УДК 621.384

Генерация объемной плазмы на основе сильноточного газового разряда с внешней инжекцией электронов

А. В. Визирь, Е. М. Окс, М. В. Шандриков, Г. Ю. Юшков
Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Представлены результаты исследований сильноточного газового разряда низкого давления с электронным эмиттером на основе дугового контрагированного разряда. Рассмотрены физические особенности процесса генерации плазмы в такой системе. Особенности конструкции электронного эмиттера обеспечивают длительный срок службы за счет уменьшения скорости эрозии дугового катода, а также уменьшают загрязнение газовой плазмы ионами и атомами металла. Напряжение горения в непрерывном режиме функционирования разряда составляет 50—150 В при токе разряда до 20 А. Показано, что при одновременной работе трех таких идентичных разрядных систем обеспечивается генерация однородной и стабильной газовой плазмы с концентрацией до 10^{11} см$^{-3}$ в объеме 1 м^3 при давлении в вакуумной камере уровня 10^{-3} Торр. Разрядная система отличается высокой энергетической эффективностью, однородностью концентрации генерируемой плазмы, возможностью работы с химически активными газами, простотой в настройке и обслуживании, большим сроком службы.

В последнее десятилетие интенсивное развитие получили следующие технологии трехмерной ионной обработки поверхности изделий: имплантация [1], очистка и травление перед нанесением покрытий, азотирование и др. Использование для этой цели объемной плазмы, по сравнению с обработкой мишени широкоапертурным ионным пучком, имеет ряд преимуществ, главным из которых является возможность одновременной обработки всей поверхности детали сложной объемной формы. Основными требованиями, предъявляемыми к устройствам, генерирующим объемную плазму для таких применений, являются: низкое рабочее давление, однородность генерируемой плазмы, низкий уровень загрязнений, высокий ресурс работы устройства.

Используемые в технологиях источники с накальным катодом [2] имеют известные недостатки, главным из которых является низкий ресурс термокатода, особенно при работе в активной газовой среде. Источники на основе тлеющих разрядов низкого давления [3] (магнетронный, пеннинговский, разряд с полым катодом) имеют более высокий ресурс и нечувствительны к воздействию агрессивных сред. Однако увеличение напряжения горения таких разрядов до уровня нескольких сотен вольт при понижении давления до 10^{-3} Торр приводит к интенсивному распылению катода и, как следствие, загрязнению генерируемой плазмы, а также к увеличению энергозатрат, которое делает невозможным генерацию достаточно интенсивного ионного потока при низком давлении. При этом поток нейтральных атомов на поверхность обрабатываемого изделия существенно превышает поток ионов, что затрудняет процесс обработки поверхности. Одним из возможных путей понижения минимального рабочего давления и напряжения горения тлеющего разряда является дополнительная инжекция электронов с энергией, достаточной для ионизации газа [4].

Использование вспомогательного тлеющего разряда для инжекции электронов в катодную область газового разряда в генераторе [5] позволило создать однородную плазму с концентрацией порядка $3\cdot10^{10}$ см$^{-3}$ в объеме 0,2 м^3 при достаточно низком давлении в вакуумной камере. К недостаткам такой системы относятся ограничение максимального тока эмиттера переходом вспомогательного тлеющего разряда в дугу и высокое напряжение горения вспомогательного разряда.

В основанном на таком же принципе генераторе [6] используется дуговой вспомогательный разряд с холодным катодом, что позволило обеспечить генерацию плазмы с концентрацией порядка $1\cdot10^{10}$ см$^{-3}$ в объеме 1 м^3. В то же время конструктивные особенности этого генератора не позволяют достигать разрядного тока выше, чем 10 А.

В настоящей статье представлена разрядная система, рассчитанная на разрядный ток 20 А при меньших габаритных размерах самого устройства.

Электродная система такого устройства схематично показана на рис. 1. Генератор плазмы представляет собой двухступенчатую систему. Первая ступень — вспомогательный разряд (эмиттер) с катодом 2 и сеточным анодом 6, вторая ступень — основной разряд с катодом 5 и анодом 7. Анод вспомогательного разряда и ка-

© Визирь А. В., Окс Е. М., Шандриков М. В., Юшков Г. Ю., 2004

тод основного разряда электрически соединены. Сетка 6 представляет собой элемент катода 5 с высокой эмиссионной способностью. Генератор плазмы установлен на торце технологической вакуумной камеры диаметром 1,3 м и длиной 80 см. Полый катод 2 эмиттера выполнен из магния. Катодное пятно функционирует на внутренней поверхности полого катода. Для предотвращения возникновения катодного пятна на внешней поверхности установлен изолированный экран 3 из нержавеющей стали. Все электроды генератора плазмы имеют проточное водяное охлаждение и изолированы от заземленной вакуумной камеры.

