УДК 537.525.99

Исследование параметров плазмы «геликонного» разряда в макете ВЧ гибридной плазменной системы

А. Ф. Александров, А. К. Петров, К. В. Вавилин, Е. А. Кралькина, П. А. Неклюдова, А. М. Никонов, В. Б. Павлов, А. А. Айрапетов, В. В. Одиноков, В. А. Сологуб, Г. Я. Павлов

В работе представлены результаты экспериментального исследования параметров плазмы «геликонного» разряда в макете ВЧ гибридной плазменной системы, оснащенном соленоидальной антенной. Показано, что с ростом величины внешнего магнитного поля происходит формирование плазменного «столба» и смещение максимальных значений ионного тока по оси разряда в сторону нижнего фланцу макета. Изменение конфигурации магнитного поля позволяет управлять формой плазменного столба.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Pi, 52.65.-y

Ключевые слова: индуктивный, высокочастотный, разряд, плазма, зондовый ионный ток, магнитное поле, геликон, косая ленгмюровская волна.

Введение

Ионно-стимулированное нанесение материалов является одним из основных методов вакуумного осаждения покрытий и пленок [1—4]. Метод предполагает постоянную или периодическую бомбардировку ускоренными ионами тонких пленок в процессе их роста.

В настоящее время вакуумное нанесение пленок осуществляется с помощью термического испарения, ионно-пучкового, магнетронного и вакуумно-дугового осаждения. В работе [5] проанализированы результаты многочисленных экспериментов по нанесению покрытий с ассистированием ионным пучком. Показано, что наиболее значительные изменения свойств осаждаемых пленок происходят, если на каждый осажденный атом приходится энергия в диапазоне 1,0—100 эВ.

Наибольших скоростей осаждения покрытий в настоящее время удается достичь с помощью вакуумно-дуговых источников. В работе [6] для целей ионного стимулирования вакуумно-дуговому нанесению покрытий, т. е. создания потока ионов, величина которого соответствует высоким скоростям осаждения, предложено использование индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле. Установка, разработанная в [6] и получившая название гибридной плазменной системы, состоит из геликонного источника и напылительной системы. Величина магнитного поля выбирается из условий резонансного возбуждения геликонных волн. В работе [6] показано, что изменение конфигурации внешнего магнитного поля в источнике позволяет управлять распределением плотности плазменного потока на большом расстоянии от плоского индуктора, расположенного на верхнем диэлектрическом фланце источника и делается прогноз о возможности обработки изделий диаметром не менее 450 мм с высокой степенью равномерности по площади изделия.

В работе [6] для возбуждения геликонных волн используется планарная антенна. Показано, что в случае использования планарной антенны изменение внешнего магнитного поля сопровождается резкими скачками плотности, вызванными изменением возбуждаемой моды геликонной вол-

Александров Андрей Федорович, зав. кафедрой[1].
Петров Александр Кириллович, аспирант[1].
Вавилин Константин Викторович, ст. научный сотрудник[1].
Кралькина Елена Александровна, вед. научный сотрудник[1].
Неклюдова Полина Алексеевна, мл. научный сотрудник[1].
Никонов Александр Михайлович, аспирант[1].
Павлов Владимир Борисович, ст. научный сотрудник[1].
Айрапетов Александр Арменакович, вед. сотрудник[2].
Одиноков Вадим Васильевич, генеральный директор[2].
Сологуб Вадим Александрович, начальник отдела[2].
Павлов Георгий Яковлевич, зам. генерального директора по развитию[2].
[1]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ). Физический факультет. Россия, 111991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. Тел. 8 (495) 939-47-73. E-mail: alpetrov57@gmail.com
[2]ОАО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения». Россия, 124460, г. Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, д. 10.

Статья поступила в редакцию 26 мая 2015 г.

© Александров А. Ф., Петров А. К., Вавилин К. В., Кралькина Е. А., Неклюдова П. А., Никонов А. М., Павлов В. Б., Айрапетов А. А., Одиноков В. В., Сологуб В. А., Павлов Г. Я., 2015

ны. Использование соленоидальной антенны, как следует из работы [7], приводит к существенно более плавному изменению параметров плазмы.

