

**FEATURES OF PLASMA CONCENTRATION DISTRIBUTION
IN GAS-METAL BEAM-PLASMA FORMATIONS**

*Mikhail Viktorovich Savchuk^a, Vladimir Viktorovich Denisov, Yuliya Aleksandrovna Denisova,
Sergey Sergeevich Kovalskiy, Andrey Andreevich Leonov*

Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/3 Akademicheskoy
avenue, Tomsk, 634055, Russia

^a mixail96@bk.ru

ABSTRACT

In this paper, the azimuthal distributions of the concentration of charged particles in gas beam-plasma formation and gas-metal beam-plasma formation, as well as in gas and gas-metal plasma in a traditional discharge scheme for vacuum arc plasma-assisted deposition are investigated. The obtained values of the inhomogeneity coefficient for gas-metal beam-plasma formation and plasma formation obtained in a traditional discharge circuit are 81% and 97%, respectively. The average electron temperature in the discharge circuit for generating gas-metallic beam-plasma formations is 2.3 eV, and the traditional discharge circuit has an electron temperature of 1.5 eV. The increased temperature of electrons in the gas-metal beam-plasma formation is a feature of this system. The increased electron temperature affects the properties of the formed plasma formation and the formation of coatings in it.

KEYWORDS

Vacuum-arc discharge; depositing coatings; glow discharge; beam-plasma formation; plasma assisting; gas-metal plasma.

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ
В ГАЗО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ**

*Михаил Викторович Савчук^a, Владимир Викторович Денисов, Юлия Александровна Денисова,
Сергей Сергеевич Ковальский, Андрей Андреевич Леонов*

Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3

^a mixail96@bk.ru

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследуются азимутальные распределения концентрации заряженных частиц в газовом пучково-плазменном образовании и газо-металлическом пучково-плазменном образовании (ППО), а также в газовой и газо-металлической плазме в традиционной разрядной схеме для вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления. Полученные значения

коэффициента неоднородности для газо-металлического ППО и плазменного образования, полученного в традиционной разрядной схеме, составляют 81% и 97% соответственно. Средняя температура электронов в разрядной схеме для генерации газо-металлических ППО составляет 2,3 эВ, а традиционной разрядной схеме температура электронов равна 1,5 эВ. Повышенная температура электронов в газо-металлическом ППО является особенностью данной системы. Повышенная температура электронов оказывает влияние на свойства формируемого плазменного образования и на формирование покрытий в нем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Вакуумно-дуговое напыление; плазменное ассистирование; упрочняющие покрытия; пучково-плазменное образование; газо-металлическая плазма.

Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется нанесению функциональных и упрочняющих покрытий на поверхности режущих инструментов, деталей и на элементы устройств. Среди большого количества способов нанесения покрытий особенно выделяются пучковые и плазменные технологии нанесения покрытий. Вакуумно-дуговой плазменно-ассистированный метод напыления покрытий хорошо известен и широко применяется для нанесения упрочняющих покрытий, а также применяется в автомобильных, космических, медицинских отраслях промышленности [1–6]. Несмотря на высокую перспективность, существует ряд проблем, препятствующих внедрению в производственные циклы цифрового интеллектуального автоматизированного оборудования на этой основе. Особенно это касается систем, в которых требуется создавать объемно-однородную плазму в больших ($>0,1 \text{ м}^3$) вакуумных объемах. Имеется ряд сложностей с обеспечением требуемой степени неоднородности плазмы [7–11]. Формирование плазмы с низкой степенью неоднородности и возможность независимой регулировкой всех рабочих параметров может быть обеспечена несамостоятельным тлеющим разрядом с полым катодом.

Синтезируемая в полном катоде тлеющего разряда с внешней инжекцией электронов плазма по методу ее генерации может быть

отнесена к пучково-плазменным образованиям [12]. Пучково-плазменное образование (ППО) представляет собой плазменную среду, основные свойства которой (концентрация, температура электронов, потенциал плазмы) определяются пучком частиц, в данном случае, электронов, инжектируемых в электро-разрядную систему, обеспечивающую зажигание и горение разряда в определенном диапазоне рабочих параметров по давлению, току, напряжению горения. Это позволяет применять ППО для решения научных и технических задач [13, 14].

В работе [15] автор сравнивает многокомпонентное покрытие $(\text{Zr}+\text{TiBSiNi})\text{N}$, напыленное вакуумно-дуговым плазменно-ассистированным методом с газо-металлическими ППО. В результате твердость покрытия в первом случае составила 40,9 ГПа, во втором – 47,8 ГПа. Также в работе [16] исследовался элементный состав многослойного покрытия TiAl/TiAlN , напыленного в пучково-плазменном образовании. Содержание алюминия уменьшилось на 8 ат.%, что, по словам автора, связано с повышенной средней величиной плотности тока ионов на поверхности формируемого покрытия.