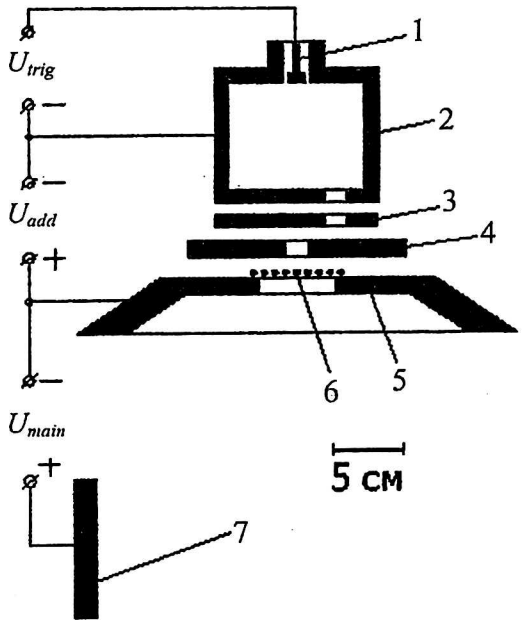

Рис. 1. Схема разрядной системы:
1 — поджигающий электрод; 2 — полый катод вспомогательного разряда; 3 — экран; 4 — контрагирующий электрод; 5 — катод основного разряда; 6 — сеточный анод вспомогательного разряда; 7 — анод основного разряда

Использование катода в виде полости с малым соотношением площади выходной апертуры к площади внутренней поверхности катода позволяет значительно увеличить ресурс источника за счет многократного использования материала катода.

Промежуточный электрод 4 имеет щелевой канал контрагирования с размерами 1х60 мм, расположенный напротив сетки, перекрывающей эмиссионное окно с размерами 20х70 мм катода 5 основного разряда. Функция промежуточного электрода — равномерное распределение электронного потока по длине сетки для уменьшения тепловой нагрузки, а также (вместе с использованием катода эмиттера в виде полости) предотвращение попадания в вакуумную камеру продуктов эрозии катода. С этой целью выходное отверстие катода эмиттера несколько смещено относительно оси канала контрагирования.

Напуск рабочего газа осуществляется в полость катода эмиттера. Измерения показывают, что давление в полости катода эмиттера составляет порядка 10^{-2} Торр. Перепад давления, возникающий при протекании газа через отверстия в полом катоде и контрагирующем электроде, с одной стороны, позволяет уменьшить рабочее давление в области генерации объемной плазмы, а с другой — способствует стабильному зажиганию и горению вспомогательного разряда.

Инициирование вспомогательного разряда осуществляется сильноточным газовым разрядом при подаче высоковольтного импульса (5 кВ, 35 мкс) между поджигающим электродом 1 и полым катодом 2. Как видно из осциллограммы (рис. 2), первоначально между поджигающим электродом и катодом эмиттера зажигается сильноточный тлеющий разряд с напряжением около 400 В и током около 40 А, приводя к инициированию катодное пятно (15—20 мкс от начала импульса). При приложении постоянного напряжения 600 В между катодом 2 и анодом 6 (см. рис. 1) зажигается дуговой контрагированный разряд. В целях уменьшения габаритов источник питания вспомогательного разряда состоял из двух источников, соединенных параллельно: слаботочного высоковольтного (1 мА, 700 В) и сильноточного низковольтного (20 А, 70 В).

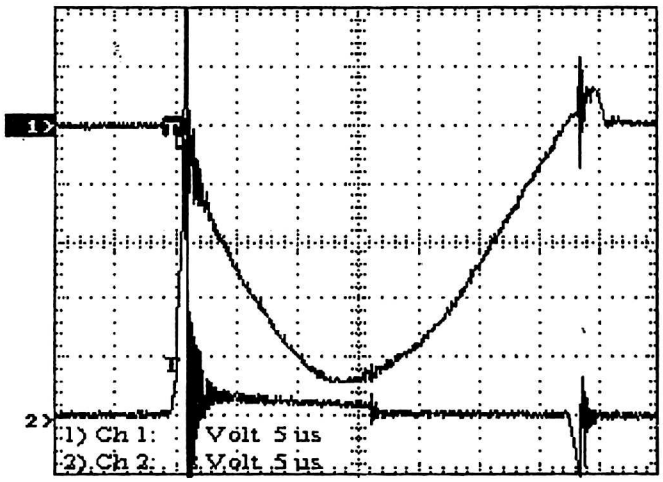

Рис. 2. Осциллограмма поджигающего импульса:
верхний луч — ток разряда (инвертированный), 10 А/дел.; нижний луч — напряжение разряда, 1 кВ/дел; Ar

