

### УДК 621.365.5

В. Д. Гончаров, С. А. Калинин, Р. В. Яшкардин Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

# Определение параметров плазмы с использованием схемы замещения импульсного разряда

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований параметров импульсного дугового разряда, движущегося вдоль поверхности протяженных электродов. Показано, что полученные экспериментальные данные можно адекватно описать с помощью математической модели только в случае, если задать изменение резистивного сопротивления плазмы более чем на порядок в определенный момент времени.

#### Ультрадисперсные частицы, диспергирование, плазма, дуговой разряд

В последнее время ультрадисперсные частицы (УДЧ) все более широко применяются в современной технике и технологии. На сегодняшний день существует около 100 методов и их модификаций для получения различных наноматериалов [1]. Однако себестоимость УДЧ остается высокой из-за сложности и дороговизны оборудования для их производства, низкой производительности существующих способов их получения. Одной из основных проблем, сдерживающих широкое применение УДЧ, является сложность хранения этих частиц. Дело в том, что нанообъекты под действием силы Ван-дер-Ваальса стремятся к объединению в крупные сообщества – агломераты.

В лаборатории «Импульсные электротехнологии» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» разработана и создана технологическая установка, позволяющая получать УДЧ в импульсном дуговом разряде, перемещающемся по поверхности протяженных электродов, с одновременным их нанесением на изделия, где в дальнейшее планируется использовать уникальные свойства этих частиц [2], [3]. Анализ результатов нанесения УДЧ, выполненный с помощью АСМ, позволил определить параметры и количество этих частиц. На рис. 1, а приведены результаты исследований поверхности стеклянной подложки с нанесенными на ее поверхность УДЧ на расстоянии 5 мм от области зажигания разряда, наибольшая высота УДЧ достигает 200 мкм. На рис. 1, б приведены результаты исследований поверхности стеклянной подложки с нанесенными на ее поверхность УДЧ на расстоянии 25 мм от



области зажигания разряда, наибольшая высота УДЧ достигает 100 мкм.

Очевидно, что размеры и количество УДЧ зависят от расположения подложки, на которую наносились частицы, по отношению к области зажигания разряда. Очевидно, что эти различия связаны с процессами, происходящими в плазме разряда. Подобная ситуация потребовала проведения дополнительных исследований процессов, которые происходят в этом разряде.

Вкратце остановимся на физике процессов, которые происходят в рассматриваемой технологической установке. Схема установки представлена на рис. 2.

Вспомогательный импульсный источник с выходным высоковольтным импульсным трансформатором 3 обеспечивает напряжение 15 кВ, что позволяет осуществить искровой пробой 5 между вспомогательными 4 и основными 7 электродами. Процессы, связанные с протеканием тока через каналы искрового пробоя от конденсаторной батареи 1 через отрезок коаксиального кабеля 2, основные и вспомогательные электроды и вторичную обмотку импульсного трансформатора, приводят к зажиганию основного разряда. Этот разряд огибает диэлектрическую вставку 8, которая возвышается над поверхностью электродов на высоту h.

Сила, воздействующая на плазму разряда в результате взаимодействия ее магнитного поля и поля токов, протекающих по электродам, приводит к перемещению плазмы по поверхности электродов. Средняя скорость этого перемещения зависит от многих факторов и для исследуемой системы находится в диапазоне 100...400 м/с.

Накопленная в конденсаторной батарее энергия выделяется в разряде за относительно малый промежуток времени. В результате мощность, выделяемая в разряде, достигает значений нескольких десятков мегаватт. Воздействие части этой мощности на поверхность электродов приводит к их нагреву, оплавлению, испарению и диспергированию (образованию микрокапель материала электродов). При этом разряд горит в парах материала электродов при давлениях, в десятки раз превышающих атмосферное. Процессы в приэлектродном промежутке и в разряде в целом благодаря рэлеевской неустойчивости приводят к уменьшению размеров микрокапель [4], [5].

Прямые измерения параметров плазмы в конкретных областях разряда, в котором выделяется огромная мощность и который перемещается с большой скоростью по электродам, вряд ли возможны.

