ для компенсации ионного пучка торцевого холловского ускорителя продемонстрировало высокую эффективность в процессах ионно-ассистированного нанесения тонких пленок с использованием реактивных газов (O_2 , N_2).

Список литературы

- [1] *Helmersson U., Lattemanna M., Bohlmark J., Ehiassarianb A.P., Tomas J.* // *Thin Solid Films*. 2006. Vol. 513. P. 1–24.
- [2] *Cho J.S., Han S., Kim K.H., Beag Y.W., Koh S.K.* // *Thin Solid Films*. 2003. Vol. 445. P. 332–341.
- [3] *Pawlewicz W.T., Culver T.R., Chiello M.W., Zachistal J.H., Walters S.R., Allen D.A.* // *Proc. SPIE*. 1994. Vol. 2262. P. 1–12.
- [4] *Kaufman H.R., Robinson R.S., Seddon R.I.* // *J. Vac. Sci. Technol. A*. 1987. Vol. 5. P. 2081–2084.
- [5] *Reyntjens S., Puers R.A.* // *J. Micromech. Microeng.* 2001. Vol. 11. P. 287–300.
- [6] *Shabalin A., Kishinevsky M., Quinn C.* // *Proc. of the 44th Annual Technical Conf. Philadelphia*, 2001. P. 23–28.
- [7] *Голосов Д.А., Свадковский И.В.* // *Матер. междунар. научной школы-конф. „Тонкие пленки и наноструктуры“*. М., 2004. С. 148–151.