Напряжение горения вспомогательного разряда составляет 30—40 В в диапазоне токов 3—20 А. Вспомогательный разряд имеет слаборастущую ВАХ. Часть электронного потока (20—30 %), эмитируемого плазмой вспомогательного разряда, оседает на сетке, замыкая ток вспомогательного разряда, в то время как большая часть электронов проходит в область основного разряда. В катодном слое основного разряда происходит дополнительное ускорение этих электронов до энергии, необходимой для эффективной ионизации газа. Тот факт, что сечение упругого рассеяния на атомах рабочего газа существенно превышает сечение ионизации [7], приводит к тому, что первоначально узконаправленный пучок инжектированных электронов равномерно

рассеивается в объеме разрядной камеры. Это, в свою очередь, заметно снижает пространственную неоднородность генерируемой плазмы. Использование анода основного разряда достаточно малой площади (1 % от площади внутренней поверхности камеры) увеличивает среднюю длину релаксации инжектированных электронов. За счет большей подвижности электронов плазма основного разряда имеет положительный потенциал относительно стенок вакуумной камеры величиной порядка 10—20 В. Объемная газовая плазма в этом случае практически не подвергается загрязнению продуктами распыления стенок вакуумной камеры, поскольку энергия ионов, бомбардирующих стенки, также составляет порядка 10—20 эВ, что соответствует коэффициенту распыления менее чем 10^{-6} атом/ион.

Измерения параметров плазмы осуществлялись с применением подвижных зондов, размещенных на расстоянии 50 см от генератора. Для измерения потенциала плазмы использовался эмиссионный зонд, выполненный из вольфрамовой проволоки толщиной 50 мкм. Концентрация плазмы определялась по ионному току насыщения плоского ленгмюровского зонда с охранным кольцом и площадью собирающей поверхности 5 $см^2$. Энергетическая эффективность устройства оценивалась через суммарный ионный ток на стенки камеры. Зонды размещались непосредственно на поверхности стенок. Для исключения влияния расширения слоя, собирающего ионы, над зондом располагалась экранная сетка, имеющая потенциал заземленной камеры.

На рис. 3 представлена вольт-амперная характеристика основного разряда, а также зависимость концентрации объемной плазмы и энергетической эффективности в зависимости от напряжения основного разряда при постоянном токе вспомогательного разряда. Поскольку ток основного разряда преимущественно определяется током вспомогательного разряда, то для формирования более плотной объемной однородной плазмы при постоянном давлении возможно как дальнейшее увеличение тока инжектируемых электронов, так и увеличение их энергии. Из представленной зависимости следует, что по мере увеличения напряжения основного разряда начиная с некоторого значения, определяемого точкой насыщения тока основного разряда, эффективность устройства в целом будет заметно снижаться. Положение точки насыщения в ВАХ основного разряда определяется средней длиной ионизации и связано с размерами камеры, давлением и энергией инжектированных электронов. В то же время с ростом тока инжектируемых электронов увеличивается собственное магнитное поле электронного пучка, которое приводит к фокусировке инжектированных электронов. Это в свою очередь заметно искажает распределение концентрации плазмы по объему.

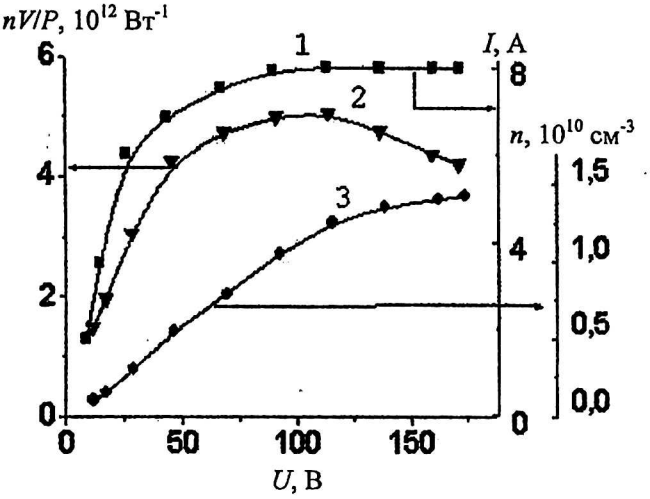

Рис. 3. Зависимость тока основного разряда (1), эффективности генерации плазмы (2) и концентрации объемной плазмы (3) от напряжения основного разряда ($I_{add.d}$ = 8 A; p = 5·10⁻⁴ Topp, Ar)

