

## ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ АНОДА НА ПАРАМЕТРЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА И ПЛАЗМЫ В СИСТЕМЕ С НАКАЛЕННЫМ И ПОЛЫМ КАТОДОМ

И.И. Ажажа, В.В. Шугуров, Ю.Х. Ахмадеев

Институт сильноточной электроники СО РАН,

пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия,

vanya.azhazha@gmail.com, shugurov@inbox.ru, ahmadeev@opee.hcei.tsc.ru

В работе представлены результаты сравнительного исследования вольтамперных и зондовых характеристик плазмогенератора «ПИНК», на основе дугового разряда с накаленным и полым катодом в его обычном исполнении, когда анодом разряда является камера, так и для случая, когда анодом разряда является тигель с порошком борсодержащего состава - система с «горячим» анодом, а также влияния дополнительного источника металлической плазмы на параметры получаемых антифрикционных покрытий. Исследования проводились на установке электронно-ионно-плазменной инженерии поверхности «КОМПЛЕКС», входящей в реестр уникальных научных установок России.

**Ключевые слова:** плазма; дуговой испаритель; разряд; тигель; аргон; характеристики разряда; горячий анод.

## INVESTIGATION OF ARC DISCHARGE PARAMETERS WITH TERMIONIC AND HOLLOW CATHODE IN DISCHARGE SYSTEM WITH HOT ANODE

Ivan Azhazha, Vladimir Shugurov, Yuri Ahmadeev

Institute of High Current Electronics SB RAS,

2/3 Akademichesky Ave., 634055 Tomsk, Russia,

vanya.azhazha@gmail.com, shugurov@inbox.ru, ahmadeev@opee.hcei.tsc.ru

The system with a «hot» anode is a plasma generator «PINK», the anode of which is a crucible with powder of boron composition (B). All VACs were taken both for the PINK discharge itself in its usual version, when the anode of the discharge is a chamber and for the case when the anode of the discharge is a crucible with powder (system with «hot» anode). Characteristics were taken at different pressures and different ratios of working gas Ar, Ar+N<sub>2</sub>. The pressure step was 0.1 Pa in the pressure range of 0.1 - 0.8 Pa. The working gas ratio step (in %) Ar/N<sub>2</sub> was 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80, 0/100. Adjustment was performed by pressure.

Probe characteristics of the plasma were taken for the system with a «hot» anode using a single Langmuir probe introduced into the plasma glow region through a Wilson inlet in the unit flange located at 45° to the horizontal axis of the system.

For measurements of plasma parameters, the discharge system was modernized: a cylindrical Langmuir probe made of tungsten was installed in place of the sample holder. The dimensions of the current-gathering surface of the probe were: diameter 0.8 mm, length 5 mm. The measurements were carried out using an automated probe system developed in the laboratory of plasma emission electronics of IHCE SB RAS. An alternating voltage with amplitude from - 300 to +300 V was applied to the probe, the corresponding values of the probe current were measured, and the data were transferred to a personal computer, where further data processing took place.

**Keywords:** plasma; arc evaporator; discharge; crucible; argon; discharge characteristics; hot anode.

### Введение

Современный технический прогресс тесно связан с созданием и широким применением новых неорганических материалов со специфическими антифрикционными свойствами. Обособленно ко всему существуют материалы, схожие по твердо-

сти и другим свойствам к алмазу [1]. К таким материалам относится кубическая модификация нитрида бора (cBN), обладающая низким коэффициентом трения и высоким модулем упругости, которые зависят от сингонии и состава материала [2]. В связи с дороговизной cBN последнее время

стали обширно заниматься исследованием и разработкой материала со схожими характеристиками. Подобными характеристиками обладают антифрикционные покрытия состава ВАМг (БАМ) [3].

Антифрикционные покрытия нашли широкое применение не только в электронике (микроэлектромеханические системы - МЭМС реле, переключатели, акселерометры быстрого действия), но и при производстве двигателей внутреннего сгорания, в системе соприкасающихся поверхностей (пары трения – качения) и других областях машиностроения и производства.

