

04;10;12

Разрядные и эмиссионные характеристики плазменного источника электронов на основе разряда в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях с различным материалом катода

© А.П. Достанко, Д.А. Голосов

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

(Поступило в Редакцию 8 декабря 2008 г.)

Разработан и исследован плазменный источник электронов (ПИЭЛ) на основе разряда в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях. Рабочий газ подается в квазизамкнутую разрядную камеру ПИЭЛ, в которой реализованы условия для эффективной ионизации рабочего газа в осевом магнитном поле. Для формирования потока электронов используется положительно смещенный дополнительный электрод или пространственный заряд ионного источника. Получены зависимости вольт-амперных и эмиссионных характеристик плазменного источника электронов для различных комбинаций материала катода (медь, титан и графит) и рабочего газа (Ar и He). Установлено, что разряд ПИЭЛ устойчиво существует при использовании в качестве материала катода Cu и Ti и потоке рабочего газа 2–20 ml/min для Ar и 6–60 ml/min — для He. Эффективность извлечения электронов данного типа ПИЭЛ достигала единицы при потоке Ar более 6 ml/min для Cu — катодной вставки и более 8 ml/min для Ti катодной вставки. Энергетическая эффективность при потоке рабочего газа Ar более 10 ml/min составила 4 mA/W для Ti-катода и 2.56 mA/W — для Cu-катода. Установлена низкая эффективность данного типа ПИЭЛ при использовании He в качестве рабочего газа.

Установлено, что соответствующий выбор пары рабочий газ — материал катода, обеспечивающей более высокие значения коэффициента распыления, позволяет повысить эффективность ПИЭЛ.

PACS: 52.80.Sm, 29.25.Bx

Введение

Нейтрализация объемного заряда и компенсация ионного пучка является одной из основных проблем технологий ионно-лучевого и ионно-ассистированного нанесения тонкопленочных слоев. В настоящее время для нейтрализации ионного пучка ионных источников применяют различные типы нейтрализаторов, однако любая система нейтрализации ионных пучков должна удовлетворять следующим основным требованиям:

1. энергетическая цена электрона (отношение расходуемой мощности к выходному электронному току) должна быть минимальной;

2. газовая эффективность источника электронов (отношение электронного тока к расходу рабочего вещества) должна быть наиболее высокой;

3. схема нейтрализатора должна быть простой, вероятность безотказной работы и конструктивный ресурс не должны быть ниже, чем у остальных элементов ионных источников;

4. нейтрализатор не должен загрязнять ионный пучок.

Наиболее простым и распространенным способом нейтрализации является использование накальных катодов-компенсаторов. Ресурс накальных катодов составляет десятки часов, но резко сокращается при использовании химически активных газов [1]. В последние годы все более широкое применение получают плазменные источники электронов (ПИЭЛ), в которых эмиттером электронов служит газоразрядная плазма. В ПИЭЛ

отбор электронов производится с границы плазмы, образованной в локализованном объеме. Уход электронов из плазмы восполняется электронной эмиссией с катода и ионизацией газа.

К ПИЭЛ относятся нейтрализаторы на основе разряда с полым катодом [2]. Нейтрализаторы этого типа обеспечивают электронный ток до 10 А и могут использоваться в качестве отдельных устройств для генерации электронных потоков. К недостаткам полых катодов можно отнести сравнительно высокие значения рабочего давления (более 1 Па), большие объемы расходуемого газа и трудности инициирования разряда [3,4]. Также получили применение нейтрализаторы типа „плазменный мост“ [5], в которых плазма генерируется в разрядной камере, в пространстве анод–накальный катод. Время жизни нейтрализаторов типа „плазменный мост“ не на много превышает время жизни накальных компенсаторов из-за наличия начального элемента, но они практически не загрязняют ионный пучок, одновременно обеспечивая его хорошую нейтрализацию.

Представляется наиболее перспективным использование в качестве источника электронов магнетронного разряда, в котором используется холловский ток электронов в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях. На основе предыдущих исследований [6] было установлено, что разряд в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях является эффективным источником электронов, которые могут быть применены для компенсации пространственного заряда ионного источника. Отсутствие накальных элементов позволяет предположить, что ресурс работы данного

типа нейтрализаторов при использовании как инертных, так и активных газов значительно превысит время жизни других типов нейтрализаторов.

