

УДК 621.537.533

*Д.П. БОРИСОВ, А.Д. КОРОТАЕВ, В.М. КУЗНЕЦОВ, В.Я. РОМАНОВ, П.А. ТЕРЕХОВ*

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ ИСТОЧНИКОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ<sup>1</sup>

Представлены особенности конструкций и характеристики новых вакуумно-плазменных установок, основанных на последовательном и совместном функционировании источников низкотемпературной плазмы (генераторов газоразрядной плазмы, магнетронно-распылительных систем и электродуговых испарителей) в больших технологических вакуумных камерах.

**Ключевые слова:** вакуумно-плазменная установка, генератор плазмы, несамостоятельный дуговой разряд, электродуговой разряд, магнетронный разряд, криогенная откачка.

### Введение

Обнаруженные достоинства и положительные свойства эффективного генератора газоразрядной плазмы [1], такие, как возможность получения однородной в достаточно большом вакуумном объеме изотропной газоразрядной плазмы высокой концентрации с возможностью гибкого регулирования её плотности, а также относительная простота электродной системы, были положены авторами в основу создания новых технологических вакуумно-плазменных установок. Приводится описание устройства и принципов работы данных установок, в которых благодаря совмещённому функционированию различных источников низкотемпературной плазмы (генераторов газоразрядной плазмы на основе объёмного несамостоятельного газового дугового разряда, магнетронно-распылительных систем и электродуговых испарителей) авторы надеются обеспечить широкий комплекс процессов модификации поверхности изделий.

### Вакуумно-плазменные установки

Общий вид со структурными схемами установок «LEGEND@» и «SPRUT» представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Генератор газоразрядной плазмы с распределённым катодом [1] каждой из установок состоит из двух расположенных на диаметрально противоположных фланцах вакуумной камеры 1 катодных узлов 2 с термоэмиссионными и полыми катодами. При напуске рабочего газа 3 и зажигании разряда плазмогенератора вся внутренняя полость вакуумных камер (анодов разряда) заполняется однородной газоразрядной плазмой 4, в которой обрабатываются изделия 5.

Обе установки оснащены магнетронно-распылительными системами 6, а установка «SPRUT» имеет в своём составе и электродуговые испарители 7 (рис. 2). Равномерное расположение технологических источников плазмы по всей боковой поверхности вакуумных камер обеспечивает постоянное (без перерывов) нахождение обрабатываемого изделия в зоне воздействия концентрированных плазменных потоков тех или иных источников плазмы (в зоне обработки). Такая схема, по всей вероятности, также позволяет повысить контроль протекания плазмохимических реакций на поверхности обрабатываемых изделий.

Благодаря применению несбалансированных магнетронно-распылительных систем и специальному включению магнитных систем всех технологических источников плазмы относительно друг друга в объёме вакуумной камеры установки «SPRUT» создается область, ограниченная линиями замкнутого магнитного поля («магнитной стенкой») 8 (рис. 2), охватывающая пространство размещения обрабатываемых изделий. Как было выявлено в экспериментах, скорость нанесения покрытий несбалансированным магнетронным распылением с наличием этой «магнитной стенки» в среднем приблизительно в 1.4 раза превосходит скорость обычного сбалансированного напыления при одинаковой мощности магнетронных систем. Это происходит, вероятно, ввиду того, что

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

данная «магнитная стенка» предотвращает уход быстрых плазменных электронов из области разрядов. При этом быстрые электроны совершают осцилляции в объеме вакуумной камеры и повышают степень ионизации атомов распыляемого вещества, что в сочетании с отрицательным потенциалом смещения подложек, всегда применявшимся в экспериментах, и должно привести к увеличению скорости напыления.

