

УДК 621.537.533

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

ЭФФЕКТИВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ОБЪЁМНОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНОГО ГАЗОВОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА¹

Представлены особенности конструкций электродных систем и характеристики источников газоразрядной плазмы на основе газового дугового разряда, поддерживаемого электронной эмиссией с термокатода. Получены высокие параметры и положительные свойства плазмы, генерируемой представляемыми генераторами в больших вакуумных объёмах.

Ключевые слова: газоразрядная плазма, генератор плазмы, несамостоятельный дуговой разряд.

Введение

С точки зрения эффективности плазменной обработки изделий в вакууме, определяемой качеством и производительностью процессов, несомненным преимуществом обладают способы с применением дуговых разрядов низкого давления. Разработанный в начале 90-х годов прошедшего столетия генератор газоразрядной плазмы на основе несамостоятельного дугового разряда с термоэмиссионным катодом [1–3] как раз и предназначался для создания надёжных и эффективных технологических процессов модификации поверхности изделий с применением низкотемпературной газоразрядной плазмы, например [4–6]. В данной специализации указанный генератор плазмы успешно служит в научных и коммерческих учреждениях как в России, так и за рубежом вот уже более 20 лет.

В настоящей работе проводится сравнительное исследование генерации газоразрядной плазмы в технологическом вакуумном объёме генератором как уже известной так называемой базовой модели [1–3], так и новым устройством генерации плазмы газов, улучшающим её параметры и свойства в больших технологических вакуумных камерах.

Плазма генератора базовой модели

Принципиальная схема базовой модели генератора низкотемпературной газоразрядной плазмы на основе несамостоятельного дугового разряда с термокатодом представлена на рис. 1.

Основным элементом электродной системы плазмогенератора является комбинированный катод, состоящий из цилиндрического полого катода 1 (рис. 1), выполненного из нержавеющей стали и имеющего диаметр 86 мм и длину 380 мм и размещённого в нём термоэмиссионного катода 2 в виде спиралей (нитей) из вольфрамовой проволоки. Комбинированный катод помещён в продольное магнитное поле с индукцией 0.02 Тл, создаваемое соленоидом 3, и закреплён на водоохлаждаемом фланце катодного узла 4, который электрически изолирован от водоохлаждаемого корпуса плазмогенератора 5 с помощью изолятора 6. Посредством своего корпуса 5, находящегося под анодным потенциалом, плазмогенератор устанавливается на вакуумную камеру – полый анод разряда 7 для создания в ней газоразрядной плазмы за счёт зажигания газового разряда, которое происходит следующим образом. При накале термоэмиссионного катода и подаче напряжения от источника электропитания газового разряда между вакуумной камерой (анодом) и комбинированным катодом (электрически соединённые полый и термокатод) эмитируемые термокатодом электроны движутся вдоль силовых линий магнитного поля в направлении анода, роль которого выполняют внутренние стенки вакуумной камеры. Так как напуск рабочего газа 8 осуществляется в катодную полость плазмогенератора, то вблизи термокатада создаётся область повышенного давления. Наличие области с повышенной концентрацией молекул рабочего газа и потока ускоренных электронов, траектории которых удлиняются за счёт магнитного поля, облегчает возникновение ионизационных процессов. Электроны, отражаясь от потенциального барьера, создаваемого катодной полостью, совершают колебательные движения в полости и эффективно ионизируют молекулы рабочего газа, вызывая зажигание и горение несамостоятельного дугового разряда при

¹ Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентоспособности ТГУ.

низких давлениях. Разряд существует между катодом, которым являются как термокатод, так и соединённый с ним полый катод, и анодом, которым является внутренняя поверхность вакуумной камеры. Газоразрядная плазма 9, генерируемая таким разрядом, заполняет полость вакуумной камеры и может являться рабочей средой для обработки поверхности помещённых в неё изделий.