Одним из недостатков магнетронного разряда является сравнительно высокое напряжение разряда, что снижает энергетическую эффективность ПИЭЛ. Для обеспечения высокой энергетической эффективности необходимо снижать напряжение разряда при постоянной эффективности извлечения электронов. Как известно, напряжение разряда в основном зависит от рода газа и материала катода — параметров, определяющих коэффициент ионно-электронной эмиссии [7]. Поэтому необходимо было установить зависимости разрядных и эмиссионных характеристик источника электронов с разрядом в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях при использовании различных газов и материалов катода.

Таким образом, целью настоящей работы являлось исследование особенностей функционирования нейтрализатора на основе разряда в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях, оценка эффективности использования данного типа разряда в качестве ПИЭЛ и методов ее увеличения за счет использования различных материалов катода и рабочих газов.

1. Конструкция источника электронов и схема проведения экспериментов

Схема и внешний вид ПИЭЛ на основе разряда в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях приведена на рис. 1 и 2. Разрядная камера нейтрализатора представляет собой водоохлаждаемый катодный узел с магнитной системой. Магнитная система на постоянных магнитах формирует внутри разрядной камеры нейтрализатора магнитное поле, силовые линии которого направлены параллельно поверхности катода ($B = 0.09 \text{ Т}$).

В разрядную камеру катодного узла устанавливаются трубчатые катоды-вставки внешним диаметром 28 mm

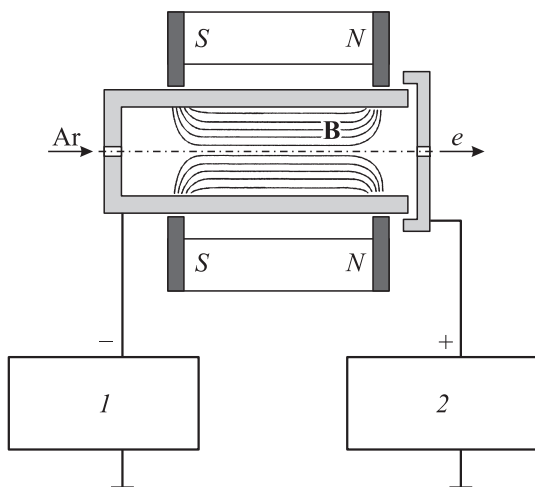


Рис. 1. Схема нейтрализатора ионного пучка на основе разряда в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях: 1 — блок питания катода (0–600 V, 3 A); 2 — блок питания анода (0–100 V).

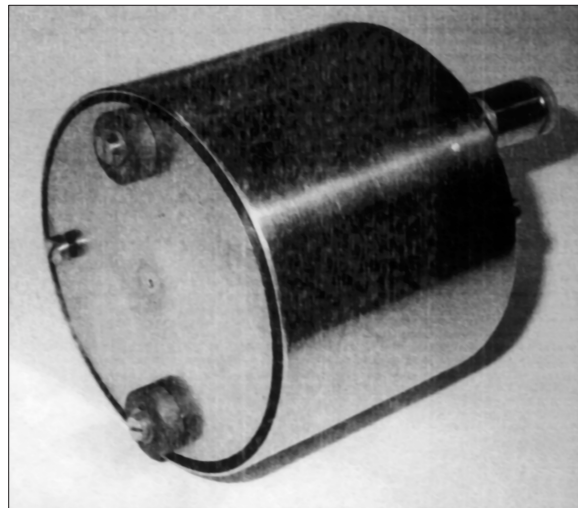


Рис. 2. Внешний вид нейтрализатора ионного пучка на основе разряда в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях с источником магнитного поля на постоянных магнитах.

и внутренним диаметром 20, 24 и 26 mm. В качестве материала катода использовались медь М1 (чистота 99.95%), титан ВТ 1-0 и графит МГ-ОСЧ. Одна из боковых стенок камеры является анодом. Анод нейтрализатора изолирован от катода и находится под нулевым потенциалом. В некоторых экспериментах на анод нейтрализатора подавался положительный потенциал от источника питания (0–100 V). Диаметр эмиссионного отверстия анода изменялся от 1 до 3 mm путем замены анодных вставок. На катод нейтрализатора подавалось отрицательное напряжение от источника питания постоянного тока (600 V, 5 A).