В данной работе проведено сравнительное исследование режимов работы плазмогенератора «ПИНК» в конфигурации с анодом-камерой и в системе с «горячим» анодом, а также влияние металлической плазмы дугового плазмогенератора на свойства, получаемых покрытий, по сравнению с параметрами, полученными в предварительных экспериментах [4].

### Результаты и их обсуждение

Исследования проводились на установке электронно-ионно-плазменной инженерии поверхности «КОМПЛЕКС» (рис. 1), разработанной в лаборатории плазменно-эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН, входящей в реестр уникальных научных установок России.

Вольтамперные характеристики (ВАХ) снимались как для самого разряда «ПИНК» в его обычном исполнении, когда анодом разряда является камера, так и для случая, когда анодом разряда является тигель с порошком (система с «горячим» анодом) при разных давлениях и разных соотношениях рабочего газа Ar, Ar+N<sub>2</sub>. Шаг изменения давления составлял 0.1 Па в диапазоне давлений 0.1 – 0.8 Па. Шаг соотношения рабочего газа (в %) Ar/N<sub>2</sub> составлял 100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 20/80, 0/100.

Параметры плазмы определяли по зондовым характеристикам, полученным для системы с «горячим» анодом с помощью одиночного зонда Ленгмюра, вводимого в

область свечения плазмы через ввод Вильсона под углом 45°.

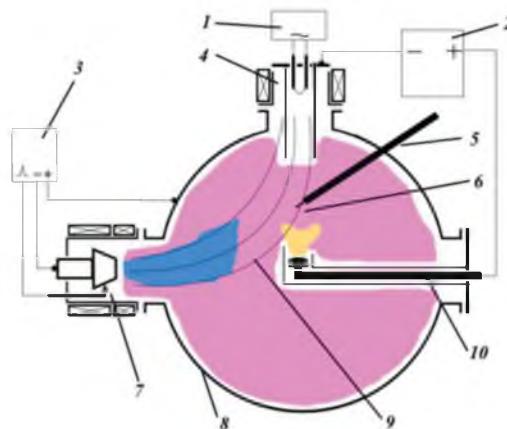


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для напыления боридных покрытий и исследования плазмы. 1 – блок питания накала «ПИНК», 2 - блок питания разряда «ПИНК», 3 - блок питания дугового испарителя, 4 - генератор газовой плазмы «ПИНК», 5 - ввод зонда, 6 - зонд Ленгмюра, 7 - дуговой испаритель, 8 - вакуумная камера, 9 - силовые линии магнитного поля

Величину шероховатости и коэффициент трения исследовали на трибометре TRIBOtechnic, а твердость на твердомере ПМТ-3М.

Для измерения параметров плазмы вместо держателя образцов устанавливался цилиндрический зонд Ленгмюра из вольфрама длинной 5 мм и диаметром 0.8 мм. На зонд подавалось переменное напряжение амплитудой от -300 до +300 В, измерялись соответствующие значения зондового тока. Ток разряда плазмогенератора «ПИНК» составлял 20 А, ток накала 120 А. Рабочее давление газа аргона составляло 0.3 Па.

По результатам зондовых исследований были получены следующие параметры плазмы:  $\Phi_{pl} = -7.7$  В;  $T_e = 3$  эВ;  $n_e = 5.7 \cdot 10^{16}$  м<sup>-3</sup>;  $\Phi_{plav} = -8.5$  В.

Для снятия ВАХ разряда использовались амперметр и вольтметр, встроенные в источники электропитания системы. Были сняты ВАХ в двух системах, в стандартной (рис. 2.), когда анодом разряда является камера и в модернизированной (рис. 3.), когда анодом разряда является, так называемый «горячий анод» - тигель для распыления порошка определенного состава.