Основной целью данной работы является исследование азимутальных распределений концентрации плазмы газового ППО и газо-металлического ППО, а также газовой плазмы и газо-металлической плазмы, формируемой в разряде с полым анодом, с помощью зондовых характеристик.

1. Методика исследований

Исследование закономерностей генерации объемно-однородных газо-металлических пучково-плазменных образований на равномерность распределения концентрации газовой и газо-металлической плазмы в рабочем объеме вакуумной камеры проводилось на экспериментальном стенде, собранном на основе промышленной установки ННВ-6.6-И1.

Исследования проводили в двух разрядных схемах. Разрядная для генерации газо-металлического пучково-плазменного образования представлена на рис. 1, а. Для сравнения, в том же вакуумном объеме были проведены подобные исследования разряда с традиционной электродной схемой, предназначенной для плазменно-ассистированного вакуумно-дугового напыления покрытий (представлена на рис. 1, б).

В традиционной разрядной схеме, представленной на рис. 1, б, стен-

ки вакуумной камеры, имеющие размеры $650 \times 650 \times 650$ мм, являются анодом для источника газовой плазмы «ПИНК» и для двух электродуговых испарителей с титановым и алюминиевыми катодами, предназначенными для генерации металлической плазмы.

В разрядной схеме, представленной на рис. 1, а, газо-металлическое пучково-плазменное образование формировалось в полом катоде несамостоятельного тлеющего разряда. Несамостоятельный тлеющий разряд зажигался между стенками вакуумной камеры, являющимися катодом, и кольцевыми анодами, представленными на рис. 2. Кольцевые аноды также являются анодами для вакуумно-дуговых испарителей, являющихся генераторами металлической плазмы. В качестве материалов катодов для вакуумно-дуговых испарителей использовались цилиндрические катоды диаметром 80 мм из титана марки ВТ 1-0 и алюминия марки А7.

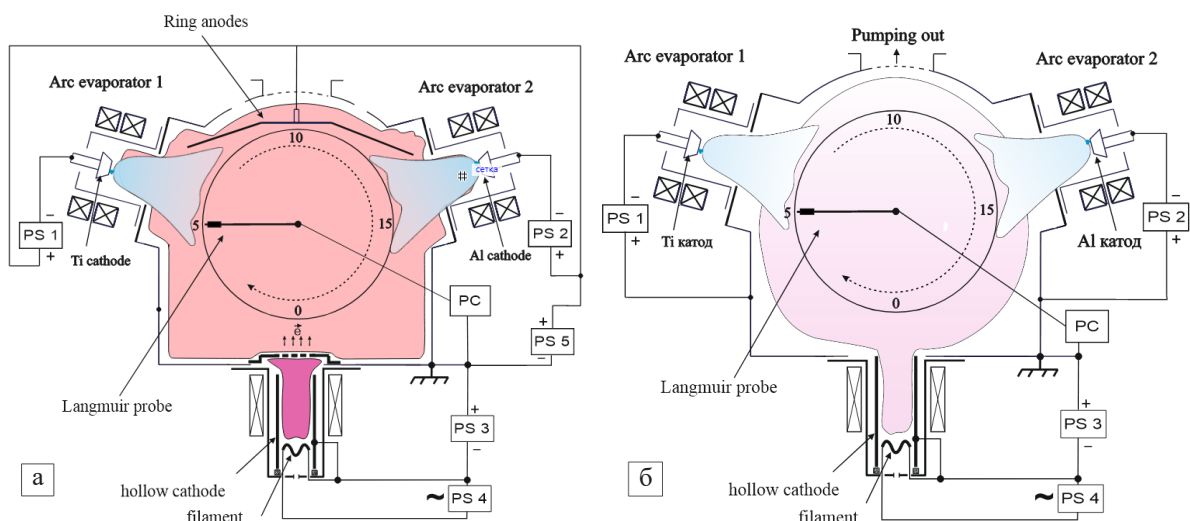


Рис. 1. Схемы экспериментальных установок для реализации процессов плазменно-ассистированного напыления:

а – разрядная схема для генерации газо-металлического пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом; б – традиционная разрядная схема

Fig. 1. Schemes of experimental installations for the implementation of vacuum-arc plasma-assisted deposition of coatings:

a – discharge scheme for generating gas-metal beam-plasma formation in a non-self-contained glow discharge with a hollow cathode; б – traditional discharge scheme