Оценки показывают, что собственное магнитное поле электронного пучка начинает оказывать заметное влияние на радиальное распределение плотности тока инжектированных электронов при токе пучка, превышающем 10 А. О влиянии самофокусировки говорит также эксперимент, в котором по оси инжектируемых электронов через камеру проходил изолированный проводник, по которому пропускался встречный ток, равный по величине току инжектируемых электронов. Магнитные поля электронного пучка и проводника компенсировали друг друга, что приводило к расфокусировке электронов, подтверждаемое как визуальными наблюдениями, так и измерениями распределения концентрации плазмы по объему. Также для выравнивания распределения при больших токах успешно применялась рассеивающая сетка, которая находилась под потенциалом катода основного разряда на расстоянии 4 см от его эмиссионного окна.

Было реализовано одновременное функционирование трех идентичных генераторов плазмы, расположенных на одной вакуумной камере, с током вспомогательного разряда каждого генератора, не превышающим 20 А. Выбранные значения напряжения основного разряда определялись точкой перегиба кривой, характеризующей энергетическую эффективность устройства. Для трех генераторов плазмы использовался один общий анод основного разряда. Пространственное распределение плотности плазмы для такого режима работы представлено на рис. 4.

Для измерения энергии заряженных частиц в плазме основного разряда использовался 127-градусный электростатический энергоанализатор

типа цилиндрического дефлектора (анализатор Юза-Рожанского) [8]. Габаритные размеры анализатора 150×160×100 мм. Перед входом в него располагалась двухсеточная извлекающая система. Для регистрации сигнала использовался плоский коллектор. Для уменьшения расфокусирующего влияния пространственного заряда пучка внутри анализатора, а следовательно, улучшения его разрешения входное отверстие анализатора использовалось достаточно малого размера (диаметр 0,8 мм). В целях устранения помех питающей сети и наводок для питания коллектора анализатора использовался заряженный до необходимого напряжения конденсатор. Время уменьшения потенциала коллектора на 1 В составляло около 1 ч. Для питания отклоняющих пластин использовалась схема генератора импульсного напряжения (τ_{pul} = 70 мс), изолированная от питающей сети. Питание отклоняющих пластин симметричное, относительно входной и приемной диафрагм, находящихся под потенциалом ускоряющего напряжения. Вся схема питания и измерения располагалась в экранирующем корпусе. Для калибровки анализатора проводилось предварительное тестирование на электронах с термоэмиттера.

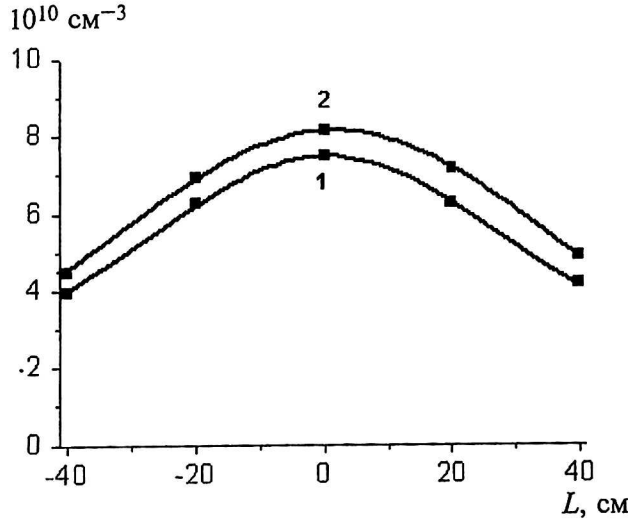

Рис. 4. Распределение концентрации плазмы:
1 — $U_{m.d}$ = 90 В; 2 — $U_{m.d}$ = 110 В (расстояние от зонда до генераторов 55 см, $I_{add.d}$ = 3×20 А, $p = 2 \cdot 10^{-3}$ Торр, Ar)

На рис. 5 представлены спектры электронов из объемной плазмы для нескольких значений напряжения горения основного разряда при постоянном токе вспомогательного разряда. Измерения проводились на расстоянии 40 см от плоскости катода основного разряда. Спектры состояли из двух групп: плазменных электронов и электронов, имеющих направленную энергию, полученную в результате ускорения в катодном падении основного разряда. С увеличением напряжения основного разряда максимальная энергия высокоэнергетичных электронов также растет.