Работа нейтрализатора основана на ионизации атомов в разряде с холловским током в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях. Рабочий газ подается в квазизамкнутый объем разрядной камеры нейтрализатора ионного пучка. При этом возникает существенный градиент давления между разрядной камерой и вакуумным объемом. Подобная компоновка минимизирует влияние внешних факторов на генерацию заряженных частиц. Электроны, эмитируемые из катода под действием ионной бомбардировки и возникающие в результате ионизации атомов рабочего газа, захватываются магнитным полем и совершают движение по замкнутым циклоидальным траекториям. В результате замагничивания электронов резко увеличивается интенсивность электрон-атомного взаимодействия, и как следствие, возрастает степень ионизации плазмы [8]. Образующиеся в результате ионизации ионы ускоряются и бомбардируют поверхность катода. При этом происходят распыление материала катода и ионно-электронная эмиссия. Распыленный поток переосаждается на стенки катода. Небольшая апертура эмиссионного отверстия на аноде практически исключает загрязнение растущей пленки. Для формирования потока электронов используется положительно смещенный дополнительный электрод или пространственный заряд ионного источника.

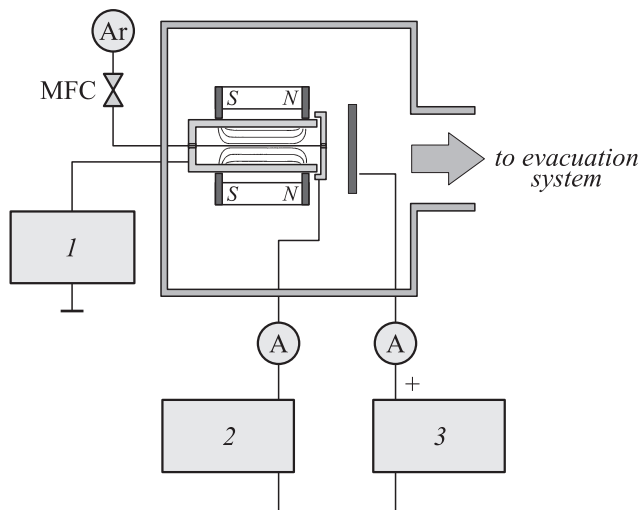


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования разрядных и эмиссионных характеристик нейтрализатора: 1 — блок питания нейтрализатора (0–600 В, 5 А), 2 — блок питания анода (0–100 В), 3 — блок питания смещения (0–100 В).

Схема экспериментальной установки для исследования разрядных и эмиссионных характеристик источника электронов на основе разряда в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях приведена на рис. 3. Зонд площадью 100 cm^2 располагался на расстоянии 3 см от выходного отверстия нейтрализатора. Камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления $(1-1.2) \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$. В качестве рабочего газа использовались Ar и He. Расход рабочего газа изменялся от 0 до 60 ml/min и контролировался с помощью автоматического регулятора расхода газа РРГ-1.

2. Результаты и обсуждение

Проведем исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) и эмиссионных характеристик источника электронов на основе разряда в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях при различном расходе рабочего газа. Установлено, что устойчивое горение разряда обеспечивалось для катодных вставок Ti и Cu при работе как на Ar, так и на He. При работе с графитовой катодной вставкой разряд постоянно пытался перейти в дуговую низковольтную форму разряда, что, по-видимому, связано с невозможностью удаления „отравленного“ поверхностного слоя катода.

Для катодов Ti и Cu зажигание разряда обеспечивалось при расходе Ar более 2 ml/min и He — более 6 ml/min . На рис. 4 и 5 представлены типичные ВАХ нейтрализатора при использовании в качестве материала катода Ti и Cu (рабочий газ Ar). На Ar горение разряда сохранялось при уменьшении расхода до 1.5 ml/min , что соответствовало давлению в рабочей камере вакуумной установки $3 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$. В случае использования медного катода, при прекращении подачи

рабочего газа после возникновения разряда, наблюдался эффект самораспыления (поддержания разряда за счет ионизации распыленных атомов катода). Ток разряда нейтрализатора варьировался от 0 до 4 А. При этом напряжение разряда нейтрализатора изменялось от 300 до 500 В при использовании Cu катодной вставки, и от 170 до 360 В при использовании Ti катодной вставки. При увеличении потока рабочего газа ВАХ сдвигались в область меньших напряжений при постоянном токе разряда. При уменьшении диаметра эмиссионного отверстия, за счет увеличения давления в разрядной камере, наблюдалось аналогичное поведение ВАХ. Разряд нейтрализатора устойчиво существовал при расходе Ar до 20 ml/min (0.02 Pos).