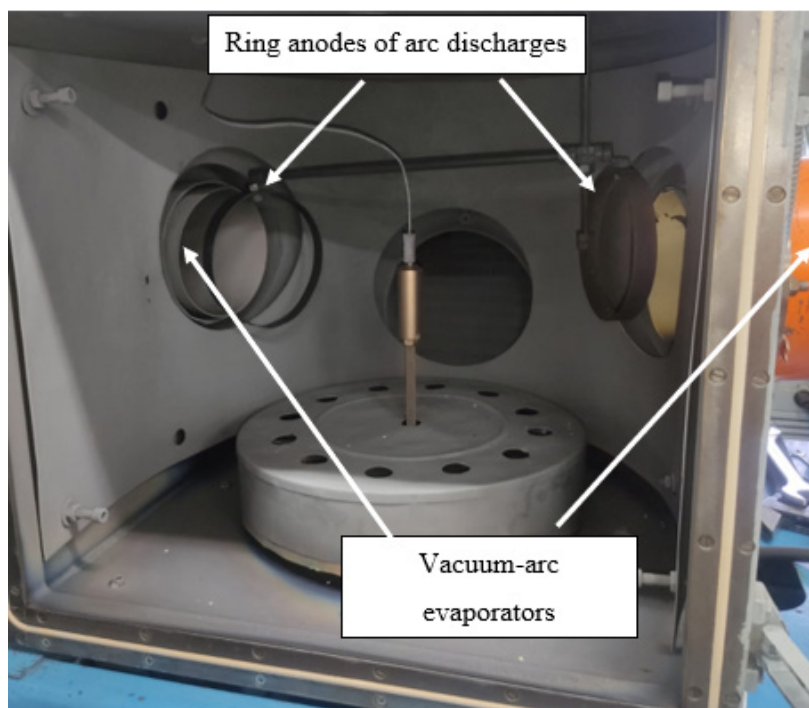


Рис. 2. Расположение кольцевых анодов в вакуумной камере

Fig. 2. Arrangement of annular anodes in the vacuum chamber

Для стабильного горения несамостоятельного тлеющего разряда при низких давлениях, использовалась дополнительная инжекция электронов из плазмы несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым и полым катодом, формируемого источником плазмы «ПИНК». Электрод, являющийся анодом несамостоятельного дугового разряда, перекрывался мелкоструктурной сеткой с размером ячейки $0,4 \times 0,4$ мм, и имел потенциал полого катода тлеющего разряда.

В обеих схемах были проведены измерения распределения газовой (эксперимент № 1, 2) и газо-металлической плазмы (эксперимент № 3, 4) с помощью зондовых измерений. При исследовании газовой плазмы в качестве рабочего газа использовалась аргон-азотная смесь с соотношением газов 1:9. Напуск газа осуществлялся через источник газовой плазмы «ПИНК». Рабочее давление в процессе проведения эксперимента равнялось 0,5 Па. Исследования газо-метал-

лической плазмы проводились в режимах, определенных на основе результатов более ранних исследований плазменно-ассистированного вакуумно-дугового осаждения жаростойких нитридных покрытий системы TiAlN на основе интерметаллидов Ti и Al [2, 3, 17].

По результатам проведенных ранее исследований за базовый режим напыления в разрядной схеме, предназначенной для генерации пучково-плазменного образования в несамостоятельном тлеющем разряде с полым катодом, был принят режим, представленный в табл. 1. Режим напыления, соответствующий традиционной разрядной схеме, представлен в табл. 2 и подбирался таким образом, чтобы количество поступающей в разрядный промежуток мощности в обоих случаях было одинаковым и составляло 2700 Вт до включения источников металлической плазмы и 6900 Вт при работающих вакуумно-дуговых испарителях.

Таблица 1. Параметры базового режима в разрядной схеме для генерации пучково-плазменного образования**Table 1.** Parameters of the basic mode in the discharge circuit for generating beam-plasma formation

Газ / Gas	Ток и напряжение нитей накала плазмодгенератора «ПИНК» / Current and voltage of the filaments of the “PINK” plasma generator	Ток и напряжение горения газового разряда плазмодгенератора «ПИНК» / Current and voltage of combustion of gas discharge of plasma generator “PINK”	Ток и напряжение горения несамостоятельного тлеющего разряда / Current and voltage of combustion of non-self-sustaining glow discharge	Ток вакуумно-дугового испарителя (Ti катод) / Vacuum arc evaporator current (Ti cathode)	Ток вакуумно-дугового испарителя (Al катод) / Vacuum arc evaporator current (Al cathode)
Ar / N ₂	I _н , А (U _н , В)	I _р , А (U _р , В)	I _р , А (U _р , В)	I _д , А	I _д , А
0,1/0,9	90 (10)	20 (40)	15 (66)	80	60

Таблица 2. Параметры базового режима в разрядной схеме вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления покрытий**Table 2.** Parameters of the basic mode in the discharge circuit for vacuum-arc plasma-assisted depositing of coatings