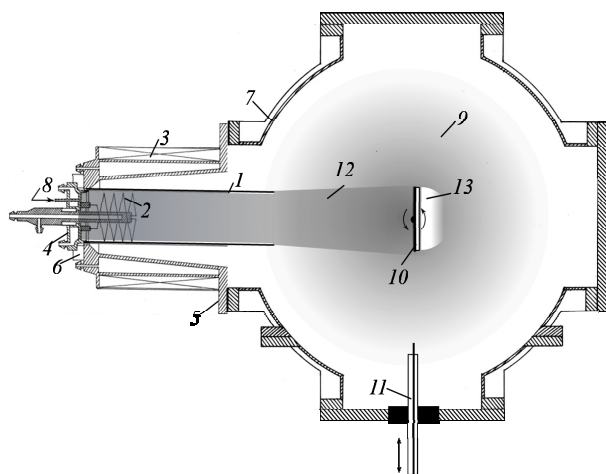


Рис. 1. Принципиальная схема генератора газоразрядной плазмы базовой модели

даваемой плазмы могут регулироваться за счёт варьирования как мощности накала и эмиссионной способности термокатада (нити), так и напряжения источника электропитания разряда. На рис. 3 приведена зависимость концентрации плазмы, зафиксированной по ионному току насыщения плоского зонда 10 (рис. 1) в центре вакуумной камеры, от тока разряда плазмогенератора.

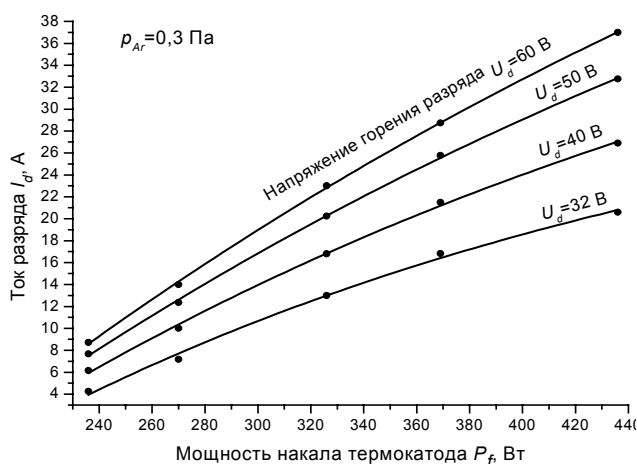


Рис. 2. Зависимость тока разряда от мощности накала нити термокатада плазмогенератора

Исследования характеристик плазмы разряда плазмогенератора проводились в объёме цилиндрической вакуумной камеры диаметром 600 мм и высотой 500 мм. В качестве термокатада была использована одна нить вольфрамовой проволоки марки ВА диаметром 0.8 мм с длиной рабочей части 150 мм.

На рис. 2 приведена зависимость тока разряда плазмогенератора при давлении рабочего газа (аргон) 0.3 Па от мощности накала, осуществляемого от источника переменного напряжения, для различных значений напряжения горения разряда.

Как видно из представленных зависимостей, ток разряда, а значит, и концентрация создаваемой плазмы могут регулироваться за счёт варьирования как мощности накала и эмиссионной способности термокатада (нити), так и напряжения источника электропитания разряда.

На рис. 3 приведена зависимость концентрации плазмы, зафиксированной по ионному току насыщения плоского зонда 10 (рис. 1) в центре вакуумной камеры, от тока разряда плазмогенератора.