При использовании в качестве рабочего газа He напряжение разряда при использовании как Cu, так и Ti катодной вставки было примерно одинаковым и со-

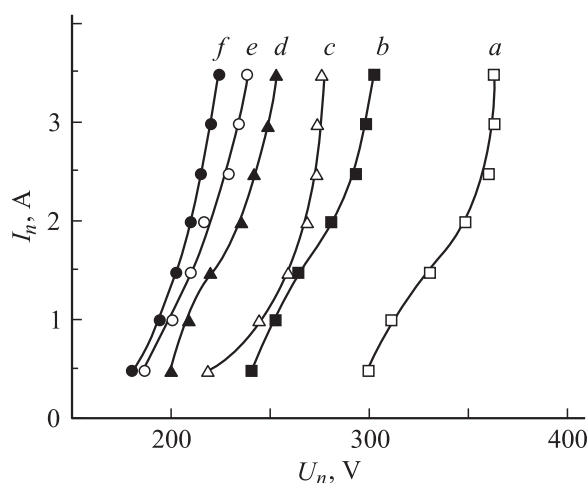


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика нейтрализатора при различном потоке рабочего газа: a — 2.5, b — 5, c — 7.5, d — 10, e — 12.5, f — 15 ml/min. Выходное отверстие $\varnothing 2 \text{ mm}$, катод — Ti, $\varnothing 20 \text{ mm}$.

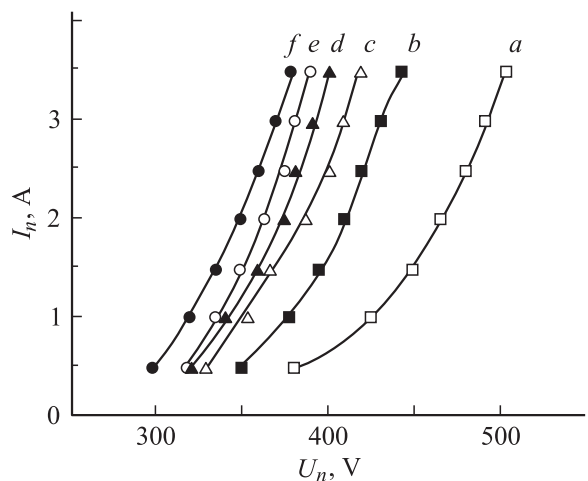


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика нейтрализатора при различном потоке рабочего газа: a–f — как на рис. 4. Выходное отверстие $\varnothing 2 \text{ mm}$, катод — Cu, $\varnothing 20 \text{ mm}$.

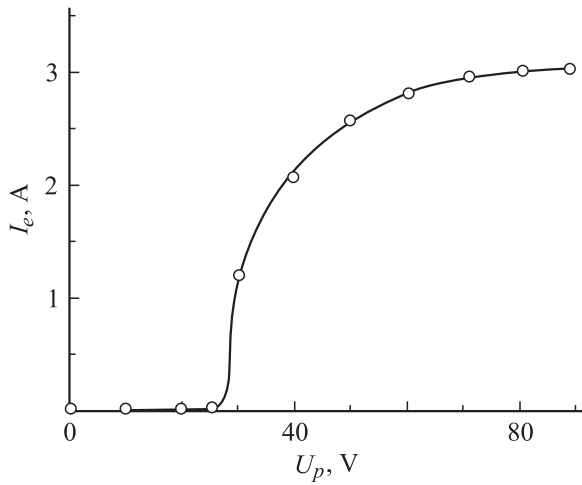


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика зонда.