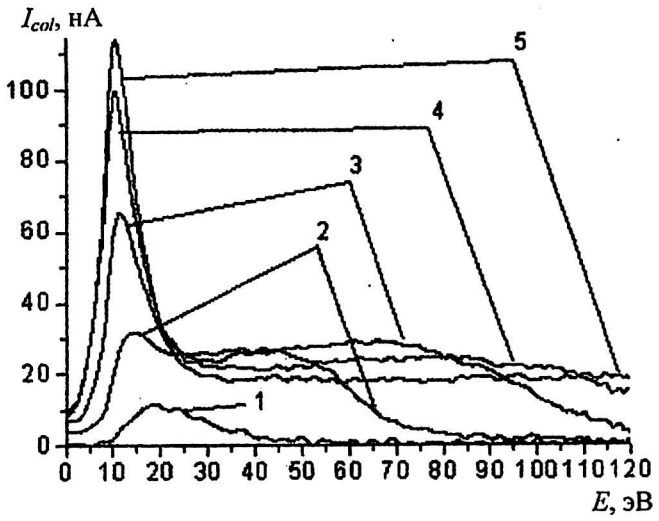

Рис. 5. Спектры электронов из плазмы основного разряда:
1 — U_m = 0 В; 2 — U_m = 20 В; 3 — U_m = 50 В; 4 — U_m = 70 В; 5 — U_m = 100 В; I_{add} = 3 А, $p = 6 \cdot 10^{-4}$ Торр, Ar

Необходимо принимать во внимание также тот факт, что распределение по энергиям электронов, извлекаемых из плазмы и попадающих в анализатор, не соответствует реальному распределению электронов по энергиям в самой плазме. Так как электронов с большей энергией будет попадать в анализатор в большем количестве за счет того, что у них выше скорость, пучок будет обогащен более быстрыми частицами. Поскольку вероятность попадания в анализатор электрона, имеющего определенную скорость в плазме, будет пропорциональна этой скорости, то для получения истинного распределения электронов по энергиям в плазме полученные результаты необходимо разделить на корень из энергии.

Ресурсные испытания одновременной работы трех генераторов плазмы показали стабильную работу в течение более 100 ч, при этом заметных изменений параметров плазмы или характеристик устройства замечено не было.

Авторы благодарны сотрудникам отдела физической электроники Института сильноточной электроники СО РАН Д. М. Гришину и В. П. Губанову за разработку источников питания для генераторов плазмы.

Литература

1. Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition // Edited by A. Anders. New York, Wiley, 2000

2. *Алямовский И. В.* Электронные пучки и электронные пушки. — М.: Сов. радио, 1966.

3. *Семенов А. П.* Пучки распыляющих ионов: получение и применение. — Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999.

4. *Визирь А. В., Окс Е. М., Юшков Г. Ю.* Ионно-эмиссионные свойства несамостоятельного тлеющего разря-

да с полым катодом.// Известия вузов. Сер. Физика. 1999. № 2. С. 14—17.

5. *Vizir A. V., Yushkov G. Yu., Oks E. M.* Development of gaseous ion and plasma sources based on hollow cathode glow discharge with electron injection.// Proceedings of 5th Conference on Modification of materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk. 2000. P. 190—193.

6. *Визирь А. В., Окс Е. М., Шандриков М. В., Юшков Г. Ю.* Генератор объемной плазмы на основе разряда с плазменным катодом // ПТЭ. 2003. № 3. С. 108—111.

7. Физические величины. Справочник/Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 393, 424.

8. *Hughes A. L., McMillen J. H.* Re-focussing of electron paths in a radial electrostatic field. // Phys.Rev. 1929. № 34. P. 291.

Bulk plasma generation based on high-current gaseous discharge with external electron injection

A. V. Vizir, E. M. Oks, M. V. Shandrikov, G. Yu. Yushkov
Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

Results of experimental study of low-pressure, high-current gaseous discharge with electron emitter based on constricted arc discharge are presented. Physical features of plasma generation in such system are discussed. Special features of the electron emitter design provide a long lifetime due to decrease of arc cathode erosion rate, as well as decrease of contamination of gaseous plasma by metal ions, atoms and particles. The main discharge voltage is 50—150 V and the main discharge current is up to 20 A in DC mode. It is shown that simultaneous operating of three discharge systems provides formation of uniform and stable gaseous plasma in the volume of 1 m^3 with plasma density up to 10^{11} cm^{-3} at operating gas pressure in the vacuum chamber of 10^{-3} Torr. The discharge system is characterized by high efficiency of energy utilization, plasma density uniformity, possibility to operate with chemically active gases, simplicity of set-up and maintenance and long lifetime.