В настоящей работе была поставлена задача — исследовать параметры плазмы, формируемой с помощью геликонного источника в макете гибридной плазменной системы, но при условии, что разряд возбуждается соленоидальной антенной.

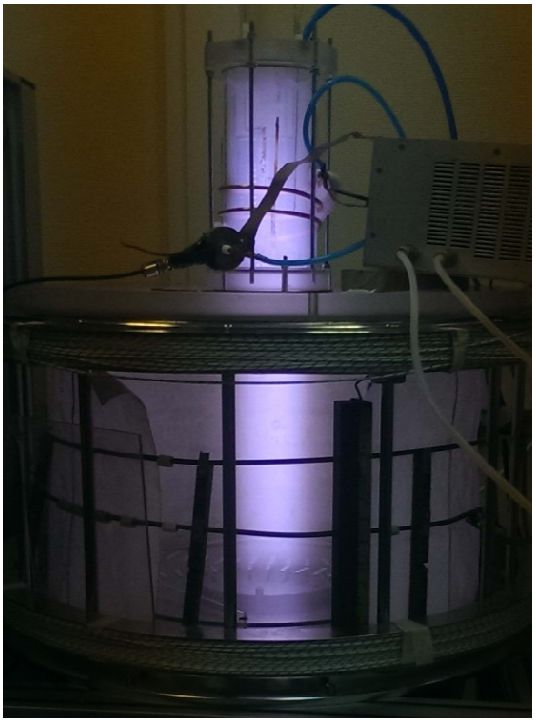
Экспериментальная установка и методика измерений

Схема экспериментальной установки подробно описана в [8]. Макет гибридной системы состоял из двух цилиндрических камер разного диаметра. Верхняя часть источника плазмы, изготовленная из кварца, имела диаметр 10 см и высоту 25 см. Нижняя часть источника, также изготовленная из кварца, имела диаметр 46 см и высоту 30 см. Ввод ВЧ-мощности осуществляется с помощью соленоидальной антенны, которая располагалась на боковой поверхности верхней части источника плазмы на расстоянии 12—16 см от ее верхнего торца. Концы антенны подсоединялись к выходу автоматической системы согласования, в свою очередь, подключенной к ВЧ-генератору AE Cesar 1310 с рабочей частотой 13,56 МГц и выходной мощностью 0—1000 Вт. Для измерения тока, текущего по антенне, использовался пояс Роговского. Два электромагнита, позволяющие создавать в нижней камере однородное (в пределах 7 %) магнитное поле с индукцией 0—6 мТл, были расположены в верхней и нижних частях вакуумной камеры. В качестве рабочего газа использовался аргон, рабочее давление менялось в диапазоне 0,1—1 мТорр.

Диагностический стенд позволял измерять мощность ВЧ-генератора, отдаваемую во внешнюю цепь, ток, текущий через антенну, ВЧ-напряжение на концах антенны, спектр свечения плазмы и пространственное распределение интенсивности свечения плазмы. Стандартная зондовая методика позволяла измерять ВАХ зондов, ионный ток насыщения, концентрацию и энергетическое распределение электронов.

Результаты экспериментов

Экспериментальные исследования разряда в макете источника плазмы показали, что наложение магнитного поля приводит к существенным изменениям протяженности разряда. При отсутствии магнитного поля разряд концентрируется в верхней газоразрядной камере. Увеличение величины магнитного поля при давлениях менее 1 мТор сначала приводит к появлению плазмы в верхней части нижней газоразрядной камеры, а затем (в случае использования однородного магнитного поля) длина интенсивно светящейся части разряда в нижней камере начинает расти, и, наконец, разряд замыкается на нижней фланец, формируя протяженный плазменный столб (см. рис. 1, *а*). Диаметр плазменного столба примерно равен диаметру верхней газоразрядной камеры.



а

б

Рис. 1. Фотографии разряда в случае однородного (а) и неоднородного (б) внешнего магнитного поля

Изменение конфигурации магнитного поля позволяет управлять положением плазменного столба, в том числе поворачивать его под углом, близким к 90 градусам (см. рис. 1, *а*).