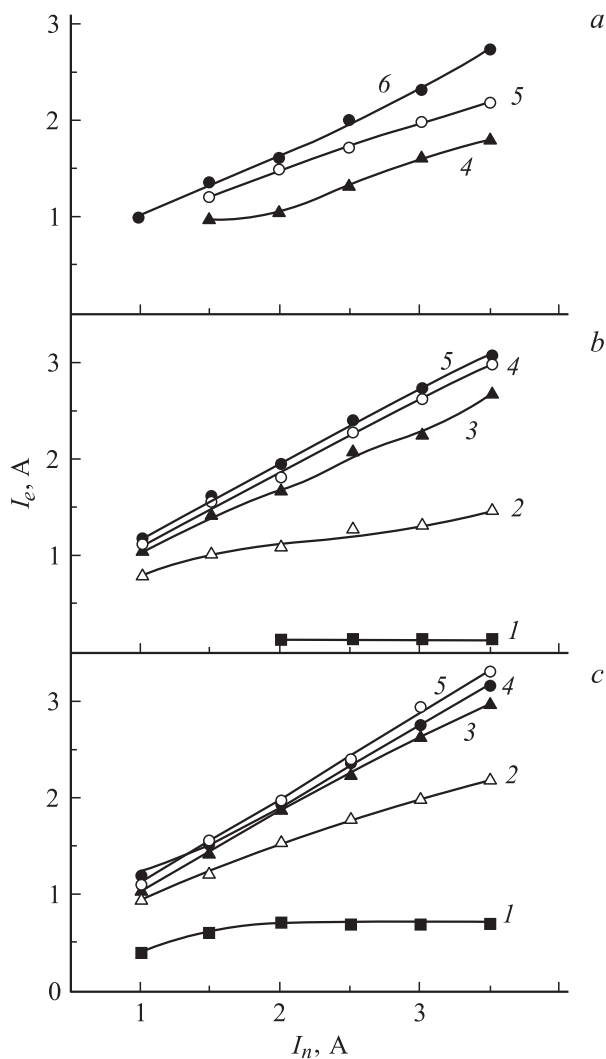


Рис. 7. Зависимости электронного тока от тока разряда нейтрализатора для различных диаметров эмиссионного отверстия: *a* — 1.6, *b* — 2, *c* — 2.5 mm. Расход рабочего газа: 1 — 5, 2 — 7.5, 3 — 10, 4 — 12.5, 5 — 15, 6 — 18 ml/min. Материал катода — Ti.

ставляло 250–400 V. Разряд нейтрализатора устойчиво существовал при расходе He от 6 до 60 ml/min.

При отсутствии положительного смещения на зонде электронный пучок отсутствовал, и все образующиеся в разрядной камере электроны попадали на анод нейтрализатора. Ток анода был равен току разряда нейтрализатора. При подаче на анод положительного смещения электронный пучок не возникал.

Электронный поток вытягивался из нейтрализатора при подаче на зонд положительного потенциала. На рис. 6 представлена зависимость электронного тока на зонд от напряжения смещения зонда. Как видно, насыщенные характеристики происходили при напряжении зонда более 60 V. Поэтому во всех экспериментах для снятия эмиссионных характеристик нейтрализатора использовалось положительное смещение зонда $U_p = 80$ V.

На рис. 7 и 8 представлены зависимости электронного тока от тока разряда нейтрализатора при использовании катодных вставок Ti и Cu диаметром 20 mm и Ar в качестве рабочего газа. Как видно, при низких расходах