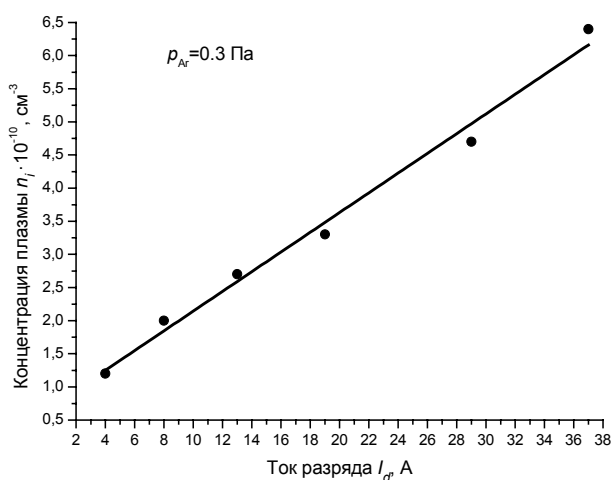


Рис. 3. Зависимость концентрации плазмы от тока разряда плазмогенератора

Недостатками описываемой модели генератора газоразрядной плазмы являются направленность воздействия плазменного потока и высокая неоднородность распределения плазмы в рабочем объёме вакуумной камеры. Кривая 1 на рис. 4 отображает зависимость плотности ионного тока насыщения одностороннего зонда 10 (рис. 1) с характерным размером 100 мм от его ориентации относительно направления плазменного потока 12 (рис. 1).

Как показывает данная кривая, наблюдается значительное падение плотности ионного тока, когда зонд отворачивается своей токопроводящей стороной от плазмогенератора — наблюдается область «плазменной тени» 13 (рис. 1). В это же время измеренная подвижным зондом Ленгмюра 11 (рис. 1) однородность распределения концентрации генерируемой плазмогенератором плазмы вдоль центрального поперечного сечения вакуумной камеры составила $\pm 25\%$ от среднего значения (кривая 1, рис. 5). Все эти данные свидетельствуют о сосредоточении основного количества плазмы в направленном цилиндрическом потоке 12 (рис. 1), определяемом геометрией полого ка-

тогда плазмодгенератора. Поток плазмы цилиндрической формы, распространяющийся из полого катода плазмодгенератора, с повышенной светимостью по сравнению с периферийной областью вакуумной камеры наблюдается и визуально при работе генератора плазмы. Такие высокие значения анизотропии и неоднородности распределения получаемой в результате работы плазмодгенератора плазмы существенно снижают качество и производительность процессов плазменной обработки. В экспериментах по обработке изделий в плазме, создаваемой плазмодгенератором данной модели, обнаруживались эффекты нарушения повторяемости результатов по скорости очистки, травления и азотирования, возникающие как раз из-за различия от эксперимента к эксперименту ориентации обрабатываемых изделий относительно этого самого сфокусированного потока плазмы плазмодгенератора.

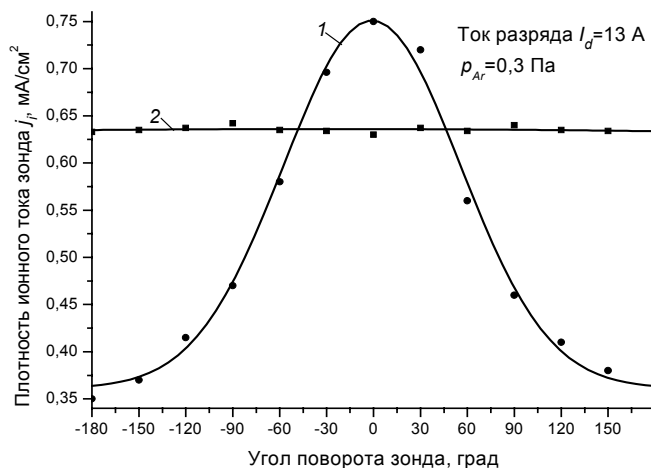
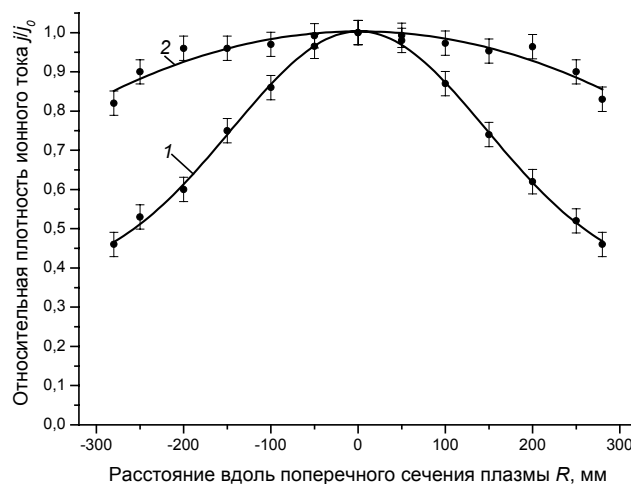
Рис. 4. Плотность ионного тока зонда I_0 (рис. 1)