Газ / Gas	Ток и напряжение нитей накала плазмодгенератора «ПИНК» / Current and voltage of the filaments of the “PINK” plasma generator	Ток и напряжение горения газового разряда плазмодгенератора «ПИНК» / Current and voltage of combustion of gas discharge of plasma generator “PINK”	Ток вакуумно-дугового испарителя (Ti катод) / Vacuum arc evaporator current (Ti cathode)	Ток вакуумно-дугового испарителя (Al катод) / Vacuum arc evaporator current (Al cathode)
Ar / N ₂	I _н , А (U _н , В)	I _р , А (U _р , В)	I _д , А	I _д , А
0,1/0,9	90 (10)	45 (40)	80	60

Исследование азимутальных распределений концентрации плазмы проводилось с использованием одиночного цилиндрического зонда Ленгмюра диаметром 0,3 мм и длиной 5 мм. Регистрация данных производилось с помощью автоматизированной системы зондовых измерений. Для измерения азимутальных распределений концентрации плазмы зонд вращался по окружности внутри вакуумной камеры на расстоянии 250 мм от центра камеры и на высоте 285 мм от дна камеры. Расположение зонда внутри вакуумной камеры показано на рис. 3.

Для каждого выбранного режима эксперимента снимались зондовые характери-

стики по 20 точкам, по которым полуграфическим методом рассчитывался потенциал плазмы. Температура электронов определялась из зондовой характеристики, построенной полуграфическим методом. Концентрация плазмы рассчитывалась по электронной ветви зондовой вольт-амперной характеристики и уточнялась из расчетов ионного тока на зонд [18].

Измерения проводились по 20 точкам за счет вращения зонда относительно центра вакуумной камеры. Позиции зонда при измерении в 5й (90°), 10й (180°), 15й (270°) и 20й (0°) точках показаны на схемах экспериментальных установок (рис. 1).

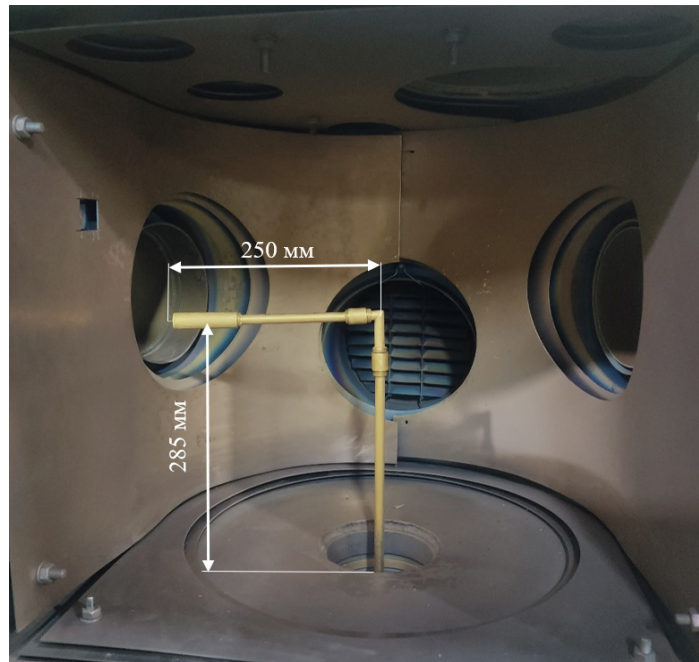


Рис. 3. Расположение зонда Ленгмюра в вакуумной камере
 Fig. 3. Location of the Langmuir probe in the vacuum chamber

2. Результаты и их обсуждение

Из полученных данных, представленных на рис. 4, видно, что увеличение концентрации плазмы наблюдается в точках 0 (0°), 1 (18°), 19 (342°) для всех четырех экспериментов, что соответствует выходной апертуре источника газовой плазмы «ПИНК».

В процессе измерения зондовых характеристик [19, 20] в точке 0 зонд располагался в непосредственной близости от эмиссионной сетки. В результате поток электронов, испускаемый этой сеткой, замыкался на зонд, что привело к получению завышенных значений концентрации плазмы, не соответствующих реальным условиям.