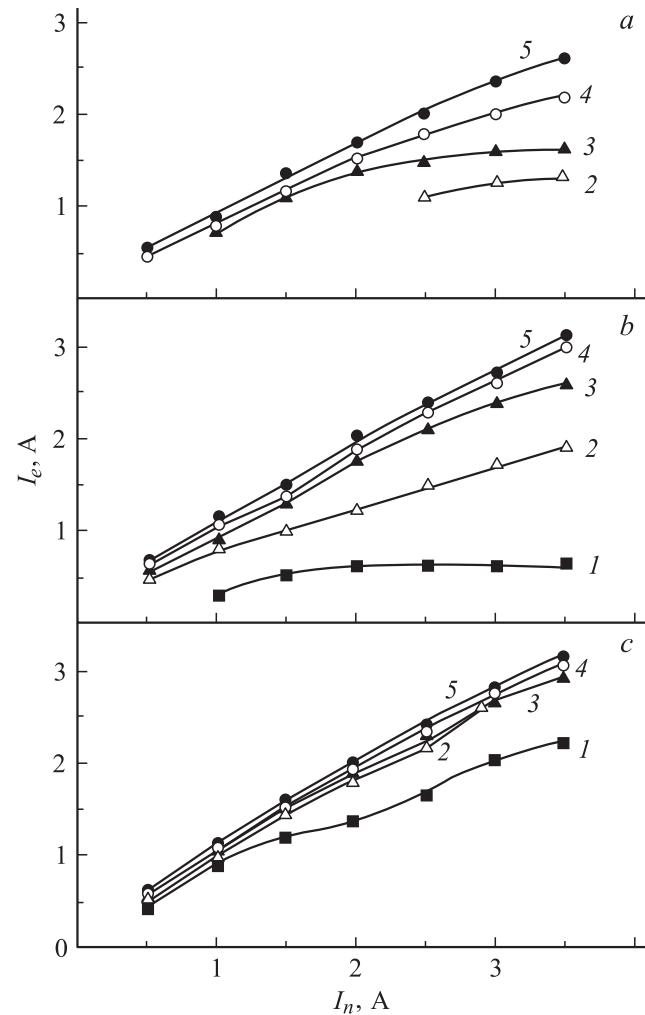


Рис. 8. Зависимость электронного тока от тока разряда нейтрализатора при различном диаметре эмиссионного отверстия: *a*–*c* — как на рис. 7. Расход рабочего газа: 1–5 — как на рис. 7. Материал катода — Cu.

рабочего газа ток электронного пучка был меньше тока разряда. При увеличении расхода рабочего газа ток эмиссии нейтрализатора увеличивался и достигал значений тока разряда. Ток разряда нейтрализатора был примерно равен сумме электронного тока и тока анода нейтрализатора. На некоторых режимах при эффективном извлечении электронов ток анода был практически равен нулю. Увеличение площади эмиссионного отверстия также приводило к увеличению тока электронного пучка при постоянном токе разряда. При использовании в качестве рабочего газа He электронный ток возникал при его потоке более 22 ml/min для Cu-катода и 25 ml/min для Ti катодной вставки. Следует отметить, что разряд устойчиво существовал и при меньших потоках He, но электронный ток не возникал даже при напряжении смещения зонда более 200 V. Максимальный электронный ток составил 2.05 A при потоке He 60 ml/min и использовании Ti-катода, и 1.9 A — при потоке He 40 ml/min и использовании Cu-катода.

На рис. 9 и 10 представлены зависимости электронного тока от расхода рабочего газа Ar при различном внутреннем диаметре катодной вставки и диаметре эмиссионного отверстия для катодов Ti и Cu. Характеристики получены при токе разряда нейтрализатора 3 A.

Как видно, при увеличении внутреннего диаметра катодной вставки и площади эмиссионного отверстия электронный ток достигал насыщения при меньшем потоке рабочего газа. Увеличение эффективности извлечения электронов за счет увеличения внутреннего диаметра катодной вставки можно объяснить увеличением индукции магнитного поля в магнитной ловушке и, как следствие, улучшением условий ионизации рабо-

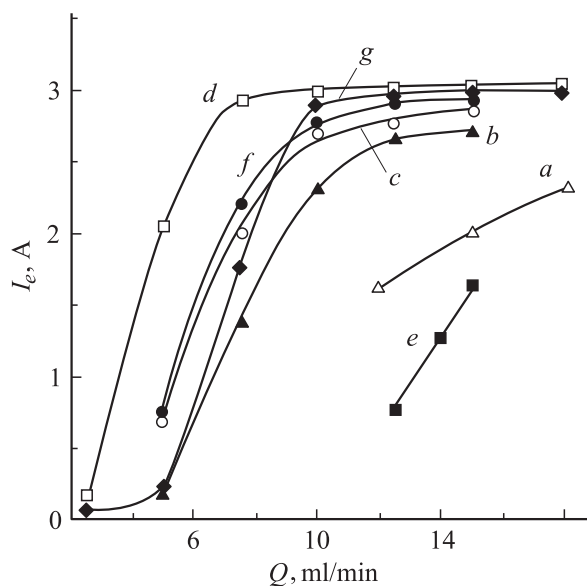


Рис. 9. Зависимость максимального электронного тока ПИЭЛ с Ti-катодом от расхода рабочего газа Ar при различном диаметре катода и выходного отверстия: *a* — 20, 1.6; *b* — 20, 2; *c* — 20, 2.5; *d* — 20, 3; *e* — 24, 1.6; *f* — 24, 2.0; *g* — 24 mm, 3 mm.