Рис. 5. Распределение плотности плазмы в камере

Генерация однородной плазмы

Достичь высокой однородности генерации газоразрядной плазмы и эффективности обработки в ней позволяет применение генератора плазмы на основе того же несамостоятельного дугового разряда с распределённым катодом, состоящим из двух расположенных на диаметрально противоположных фланцах вакуумной камеры (анода разряда) электрически соединённых комбинированных катодов - термоэмиссионных и полых (рис. 6).

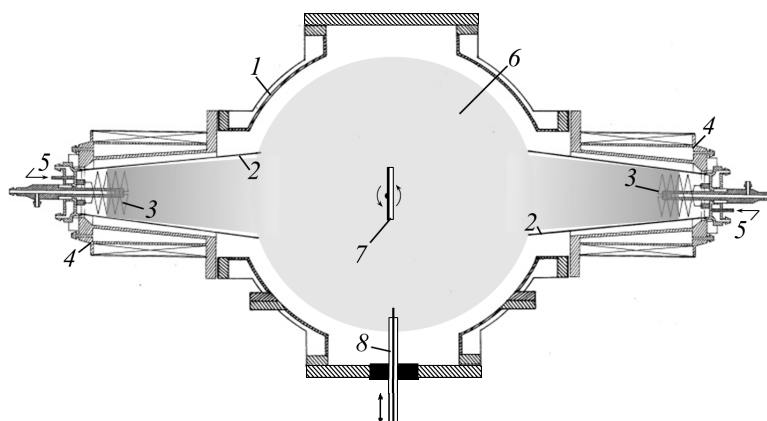


Рис. 6. Принципиальная схема генератора однородной газоразрядной плазмы: 1 – вакуумная камера (анод); 2 – полый катод; 3 – термоэмиссионный катод; 4 – заземлённый корпус комбинированного катода; 5 – напуск рабочего газа; 6 – однородно распределённая газоразрядная плазма; 7 – односторонний зонд; 8 – подвижный зонд Ленгмюра

Разряд формируется работой каждого из двух катодных узлов разделённого катода на общую анодную полость – вакуумную камеру, параметры накала подбираются так, чтобы обеспечить одинаковый ток разряда с каждого из катодных узлов. Однако в отличие от описанной выше кон-

струкции катодного узла генератора плазмы базовой модели в новом генераторе применены полые катоды не цилиндрической, а конической формы, рекомендованной в [7].

При исследовании генератора плазмы данной конструкции было обнаружено, что плотность ионного тока насыщения одностороннего зонда, свидетельствующая о значении концентрации плазмы, не зависит от ориентации этого зонда относительно катодных узлов плазмогенератора (кривая 2 рис. 4). А зафиксированная подвижным зондом Ленгмюра неоднородность распределения плазмы вдоль центрального поперечного сечения вакуумной камеры при температуре плазменных электронов ~ 4 эВ составила всего $\pm 5\%$ (кривая 2, рис. 5).

На рис. 7 приведены зависимости тока разряда от суммарной мощности накала обеих нитей распределённого термокатода генератора однородной плазмы. Для удобства сравнения на этом же рисунке приведены и аналогичные зависимости, полученные ранее (рис. 2) для генератора базовой модели (семейство кривых в левой части рис. 7).

Для сравнения эффективности по энергозатратам генерации плазмы плазмогенераторами обеих конструкций представляется логичным сравнивать работу двух отдельно функционирующих генераторов базовой модели с работой одного генератора однородной плазмы, т.к. в генераторе однородной плазмы задействованы два термоэмиссионных катода.