Качественно полученные результаты можно объяснить следующим образом. Ток, текущий по антенне, возбуждает разряд в верхней газоразрядной камере, где появляется плазма. Внешнее магнитное поле заставляет электроны двигаться вдоль силовых линий. Если длина свободного пробега электронов оказывается достаточно большой, электроны выходят из верхней колбы, и возникает разряд в нижней камере. При достаточно больших длинах свободного пробега и индукции внешнего магнитного поля разряд замыкается на нижний заземленный электрод. Движение электронов поперек магнитного поля затруднено, поэтому в случае использования однородного магнитного поля наблюдается резко очерченный в радиальном направлении плазменный столб. Искривление силовых линий приводит к изменению траекторий движения электронов и положения плазменного столба. Рост давления приводит к уменьшению длины свободного пробега и исчезновению плазменного столба. Так, при давлениях более 1 мТорр формирования протяженного плазменного столба не происходит, причем длина ярко светящейся части разряда уменьшается с ростом давления.

На рис. 2 показано изменение аксиального распределения зондового ионного тока насыщения при увеличении индукции магнитного поля, измеренного для случая однородного поля. Как видно, при отсутствии магнитного поля разряд сосредоточен в верхней части источника плазмы. По мере увеличения магнитного поля максимум ионного тока перемещается в нижнюю камеру источника плазмы, и при магнитных полях, превышающих 36 Гс, разряд локализуется в нижней части источника. Указанный эффект наблюдается при всех рассмотренных мощностях ВЧ-генератора, причем максимальные значения ионного тока растут пропорционально вложенной мощности.

Сравнение экспериментальных данных с результатами математического моделирования позволяет сделать вывод, что изменение аксиального распределения ионного тока при увеличении магнитного поля связано с изменением пространственного распределения ВЧ-полей в плазме. Если в отсутствие магнитного поля электрические ВЧ-поля максимальны в области расположении антенны, то с ростом магнитного поля максимум ВЧ-полей смещается вдоль оси в центральные области разряда. Одновременно поля начинают проникать внутрь плазмы, что связано с возбуждением геликонов и косых ленгмюровских волн в разряде.

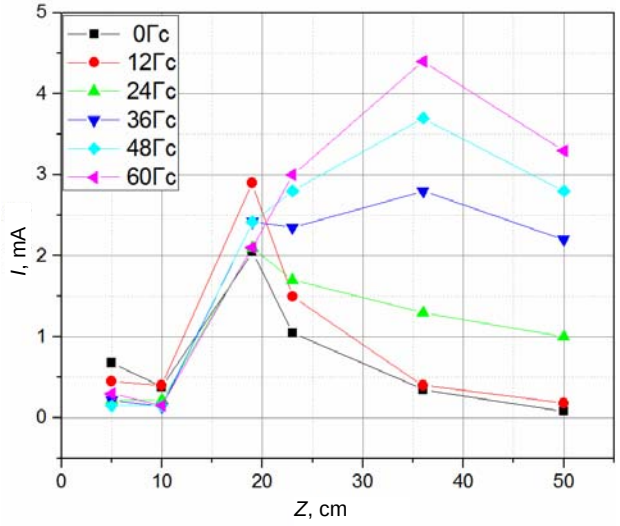


Рис. 2. Аксиальное распределение зондового ионного тока насыщения 400 Вт, давление 0,6 мТорр

На рис. 3 показано радиальное распределение зондового ионного тока насыщения. Как видно, наблюдается колоколообразное распределение ионного тока. Область однородности плазмы в пределах 10 % составляет величину порядка 6 см.

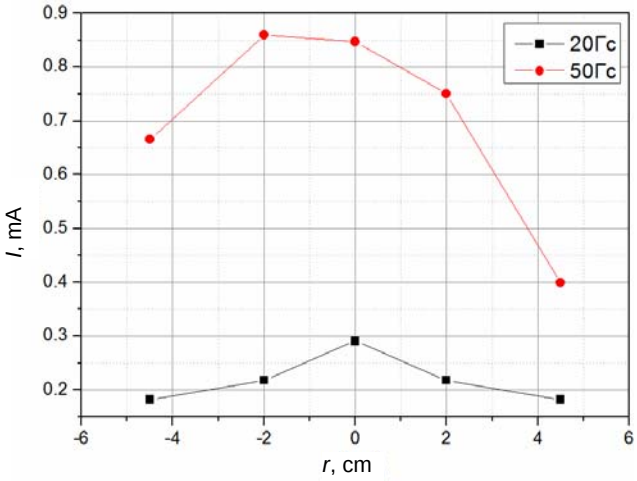


Рис. 3. Радиальное распределение зондового ионного тока насыщения 150 Вт, давление 0,6 мТорр