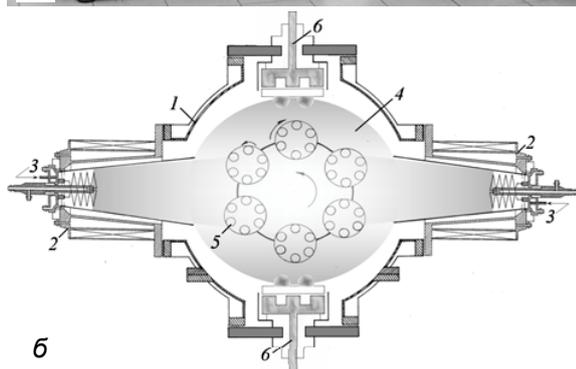
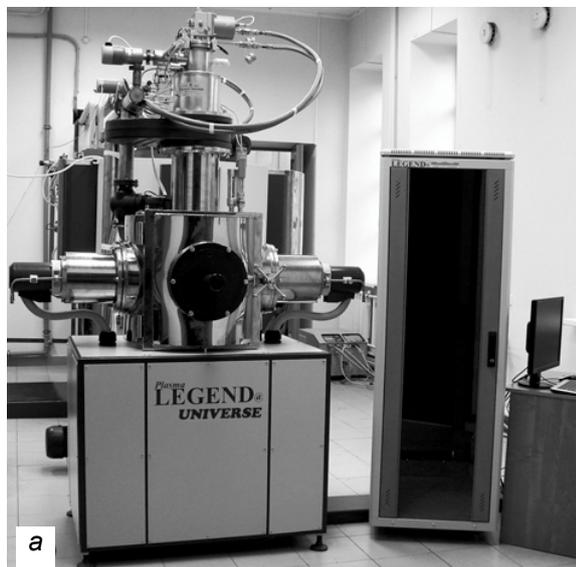


Рис. 1. Общий вид (а) и структурная схема (б) технологической установки «LEGEND@»: 1 – вакуумная камера; 2 – катодные узлы генератора газоразрядной плазмы; 3 – напуск рабочего газа; 4 – объемная плазма; 5 – обрабатываемые изделия; 6 – магнетронно-распылительные системы

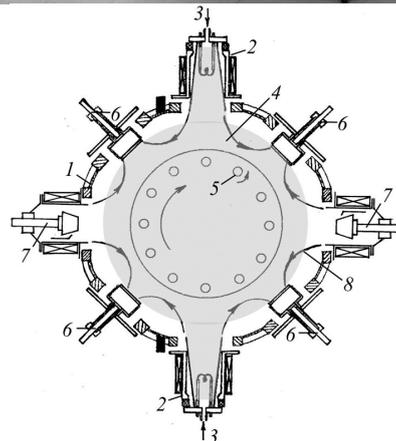


Рис. 2. Общий вид (а) и структурная схема (б) технологической установки «SPRUT»: 1 – вакуумная камера; 2 – катодные узлы генератора газоразрядной плазмы; 3 – напуск рабочего газа; 4 – объемная плазма; 5 – обрабатываемые изделия; 6 – магнетронно-распылительные системы; 7 – электродуговые испарители; 8 – линии замкнутого магнитного поля («магнитная стенка»)

Помимо применения эффективного генератора газоразрядной плазмы в представленных установках используются криогенная откачка и автоматизированная система контроля режимов плазменной обработки для повышения контроля вакуумных условий и качества технологических плазменных процессов очистки, легирования поверхности и нанесения покрытий.

Особенностью систем вакуумной откачки обеих установок является то, что высоковакуумные криогенные насосы смонтированы сверху вакуумных камер посредством патрубков, расположенных на верхних стенках этих камер. При такой организации вакуумной откачки обеспечивается эффективная защита криогенных насосов от загрязнения продуктами плазменных процессов испарения, распыления материалов – макрочастицами (каплями, осколками, кластерами и др.), ввиду того, что под действием силы тяжести поток указанных частиц к верхней части вакуумной камеры значительно снижен.

Основные характеристики и параметры представленных установок приведены в таблице.