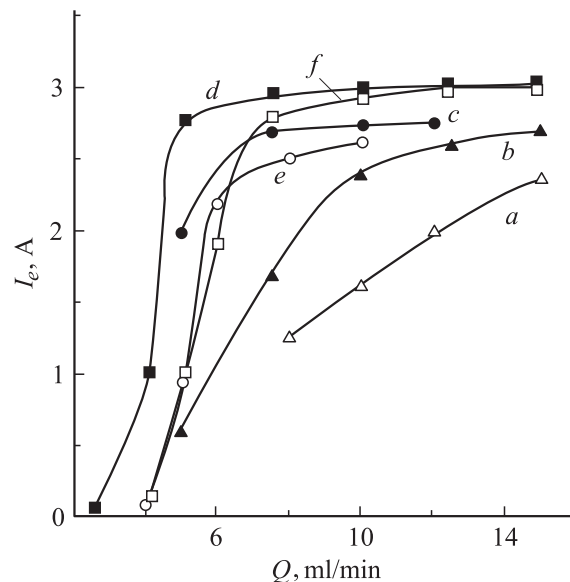


Рис. 10. Зависимость максимального электронного тока ПИЭЛ с Cu-катодом от расхода рабочего газа Ar при различном диаметре катода и выходного отверстия: *a* — 20, 1.6; *b* — 20, 2; *c* — 20, 2.5; *d* — 24, 3; *e* — 26, 1.6; *f* — 26 mm, 3 mm.

чего газа за счет создания условий для многократных осциллирующих энергетических электронов.

Хотя теоретически увеличение эмиссионного отверстия должно приводить к снижению давления в разрядной камере при постоянном потоке газа или недопустимому повышению давления в ускоряющем промежутке при постоянном давлении в разряде, не отмечено изменения зависимости зажигания разряда от потока газа при изменении диаметра эмиссионного отверстия. Рассчитанное по методике, приведенной в [9], давление в разрядной камере при потоке рабочего газа 10 ml/min при диаметрах эмиссионного отверстия 1.0, 1.6, 2.0 и 3.0 mm составляло соответственно 68, 35, 18, 8 и 2 Pa. Кроме того, увеличение эмиссионного отверстия должно усиливать связь между областью разряда и ускоряющим промежутком, что может вызвать нестабильность горения разряда и даже его погасание при высоком напряжении. Однако кроме небольшого снижения напряжения разряда ПИЭЛ не отмечено другого влияния напряжения вытягивающего электрода на характеристики разряда.

Оценить эффективность данного типа источника электронов можно путем сравнения физико-технологических параметров с другими типами ПИЭЛ. Степень использования плазмы в ПИЭЛ оценивается параметром эффективности извлечения.

$$\alpha = \frac{I_e}{I_d}, \quad (1)$$

где I_e — ток электронной эмиссии; I_d — ток разряда. Также важными характеристиками ПИЭЛ являются энергетическая эффективность и газовая экономичность.

Энергетическая эффективность выражается как

$$H = \frac{I_e}{P_d}, \quad (2)$$

где P_d — мощность, затраченная на получение электронного пучка. Газовую экономичность можно оценить с помощью следующего выражения

$$G = \frac{I_e}{Q}, \quad (3)$$

где Q — расход рабочего газа.

Рассчитанная эффективность извлечения электронов данного типа ПИЭЛ достигала единицы при потоке Ar более 6 ml/min для Cu катодной вставки и более 8 ml/min для Ti катодной вставки. Энергетическая эффективность при потоке рабочего газа Ar более 10 ml/min составила 4 mA/W для Ti-катода и 2.56 mA/W — для Cu-катода.