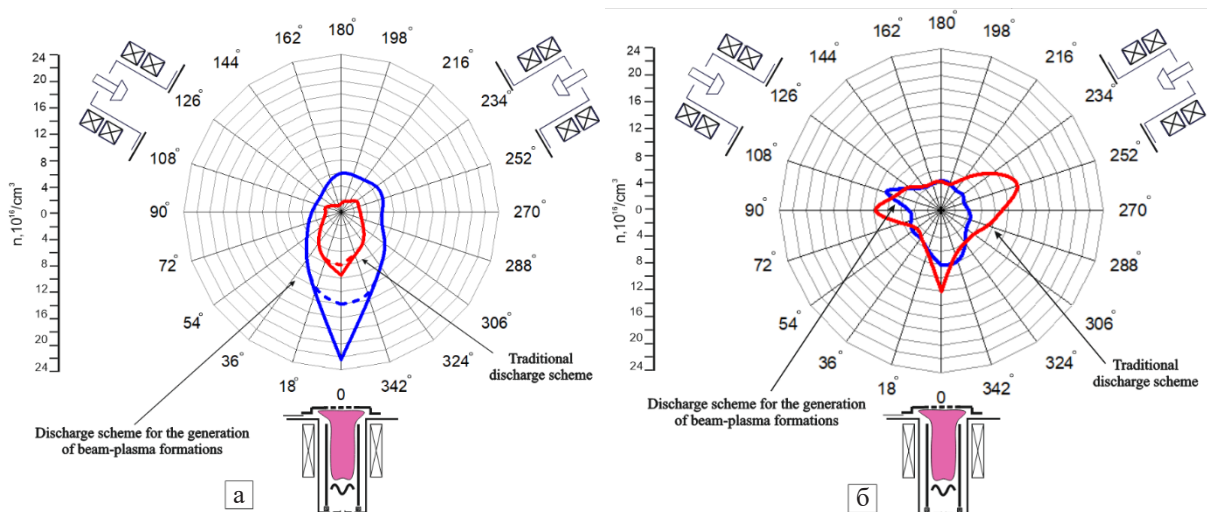


Рис. 4. График распределения величины концентрации газовой плазмы (а) и газо-металлической плазмы в вакуумной камере (б)

Fig. 4. Distribution of the concentration of gas plasma (a) and gas-metal plasma (b) in a vacuum chamber

В экспериментах № 3 и № 4, помимо генератора газовой плазмы, были задействованы генераторы металлической плазмы. Это вызвало повышение концентрации плазмы в непосредственной близости от выходных апертур вакуумно-дуговых испарителей.

Увеличение концентрации плазмы наблюдается в диапазоне углов от 90° до 144° , а также от 216° до 270° . Это можно объяснить тем, что в этих областях происходит формирование газо-металлической плазмы, формируемой катодным пятном вакуумно-дугового испарителя и потоком заряженных частиц с поверхности катода, имеющего направленный характер. Из-за хаотичного движения катодного пятна по поверхности катода при прямом попадании частиц, эмитируемых с катода, на зонд наблюдается некорректный, завышенный, результат измерений.

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что в экспериментах №1 и №2 значения коэффициентов неравномерности

выше по сравнению с экспериментами №3 и №4. Как известно, вблизи выходной апертуры генераторов плазмы находится область максимального значения концентрации плазмы. При использовании в разрядной схеме двух дополнительных генераторов металлической плазмы происходит выравнивание коэффициента неравномерности и увеличения среднего значения концентрации плазмы в разрядном промежутке. Для газо-металлического пучково-плазменного образования, формируемого в полой катодной несамостоятельной тлеющей разрядке, среднее значение концентрации плазмы ниже, чем в газовом ППО. Предположительно, полученные значения концентрации плазмы уменьшаются в следствии кратковременного возникновения отрицательного потенциала плазмы, возникающими из-за характерного горения дугового разряда. Отрицательный потенциал плазмы приводит к снижению энергии извлекаемых электронов, что и приводит к снижению концентрации плазмы.

Таблица 3. Результаты расчета коэффициента неравномерности

Table 3. The results of calculating the coefficient of unevenness

№ эксперимента / Experiment No.	Разрядная схема / Discharge scheme	Вакуумно-дуговые испарители / Vacuum-arc evaporator	Среднее значение концентрации плазмы / Average plasma concentration	Максимальное значение концентрации плазмы / Maximum plasma concentration	Коэффициент неравномерности / Coefficient of unevenness
			n_{av} , $1/cm^3$	n_{max} , $1/cm^3$	$(n_{max} - n_{av}) / n_{av}$, %
1	ППО / Beam-plasma formation (Fig. 1, a)	Off	$7,43 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	102%
2	Традиционная / Traditional scheme (Fig. 1, б)	On	$3,62 \cdot 10^{16}$	$8 \cdot 10^{16}$	121%
3	ППО / Beam-plasma formation (Fig. 1, a)	On	$5,3 \cdot 10^{16}$	$9,5 \cdot 10^{16}$	81%
4	Традиционная / Traditional scheme (Fig. 1, б)	Off	$6,76 \cdot 10^{16}$	$1,33 \cdot 10^{17}$	97%

Ниже представлены зондовые характеристики, полученные для точки № 14 в традиционной разрядной схеме (рис. 5) и в схеме для генерации газо-металлического пучково-плазменного образования (рис. 6), расположенной вблизи выходной апертуры вакуумно-дугового испарителя. Сравнение измеренных значений потенциала плазмы для схем генерации газо-металлического ППО и в традиционной разрядной схеме генерации газо-металлической плазмы, показали, что потенциал плазмы в традиционной разрядной схеме имеет величину около 2–3 В (рис. 5), тогда как в газо-металлическом ППО от 0 до (–) 15 В. Анализируя зондовую характеристику, можно отметить, что значение потенциала плазмы изменяется во времени с отрицательного значения до близкого к нулевому значению. На зондовой характеристике, представленной на рис. 5, можно выделить две основные области сосредоточения полученных значений тока насыщения электронов. Ток насыщения определяется формулой (1):

$$I_e = \frac{1}{4} en_e \bar{v} S_3, \quad (1)$$

где e – заряд электрона; n_e – концентрация электронов; \bar{v} – средняя скорость электронов; S_3 – площадь зонда.