### Характеристики вакуумно-плазменных установок

| Параметр                               | «LEGEND@»  | «SPRUT»  |
|--|--|--|
| Размеры (объём) вакуумной камеры       | Диаметр – 600 мм,<br>высота – 500 мм<br>(0.14 м <sup>3</sup> )               | Диаметр – 1200 мм,<br>высота – 660 мм<br>(0.7 м <sup>3</sup> )               |
| Материал вакуумной камеры              | Нержавеющая сталь  | Нержавеющая сталь  |
| Вакуумная откачка                      | Криогенный насос,<br>производительность<br>1200 л/с                          | Криогенный насос,<br>производительность<br>5000 л/с                          |
| Остаточное давление в вакуумной камере | $6 \cdot 10^{-4}$ Па   | $6 \cdot 10^{-4}$ Па   |
| Источник газоразрядной плазмы          | Генератор плазмы с двумя катодными узлами с общим анодом – вакуумной камерой | Генератор плазмы с двумя катодными узлами с общим анодом – вакуумной камерой |
| Рабочее давление процессов             | 0.13–0.67 Па   | 0.13–0.67 Па   |
| Концентрация газоразрядной плазмы      | $10^{10}$ – $5 \cdot 10^{11}$ см <sup>-3</sup>                               | $10^9$ – $10^{11}$ см <sup>-3</sup>  |
| Число мест для размещения изделий      | 36,<br>общий вес до 100 кг   | 72,<br>общий вес до 300 кг   |
| Рабочие газы                           | Ar, N <sub>2</sub> , ацетилен<br>и др.                                       | Ar, N <sub>2</sub> , ацетилен<br>и др.                                       |

### Заключение

Одно из назначений этих столь различающихся по объёму вакуумных камер (в 5 раз) установок состояло в исследовании масштабируемости плазменных процессов и возможности переноса исследовательских разработок эффективных способов плазменной обработки в малом реакционном объёме без потери их качества на производственный уровень, часто требующий значительного увеличения вакуумного реакционного объёма. И как было выяснено в экспериментах, дуговой газовой несамостоятельный разряд, а также созданный на его основе плазмогенератор [1] позволяют получать изотропную однородно распределённую (неоднородность  $\pm 5\%$ ) газоразрядную плазму высокой концентрации ( $\sim 10^{11}$  см<sup>-3</sup>) с возможностью её гибкого регулирования в широких пределах при низком рабочем давлении ( $\sim 0.1$  Па) в объёме таких больших вакуумных камер, как камера установки «SPRUT».

Такие высокие характеристики и свойства генерации газоразрядной плазмы дуговым несамостоятельным разрядом, по мнению авторов данной работы, должны позволить довольно просто реализовывать процессы вакуумно-плазменной обработки поверхности различных изделий. Это, прежде всего, такие процессы, как очистка, травление, азотирование в газоразрядной плазме и асистируемое газовой плазмой нанесение функциональных покрытий, осуществляемые в едином технологическом вакуумном цикле. Надёжность работы и простота конструкции применяемого генератора газоразрядной плазмы [1] позволяют обеспечить надёжность и эффективность работы представляемых технологических установок в целом.

Дополнительное применение исследованной в созданных установках криогенной откачки, обеспечивающей повышение чистоты вакуумных условий, надёжности, контролируемости и производительности вакуумных процессов ввиду высокой скорости такой откачки, делает созданные технологические установки весьма эффективными и перспективными в вакуумно-плазменных технологиях обработки изделий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Д.П., Коротаев А.Д., Кузнецов В.М. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 3/2. – С. 65–69.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия  
E-mail: borengin@mail.ru

Поступила в редакцию 30.12.13.

Борисов Дмитрий Петрович, ст. науч. сотр.;  
Коротаев Александр Дмитриевич, д.ф.-м.н., профессор, ведущ. науч. сотр.;  
Кузнецов Владимир Михайлович, к.ф.-м.н., доцент, зав. лабораторией;  
Романов Василий Яковлевич, инженер;  
Терехов Павел Алексеевич, аспирант.