Адекватная математическая модель исследуемых процессов потребует совместного решения задач, которые описывают [6], [7]: растекание тока в системе электродов и плазмы, с учетом ее движения (электродинамическая задача); распределение температуры плазмы с учетом излучения; распределения скоростей и давлений (газодинамическая задача); распределения температуры электродов и изменения топологии их поверхности (задача Стефана); изменение напряжения на электродах вследствие протекания тока по элементам согласования конденсаторной батареи и технологического устройства.

Совместное решение подобных задач является весьма трудоемкой задачей. Дополнительной сложностью, которая не позволяет использовать даже созданную подобную модель, является отсутствие данных о параметрах (сопротивлении, теплопроводности и теплоемкости) плазмы разряда, который горит в парах металла, при ее рабочих температурах в 20 000...30 000 К и давлениях в сотни атмосфер.



.....

Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 5/2015

Учитывая сложности, связанные с прямыми измерениями и численным моделированием технологической системы, для исследования изменений во времени параметров плазмы основного разряда авторы использовали комбинированный метод. В рамках этого метода была разработана схема замещения технологической установки и создана математическая модель, которая описывает процессы в этой схеме замещения. Данные, полученные с помощью численной реализации математической модели, сравнивались с результатами экспериментальных исследований напряжения на плазме разряда. По результатам сравнения сопротивление разряда корректировалось таким образом, чтобы получить наиболее точное совпадение экспериментальных и теоретических кривых изменения во времени напряжения на разряде.

Для создания схемы замещения предварительно были проведены исследования комплексных сопротивлений отдельных элементов схемы в представляющем интерес частотном диапазоне. Таким образом, были определены мало изменяющиеся в данном частотном диапазоне значения емкости конденсаторной батареи (С0), индуктивности  $(L_1)$  и сопротивления  $(R_1)$  коаксиального кабеля с основными электродами, индуктивности плазмы основного разряда (L2), индуктивности (L<sub>3</sub>) и сопротивления (R<sub>3</sub>) вторичной обмотки импульсного трансформатора источника питания системы предварительной ионизации. Дополнительные экспериментальные исследования дали возможность определить сопротивление плазмы инициирующего разряда ( $R_s$ ) и напряжение приэлектродных слоев, которое в схеме замещения моделируется источником «противоЭДС» ( $U_D$ ).

Общая схема замещения электромагнитных процессов в технологической установке представлена на рис. 3.



.....



Ключ  $K_1$  моделирует процесс зажигания вспомогательного разряда. Ключ  $K_2$  моделирует процесс зажигания основного разряда и начало процесса диспергирования материала основных электродов. Для описания процессов, протекающих в системе, разработана программа, которая позволяет плавно изменять сопротивление.

Предварительные исследования, выполненные в программной среде ANSYS позволяют утверждать, что результаты измерения напряжения на торцах электродов, к которым не подключены токоподводы, практически совпадают с напряжением на плазме разряда.



#### Физические явления в твердых телах, жидкостях и газах

<i>h</i> , мкм	<i>U</i> <sub>0</sub> , В	$U_{\rm пр. \ нач}, {\rm B}$	<i>I</i> <sub>пад</sub> , кА	$\Delta t$ , мкс	$L_2$ , мкГн	<i>R</i> <sub>2диф</sub> , мОм	<i>R</i> <sub>2конт</sub> , мОм
2	1500	1351	10.9	52	0.4	40	3
2	2000	1928	16.2	50	0.3	37	2.5
2	2500	2430	20.9	50	0.25	35	1
3	2000	1941	15.5	49	0.35	45	2
3	2500	2347	19.4	49	0.25	40	2
3	3000	2921	25.6	50	0.2	33	1
3.5	2000	1833	14	49	0.3	40	2
3.5	2500	2372	17.9	51	0.3	38	1.5
3.5	3000	2877	22.7	51	0.2	33	1
3.5	3500	3362	28.1	49	0.2	35	1



a

Высота, мкм 10 0 0 0 0 0 Сечение, мкм 6 Рис. 7



Результаты исследований динамики изменения напряжения на основном разряде для различных напряжений при высоте диэлектрической вставки 3.5 мм представлены на рис. 4.

10

a

20

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов приведено на рис. 5. Очевидно, что на начальном этапе до момента времени  $t_{\text{пад}}$ кривые экспериментального *1* и теоретического *2* изменений напряжения практически совпадают. Для того чтобы получить совпадение этих кривых после этого момента времени, необходимо более чем на порядок изменить значение сопротивления основного разряда ( $R_2$ ). В программе было реализовано плавное изменение этого сопротивления за время  $10^{-6}$  с.