Источник электронов с медной вставкой показал большую газовую экономичность, которая составила $G = 30$ A/ml для Cu-катода и $G = 23$ A/ml — для Ti-катода. Если предположить, что электроны возникают в результате ударной ионизации атомов рабочего газа, то даже с учетом ионно-электронной эмиссии с поверхности катода коэффициент ионизации рабочего газа K_i достигал 4, т.е. каждый атом рабочего газа в среднем четыре раза ионизировался и нейтрализовался на поверхности катода. Однако работа источника электронов с Cu катодной вставкой в режиме самораспыления показала, что электроны возникают также в результате ионизации распыленного потока.

Из формулы (2) видно, что для увеличения энергетической эффективности ПИЭЛ необходимо снижать напряжение разряда при постоянной эффективности извлечения электронов. Теория тлеющего разряда показывает, что напряжение пробоя разряда U_b можно оценить по формуле

$$U_b = \frac{Bpd}{\ln\left(\frac{Apd}{\ln(1+1/\gamma)}\right)}, \quad (4)$$

где p — давление в разрядной камере, d — расстояние между электродами, γ — коэффициент ионно-электронной эмиссии, A и B — константы, которые имеют размерности [ion pairs/m · Pa] и [V/m · Pa] соответственно. Их значения для некоторых газов приведены, например, в [10]. Значение коэффициента ионно-электронной эмиссии зависит от энергии и сорта ионов, материала мишени, структуры и состояния бомбардируемой поверхности. Данные ряда измерений γ с различными комбинациями ионов и материалов мишеней с точностью порядка 50% укладываются в эмпирическую формулу [11]

$$\gamma \approx 0.016(E_b - 2e\varphi), \quad (5)$$

где E_b — потенциал ионизации атома газа бомбардирующего иона, $e\varphi$ — работа выхода материала мишени. Как видно из формул (4), (5), для снижения напряжения

разряда необходимо увеличивать γ , используя катод из материала с низкой работой выхода и рабочий газ с более высоким потенциалом ионизации. С данной точки зрения желательно использовать в качестве рабочего газа He $E_b = 24.48$ eV (для сравнения у Ar $E_b = 15.76$ eV) и в качестве материала катода — Ti $e\varphi = 3.95$ eV (для сравнения у Cu $e\varphi = 4.7$ eV). Однако поскольку γ входит в выражение под двумя логарифмами, зависимость пробивного напряжения от материала не очень существенна. Результаты показывают, что большую эффективность имеют ПИЭЛ с комбинацией материал катода–рабочий газ с большим коэффициентом распыления (например Cu–Ar). Возможно, в нашем случае большую роль играют процессы ионизации распыленных атомов материала катода. Использование He в качестве рабочего газа приводит к снижению коэффициента распыления и эффективность ПИЭЛ падает.

Заключение

Соответствующий выбор пары рабочий газ–материал катода, обеспечивающей более высокие значения коэффициента распыления, позволяет повысить эффективность ПИЭЛ. В качестве рабочего газа желательно использовать более тяжелые газы (Ar, Kr). Для катода желательно использовать материалы с высоким коэффициентом распыления и низким потенциалом ионизации (Cu, Ag), что позволяет увеличить газовую экономичность ПИЭЛ за счет ионизации распыленного потока.

Список литературы

- [1] Маишев Ю.П. // Микроэлектроника. 1977. № 3. С. 31–36.
- [2] Kaufman H.R. Advances in Electronics and Electron Physics / Ed. by L. Marton. NY: Academic Press, 1974. Vol. 36. P. 265.
- [3] Rehn L.R. // NASA Report. 1976. CR 135102.
- [4] Журков И.С., Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Осипов И.В. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 10. С. 128–131.
- [5] Reader P.D., White D.R., Isaacson G.C. // J. Vac. Sci. Techn. 1978. Vol. 15. N 3. P. 1093–1095.
- [6] Голосов Д.А., Сладковский И.В., Завадский С.М. // Электронная обработка материалов. 2002. № 6. С. 66–74.
- [7] Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966. 564 с.
- [8] Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 384 с.
- [9] Одинокое В.В. Шлюзовые системы в вакуумном оборудовании. М.: Высш. шк., 1981. 55 с.
- [10] Cobine J.D. Gaseous Conductors. NY: Dover, 1958. 355 p.
- [11] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.