Область 1 соответствует более высоким значениям тока насыщения, что может быть связано с резким повышением концентрации высокоэнергетичных частиц, попадающих на зонд. Резкое повышение концентрации электронов, попадающих на зонд, может быть связано с попаданием высокоэнергетичных частиц, эмитируемых с поверхности катода в процессе работы вакуумно-дугового испарителя.

Характер распределения точек на плоскости $I_p(U_p)$ в системе генерации ППО имеет иной характер. Значительная часть точек расположена во второй четверти, что говорит о том, что потенциал газо-металлической плазмы имеет отрицательное значение относительно потенциала анода.

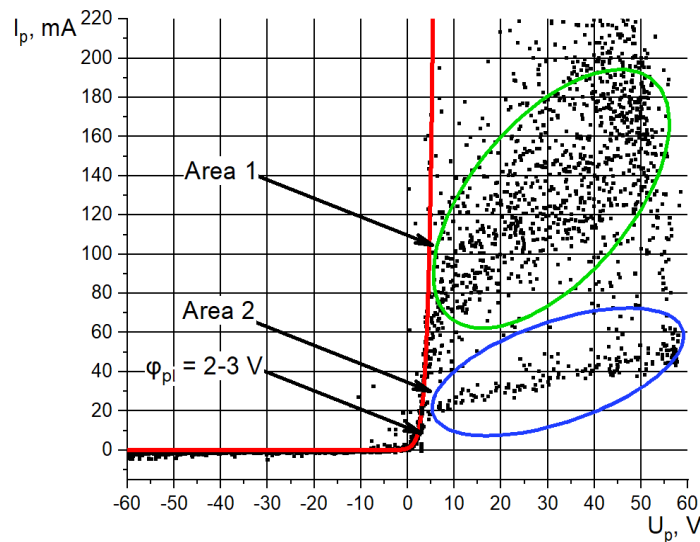


Рис. 5. Зондовая характеристика, полученная в традиционной разрядной схеме для генерации газо-металлической плазмы

Fig. 5. Probe characteristic obtained in a traditional discharge circuit for generating gas-metal plasma

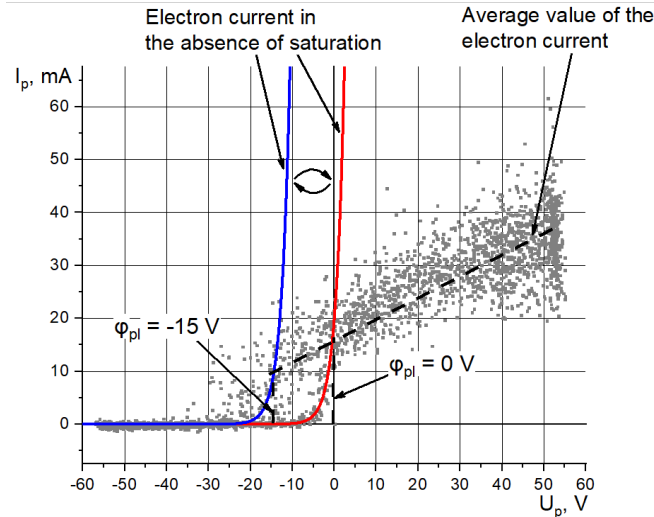


Рис. 6. Зондовая характеристика, полученная в разрядной схеме для генерации газо-металлических пучково-плазменных образований

Fig. 6. The probe characteristic obtained in the discharge circuit for the generation of gas-metal beam-plasma formations

На рис. 6 изображены крайние положения экспонент, характеризующих величину потенциала плазмы. По всей видимости, положение экспоненты изменяется во времени между этими двумя крайними позициями. Данному изменению положения экспоненты, характеризующей рост тока электронов в случае отсутствия насыщения, соответствуют изменения в картине распределения потенциала электрического поля в разрядном промежутке.

По полученным зондовым характеристикам была рассчитана температура электронов T_e для газовой и газо-металлической плазмы, формируемой в традиционной разрядной схеме и в схеме для генерации газо-металлических пучково-плазменных образований. Результаты расчетов представлены в табл. 4. В таблице приведено среднее значение температуры электронов, полученное по 20 точкам.