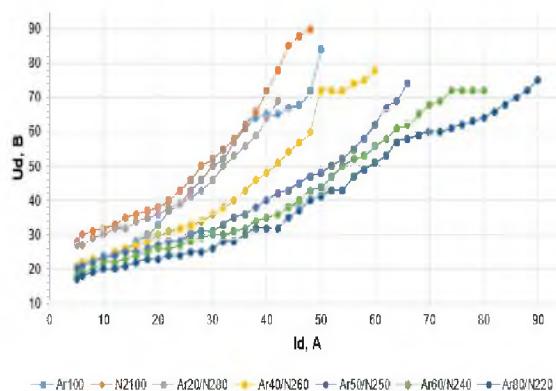


Рис. 2. Зависимость напряжения горения разряда от тока разряда в стандартной системе ( $P_{Ar} = 0.3$  Па)

Зависимости, полученные в электродной системе с анодом-камерой (рис. 2), являются характерными, когда происходит немонотонное увеличение напряжения горения разряда с увеличением тока.

Переключение же разряда на анод-тигель приводит к более медленному росту тока (рис. 3).

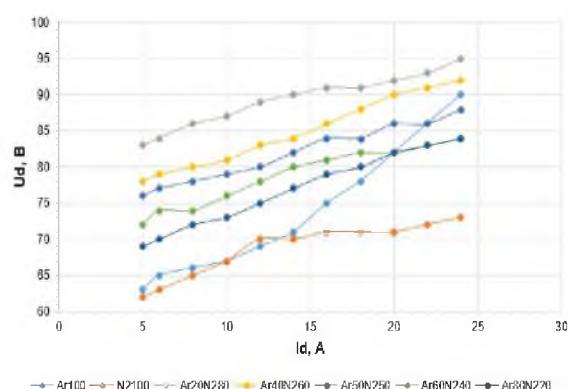


Рис. 3. Зависимость напряжения горения разряда от тока разряда в системе с «горячим» анодом ( $P_{Ar} = 0.3$  Па)

Для кривой Ar/N<sub>2</sub> 50/50 виден бросок напряжения с 15 А, что свидетельствует о зажигании паразитного разряда на оснастку-держатель тигля.

## Заключение

В ходе данной работы были получены вольтамперные и зондовые характеристики плазмы, которые позволяют в широком диапазоне управлять параметрами покрытий в процессе осаждения.

На тестовых образцах получены покрытия состава БАМ, имеющие твердость порядка 30 ГПа, шероховатость на уровне 0.3 мкм и коэффициент трения в диапазоне  $5 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-7}$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Грант № 24-69-00074).

## Библиографические ссылки

- Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д., Ахмадеев Ю.Х., Крысина О.В., Петрикова Е.А., Шугуров В.В., Лопатин И.В. Разработка комплексной технологии электронно-ионно-плазменного инжиниринга поверхности материалов и изделий. *Наноинженерия* 2015; 4(46): 4-13.
- Ivanov Yu.F., Laskovnev A.P., Teresov A.D., Uglov V.V., Petrikova E.A., Shymanski V.I., Cherenda N.N. Modification of technically pure titanium with nitrogen in a low-pressure arc discharge plasma assisted by plasma generator «PINK». *Известия высших учебных заведений. Физика* 2016; 9(2): 189-192.
- Ткачев Д.А., Жуков И.А., Валихов В.Д., Шугуров В.В., Ажажа И.И., Ахмадеев Ю.Х. Ионно-плазменное напыление антифрикционных покрытий AlMgB<sub>14</sub> и AlMgB<sub>14</sub>-50 масс. % TiB<sub>2</sub>. *Проблемы машиностроения и надежности машин* 2024; 5(1): 97-106.
- Иванов Ю.Ф., Шугуров В.В., Ажажа И.И., Петрикова Е.А., Толкачев О.С. Структура и свойства покрытия Al-Mg-B, сформированного ионно-плазменным методом на поверхности высокоенергетического сплава. *Вакуумная техника и технологии* 2023; 1(1): 199-202.