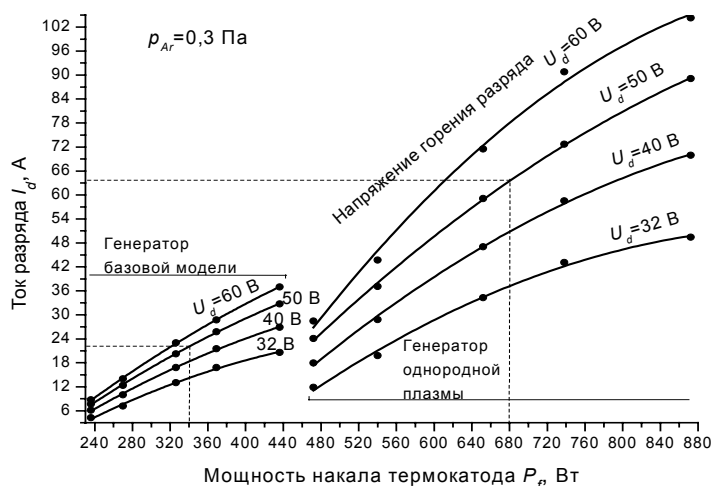


Рис. 7. Зависимость тока разряда от мощности накала термокатода плазмогенератора

Как показано на рис. 7 штриховыми линиями, при мощности накала нити термокатода генератора базовой модели 340 Вт данный генератор плазмы развивает ток разряда равный 22 А при напряжении горения 50 В. Для двух же отдельно функционирующих генераторов плазмы базовой модели общий ток разряда при напряжении горения 50 В будет равен 44 А при суммарной мощности накала их термокатодов 680 Вт. В то же время генератор однородной плазмы при суммарной мощности накала его термокатодов 680 Вт обеспечивает ток разряда равный 64 А при том же напряжении горения 50 В (штриховые линии на рис. 7), что в 1.45 раза больше тока разряда, выдаваемого двумя генераторами базовой модели. Подобный анализ для всех исследованных диапазонов мощности накала и напряжения горения (рис. 7) при одних и тех же параметрах (напряжение горения и суммарная мощность накала термокатодов) показал, что ток разряда генератора однородной плазмы (рис. 5) выше суммарного тока разряда двух генераторов плазмы базовой модели (рис. 1) в среднем приблизительно в 1.4 раза.

Заключение

Помимо однородного синтеза изотропной газоразрядной плазмы во всём внутреннем объёме вакуумной камеры, представленный в настоящей работе, новый образец плазмогенератора имеет так же и преимущество в энергетической эффективности (в среднем приблизительно в 1.4 раза) по сравнению с генератором известной базовой модели. Это позволяет считать новую разработку эффективным устройством создания газоразрядной плазмы в вакуумных камерах больших объёмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Д.П., Коваль Н.Н., Щанин П.М. // Изв. вузов. Физика. – 1994. – Т. 37. – № 3. – С. 295.
2. Borisov D.P., Koval N.N., and Schanin P.M. // Proc. XVII Int. Symp. on Discharge and Electr. Insul. in Vacuum. – Berkeley, USA, 1996. – P. 884–886.
3. Борисов Д.П., Коваль Н.Н., Щанин П.М. // Патент РФ № 2116707. – 1998.
4. Borisov D.P., Koval N.N., Kovsharov N.F., and Schanin P.M. // Proc. XVII Int. Symp. on Discharge and Electr. Insul. in Vacuum. – Berkeley, USA, 1996. – P. 881–883.
5. Борисов Д.П., Гончаренко И.М., Коваль Н.Н. и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 4. – С. 40–44.
6. Borisov D.P., Goncharenko I.M., Koval N.N. and Schanin P.M. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1998. – V. 26. – P. 1680–1684.
7. Борисов Д.П. // Патент РФ № 87065. – 2009.

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.;
Кортаев 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.