Таблица 4. Результаты расчета коэффициента неравномерности

Table 4. The results of calculating the coefficient of unevenness

№ эксперимента / Experiment No.	Разрядная схема / Discharge scheme	Вакуумно-дуговые испарители / Vacuum-arc evaporator	Среднее значение температуры электронов / Average value of the electron temperature
			$T_{e\,av}$, eV
1	ППО / Beam-plasma formation (Fig. 1, a)	Off	1,3
2	Традиционная / Traditional scheme (Fig. 1, б)	Off	1,4
3	ППО / Beam-plasma formation (Fig. 1, a)	On	2,3
4	Традиционная / Traditional scheme (Fig. 1, б)	On	1,5

Анализируя результаты расчетов, представленные в табл. 4, можно отметить, что средние температуры электронов в экспериментах №1 и №2 имеют близкие значения и составляют 1,3 эВ и 1,4 эВ соответственно. При работающих генераторах газовой плазмы средние значения температуры в эксперименте № 3 и №4 составляют 2,3 эВ и 1,5 эВ. Таким образом, средняя температура электронов в разрядной схеме для генерации газо-металлических пучково-плазменных образований примерно на 60% выше, чем в традиционной разрядной схеме. По-видимому, увеличение температуры электронов происходит из-за того, что ионы свободно достигают стенок вакуумной камеры, формирующей полой катод, замыкание электронов на анод же затруднено, из-за малой площади анода и большого количества электронов, эмитируемых с поверхности катода во время работы вакуумно-дугового испарителя.

Повышенная температура электронов в газо-металлическом ППО по сравнению с газовым ППО, а также по сравнению с традиционной разрядной схемой является особенностью системы генерации газо-металлического ППО и влияет как на свойства плазменного образования, так и на процесс синтеза покрытий в ней.

Выводы

В результате проведенных исследований были измерены азимутальные распределения концентрации заряженных частиц в газовом ППО и газо-металлическом ППО, а также в газовой и газо-металлической плазме в традиционной разрядной схеме для вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления. Значения коэффициента неоднородности полученных распределений для газо-металлического ППО и плазменного образования традиционной разрядной схемы составляют 81% и 97% соответственно. Также было определено, что в разрядной схеме для генерации газо-металлических пучково-плазменных образований потенциал

газо-металлической плазмы изменяется от 0 до –15 В. Средняя температура электронов в разрядной схеме для генерации газо-металлических ППО на 60% выше, чем в традиционной разрядной схеме, что является следствием относительно малой площади анода в схеме генерации ППО.

Повышенная температура электронов в газо-металлическом ППО по сравнению с газовым ППО и по сравнению с традиционной разрядной схемой, а также относительно низкая по сравнению с традиционной разрядной схемой вакуумно-дугового плазменно-ассистированного напыления степень неоднородности распределения концентрации заряженных частиц являются особенностями системы генерации газо-металлического ППО и влияют как на свойства плазменного образования, так и на процесс синтеза покрытий в ней.

Полученные результаты важны для внедрения установок генерации газо-металлических ППО для упрочнения поверхности изделий из конструкционных или функциональных материалов в технологических циклах производства.

Благодарности / Acknowledgments

Работы по исследованию закономерностей влияния состава газовой и металлической плазмы от условий генерации пучково-плазменного образования, сформированного в несамостоятельном тлеющем разряде, выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2022-0001.