Из рис. 6 видно, что при изменении значения сопротивления плазмы  $R_2$  в момент времени  $t_{\text{пад}}$  динамика изменения напряжения для экспериментальных и теоретических результатов практически повторяет друг друга.

Для подтверждения полученного результата были проведены серии экспериментов, в которых изменялись: напряжение конденсаторной батареи и высота диэлектрической вставки. Некоторые

.....

0

результаты этих экспериментов и их математической обработки представлены в таблице.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что вне зависимости от первоначального напряжения заряда конденсаторной батареи или высоты диэлектрической вставки, для того чтобы получить совпадение экспериментальных и теоретических результатов, необходимо предположить изменение сопротивления R<sub>2</sub>. При этом данное изменение происходит через определенное время после зажигания основного разряда  $\Delta t = 50 \pm 2$  мкс. Уменьшение сопротивления плазмы обычно связано с изменением формы горения разряда [8]. Параметры исследуемой системы свидетельствуют о том, что наблюдается импульсный дуговой разряд. Привязка к катоду разряда в подобной форме обычно имеет вид катодного пятна. Изменение формы горения разряда должно сказаться на размерах катодного пятна. Поэтому авторы провели дополнительные исследования поверхности катодов на разных расстояниях от места зажигания разряда. Оказалось, что на начальном этапе горения поверхность катода равномерно оплавлена в пределах всей зоны оплавления.

Об этом свидетельствуют результаты АСМ исследований, приведенные на рис. 7, *а* и 8, *а*.

1. Методы получения и свойства нанообъектов / Н. И. Минько, В. В. Строкова, И. В. Жерновский, В. М. Нарцев. М.: Флинта, 2009. 168 с.

2. Пат. РФ № 2471884. Способ обработки поверхности материалов и устройство для его осуществления / В. Д. Гончаров, Д. С. Самсонов, Е. М. Фискин.

3. Самсонов Д. С. Электроимпульсная технология получения ультрадисперсных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / СПбГПУ. СПб., 2014. 14 с.

4. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1957. 621 с.

Интенсивностью цвета здесь показан рельеф поверхности.

Результаты АСМ исследований поверхности участка катода, с которого горит разряд при переходе его в другую форму, показали, что при разрешении АСМ сканирования 100 на 100 мкм на поверхности катода можно зафиксировать от 3 до 10 линейных следов, имеющих преимущественно одно направление. Каждый из них представляет собой углубления (шириной 5...10 мкм и глубиной до 1 мкм). Некоторые из этих следов заканчиваются углублениями, типичная картина которых и профиль одного из них приведены на рис. 7,  $\delta$  и 8,  $\delta$ . Полученные результаты позволяют утверждать следующее:

 разработанная схема замещения технологической установки адекватно описывает реальные физические процессы, которые в ней происходят;

 через определенный промежуток времени сопротивление плазмы разряда уменьшается более чем на порядок;

3) изменение сопротивления сопровождается изменением характера оплавления поверхности катода (появлением на этой поверхности следов от отдельных катодных пятен диаметром от 5 до 10 мкм).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

5. Григорьев А. И., Ширяева С. О. Закономерности рэлеевского распада заряженной капли // ЖТФ. 1991. Т. 61, № 3. С. 19–28.

6. Цветков И. В. Применение численных методов для моделирования процессов в плазме. М.: Изд-во МИФИ, 2007. 84 с.

7. Васильев Е. Н., Нестеров Д. А. Вычислительное моделирование структуры сильноточного разряда в МДГ-канале. Красноярск: Ин-т вычислительной техники СО РАН, 2005.

8. Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука. Физматлит, 1980. 415 с.

V. D. Goncharov, C. A. Kalinin, R. V. Yashkardin Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

## DETERMINATION OF PLASMA PARAMETERS USING THE EQUIVALENT CIRCUIT OF A PULSED DISCHARGE

The results of experimental and theoretical studies of parameters of pulsed arc moving along the surface of extended electrodes are presented. It is shown that the experimental data can be adequately described by a mathematical model, only if set to change the resistive impedance of the plasma by more than an order of magnitude given time.

#### Ultrafine particles, dispersing, plasma, arc discharge