Заключение

Результаты исследования параметров плазмы «геликонного» разряда в ВЧ гибридной плазменной системе показали перспективность выбранной конструкции макета, оснащенного соленоидальной антенной. Изменение магнитного поля позволяет формировать плазменный столб и управлять его формой. Рост магнитного поля приводит к «перекачке» разряда в нижнюю камеру источника, что позволяет значительно увеличить ионный ток у нижнего фланца источника, где должна располагаться подложка с обрабатываемым образцом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Berghaus B.* // UK Patent. No. 510993. 1938.
2. *Mattox D. M., McDonald J. E.* // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. P. 2493.
3. *Mattox D. M., Kominiak G. J.* // J. Vac. Sci. Technol. 1972. V. 9. P. 528.
4. *Harper J. M. E., Cuomo J. J., Kaufman H. R.* // J. Vac. Sci. Technol. 1982. V. 21. P. 737.
5. *Winters H. et al.* // J. Vac. Sci. Technol. 1998. V. 11. No. 3. P. 657.
6. *Bleven H. A., Christiansen P. J., and Devies B. J.* // Phys. Rev. Lett. A. 1968. V. 28. P. 230.
7. *Кралькина Е. А.* // УФН. 2008. Т. 51. С. 493.
8. *Берлин Е. В., Сейдман Л. А.* Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. — М: Техносфера, 2010.

Investigation of "Helicon" discharge plasma parameters in the hybrid RF plasma system

A. F. Aleksandrov[1], A. K. Petrov[1], K. V. Vavilin[1], E. A. Kralkina[1], P. A. Neklyudova[1], A. M. Nikonov[1], V. B. Pavlov[1], A. A. Ayrapetov[2], V. V. Odinokov[2], V. A. Sologub[2], and G. Ya. Pavlov[2]

[1]Physical Department of Lomonosov Moscow State University
Build. 2, 1 Leninskie Gory, Moscow, 111991, Russia
E-mail: alpetrov57@gmail.com

[2]Research Institute of Precision Machinery Industry
10 Panfilovsky av., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

Received May 26, 2015

This paper represents the results of "Helicon" discharge plasma parameters experimental studies conducted in the layout of the hybrid RF plasma system, equipped with a solenoidal antenna. The last is inspired by the idea of using helicon discharge for ion assistance in combination with RF magnetron or arc discharge for film growth stimulation. With increasing an external magnetic field, a plasma "pillar" is shaped and also an ion current on-the-axis maximum values displacement takes place in the direction of the lower flange. Changing the configuration of the magnetic field allows to control a shape of the plasma column.

PACS 52.80.-s, 52.80.Pi, 52.65.-y

Keywords: inductive, radio frequency, discharge, plasma, ion probe current, magnetic field, helicon, Trivelpiece–Gould wave.

REFERENCES

1. B. Berghaus, UK Patent No. 510993. (1938).
2. D. M. Mattox and J. E. McDonald, J. Appl. Phys. **34,** 2493 (1963).
3. D. M. Mattox and G. J. Kominiak, J. Vac. Sci. Technol. **9,** 528 (1972).
4. J. M. E. Harper, J. J. Cuomo, and H. R. Kaufman, J. Vac. Sci. Technol. **21,** 737 (1982).
5. H. Winters et al., J. Vac. Sci. Technol. **11,** 657 (1998).
6. H. A. Bleven, P. J. Christiansen and B. J. Devies, Phys. Rev. Lett. A. **28,** 230 (1968).
7. E. A. Kralkina, Phys. Usp. **51,** 493 (2008).
8. E. V. Berlin and L. A. Seidman, *Ion-Plasma Processes in Thin-Film Technology* (Technosphere, Moscow, 2010) [in Russian].