The work on the study of the regularities of the influence of the composition of gas and metal plasma on the conditions for generating a beam-plasma formation based on a non-self-sustained glow discharge was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on topic No. FWRM-2022-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sheikh Haris Mukhtar, Wani M.F., Rakesh Sehda, Sharma M.D. Nano-mechanical and nano-tribological characterisation of self-lubricating MoS₂ nano-structured coating for space applications // *Tribology International* – 2023 - Vol. 178, 108017. DOI:10.1016/j.triboint.2022.108017
2. Vardanyan, E. L., Ramazanov, K. N., Nagimov, R. S., & Nazarov, A. Y. Properties of intermetallic TiAl based coatings deposited on ultrafine grained martensitic steel // *Surface and Coatings Technology* - 2020. – Vol.389. – P. 125657. DOI:10.1016/j.surfcoat.2020.125657
3. Denisova Yu. A., Denisov V. V., Ostroverkhov E.V. Influence of ion-plasma nitriding on wear-resistance of Cr6VW die steel // *Journal of Physics: Conference Series* – 2018. – Vol.1115. – P. 032024. DOI: 10.1088/1742-6596/1115/3/032024
4. Youqiang X., Cheng L., Mingyu Z., Yanhua Z., Kornel E., Ze W., Lei L. Assessment of self-lubricating coated cutting tools fabricated by laser additive manufacturing technology for friction-reduction // *Journal of Materials Processing Technology*. 318, 118010 (2023). DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2023.118010
5. Kazlauskas D., Cvček L., Doubková M., Nehasil V., Hlinka J. and other Wear behaviour of PVD coating strengthened WC-co cutters during milling of oak-wood // *Wear*. 498-499, 204336 (2022). DOI: 10.1016/j.wear.2022.204336
6. Gabor R., Kazlauskas D., Jankauskas V., Kreivaitis R., Tučkutė S. Hybrid coatings for orthopaedic implants formed by physical vapour deposition and microarc oxidation // *Materials & Design* – 2022 – Vol. 219. – P110811 DOI:10.1016/j.matdes.2022.110811
7. Yunusov R.F., Garipov M.M., Features of Glow Discharge burning between a hollow cathode and a mesh anode // *Journal of Physics: Conference Series* – 2020 – Vol. 1588. – P012064 DOI: 10.1088/1742-6596/1588/1/012064
8. Akhmadeev Y.H., Denisov V.V., Koval N.N., Kovalsky S.S, Lopatin I.V., Schanin, P.M., Yakovlev, V.V. Generation of uniform low-temperature plasma in a pulsed non-self-sustained glow discharge with a large-area hollow cathode // *Plasma Physics Reports*. V. 43, I. 1, 2017, P. 67-74. DOI: 10.1134/s1063780x17010020
9. Oks E. M., Vizir A. V., and Yushkov G. Yu., Low pressure hollow cathode glow discharge plasma for broad beam gaseous ion source // *Rev. Sci. Instrum.* 69, 853 (1998). DOI: 10.1063/1.1148580
10. Denisov V. V., Akhmadeev Yu. H., Lopatin I. V., Schanin P.M., S. S. Kovalsky, N. N. Koval, Yakovlev V.V. Pulsed non-self-sustained glow discharge with a large-area hollow cathode for nitriding of iron-based alloys // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 81 (2015) 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/81/1/012067
11. Denisov V. V., Akhmadeev Yu. H., Koval N. N., Lopatin I.V., Ostroverkhov E.V. Non-Self-Sustained Glow Discharge with a Hollow Cathode at Low Combustion Voltages// *Russian Physics Journal* – 2019. – Vol.62. – P. 3-8. DOI: 10.1063/1.5126485 (In Russian)
12. V. V. Denisov, Yu. A. Denisova, E.L. Vardanyan, E.V. Ostroverkhov, A.A. Leonov and M.V. Savchuk, Deposition of a Multilayer Coating in a Gas-Metal Beam-Plasma Formation at Low Pressure, *Russian Physics Journal*, 2021, Volume 64, p 145-150, <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02310-9>
13. Generation of homogeneous gas-discharge beam-plasma formations in an extended hollow-cathode of a high-current glow discharge / E. V. Ostroverkhov, V. V. Denisov, Yu. A. Denisova [et al.] // *Russian Physics Journal*. – 2022. – Vol. 65, N 1. – P. 141–149.
14. Особенности азотирования поверхности мелко модульного зубчатого венца в импульсно-периодическом газовом пучково-плазменном образовании при низком давлении / В.В. Денисов, Ю.А. Денисова, Е.В. Островерхов и др. / *Изв. вузов. Физика*. 2022. № 11. doi: 10.17223/00213411/65/11/38
15. Savostikov, V.M., Leonov, A.A., Denisov, V.V. et al. Physical and Mechanical Properties of Multicomponent (Zr+TiBSiNi)N Coating Fabricated by Plasma-Assisted Vacuum-Arc Deposition. *Russ Phys J* 66, 1173–1179 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11182-023-03059-z>
16. Denisov, V.V., Denisova, Y.A., Vardanyan, E.L. et al. Deposition of a Multilayer Coating in a Gas-Metal Beam-Plasma Formation at Low Pressure. *Russ Phys J* 64, 145–150 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02310-9>
17. Properties of intermetallic TiAl based coatings deposited on ultrafine grained martensitic steel / E. L. Vardanyan, K. N. Ramazanov, R. S. Nagimov, A. Y. Nazarov // *Surface and Coating Technology*. – 2020. – Vol. 389. – P. 125657.
18. Сысун, В.И. Зондовые методы диагностики плазмы / В.И. Сысун: Учебное пособие. – Петрозаводск: изд-во ПетрГУ, 1997. – 60 с.
19. Автоматизированная система зондовых измерений параметров плазмы разрядов низкого давления / С. С. Ковальский, В. В. Денисов, Н. Н. Коваль, И. В. Лопатин // *Изв. вуз. Физика*. – 2014. – Т. 57, № 11-3. – С. 78.
20. Исследование влияния тока накала на параметры плазмы плазмогенератора «ПИНК» / С. С. Ковальский, В. В. Денисов, Н. Н. Коваль, И. В. Лопатин // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2015. – Т. 58, № 9/2. – С. 166–170.