

С.В. Бордусов

КЛАССИФИКАЦИЯ СВЧ ПЛАЗМОТРОНОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220027, Республика Беларусь*

Источники плазмы сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда находят все более широкое применение в производстве изделий электронной техники при проведении таких процессов, как вакуум – плазменное осаждение тонких пленок (алмазоподобных, диэлектрических, проводящих и др.), модифицирование поверхностных слоев (азотирование, окисление и др.), селективное удаление (травление) объемных и пленочных материалов и т.д. [1]. Характерной особенностью СВЧ разрядов является возможность обеспечения значительно более высоких концентраций активных плазменных частиц и большей плотности высокоэнергетичных электронов по сравнению с более низкочастотными разрядами. Эта особенность представляет наибольший интерес для реализации плазмохимических процессов, эффективность которых зависит от скоростей плазменных реакций. Кроме того, существенным преимуществом СВЧ разрядов является возможность их устойчивого поддержания в широком диапазоне давлений.

СВЧ разрядные плазменные источники (плазмотроны) в основном разрабатываются под частоту 2,45 ГГц, разрешенную к использованию в промышленных целях. Короткая длина электромагнитной волны этой частоты (12,2 см в открытом пространстве) и малая глубина проникновения в плазму представляют определенные трудности для формирования СВЧ разрядов больших объемов или площадей.

К настоящему времени в технике газового разряда отсутствует сложившаяся системная классификационная характеристика СВЧ плазмотронов [2–4], что затрудняет разработку источников плазмы этого типа и выбор СВЧ плазменных источников для решения определенных производственно-технических задач.

В данной статье предлагается классификация СВЧ плазмотронов, в основу которой положены признаки общности конструктивно-технических решений аппликаторов СВЧ поля, служащих для формирования СВЧ разряда.

В СВЧ плазменной технике аппликаторами называют конструктивные элементы волноводных и коаксиальных трактов передачи энергии, предназначенные для излучения электромагнитной энергии или формирования определенной структуры либо конфигурации СВЧ поля в зоне плазмообразования [5].

По признаку конструктивного исполнения аппликатора СВЧ плазмотроны могут быть условно разделены на электродные и безэлектродные.

Аппликаторы электродного типа в свою очередь подразделяются на многоэлектродные и одноэлектродные (факельные). Особо нужно отметить то, что в предлагаемой классификации к аппликаторам электродного типа относятся излучающие системы, конструктивные элементы которых выполнены в виде стержней или штырей, имеющих гальваническую связь с плазменной средой.

Из одноэлектродных устройств наиболее широкое распространение получили факельные плазмотроны на основе волноводно-коаксиальной системы. В таком устройстве в отрезке прямоугольного волновода с закорачивающим поршнем сделан коаксиально-волноводный переход, по которому энергия электромагнитного поля при правильной установке закорачивающей плоскости передается по коаксиалу в разрядную зону [6].

Многоэлектродные аппликаторы используются, как правило, совместно с магнитными системами разных конструкций и служат для создания разрядных условий так называемого «распределенного

электронно-циклотронного резонанса» [7, 8]. Такие конструктивно-технические решения обеспечивают возможность формирования достаточно однородной плазмы на значительной площади. Электроды-излучатели запитываются либо через делитель от одного источника СВЧ мощности [9], либо от нескольких автономных источников [10].

Безэлектродные аппликаторы могут быть следующих типов: волноводные, резонаторные, антенные, объемные нерезонансные, с замедляющими структурами и использующие эффект «поверхностных волн».

Разрядные устройства на основе аппликаторов волноводного типа конструктивно наиболее просты и представляют собой отрезок волновода, через который проходит диэлектрическая термостойкая трубка из кварца или пирекса, хорошо пропускающая СВЧ энергию. Известны конструкции разрядных устройств с использованием волноводов прямоугольного и круглого сечений. В прямоугольном волноводе разрядная трубка может располагаться вдоль, либо перпендикулярно [11] стенкам волновода. За разрядной трубкой в волноводе устанавливается поглощающая нагрузка или короткозамыкающий поршень. В круглом волноводе разрядная трубка располагается по оси вдоль волновода [12]. Волноводные устройства этого типа, работающие при низких давлениях с использованием эффекта электронного циклотронного резонанса, находят наиболее широкое применение в технологии производства изделий электронной техники.

В качестве аппликаторов резонаторного типа используются прямоугольные [13], цилиндрические [14], сферические [15] и другие типы резонаторов. В зависимости от возбуждаемой моды колебаний объемного резонатора СВЧ энергия вводится в него посредством петли, штыря либо отверстия связи. Наиболее распространены плазмотроны с частичным заполнением плазмой резонирующего объема. Применяется также отделение резонирующего объема от плазменной камеры перегородкой, в которой специальным образом выполнены отверстия связи для излучения СВЧ энергии в зону плазмообразования [16, 17].

СВЧ аппликаторы на основе антенных излучателей в плазмотронах конструктивно могут быть выполнены в виде рупора [18], открытого конца волновода [19], в виде волновода с отверстиями в стенках [20], излучателя в форме плоской [21] или объемной спирали [22], имеющего форму плоской пластины [23], штыря [24] и т.д. Отличительной чертой антенных излучателей является то, что они имеют гальваническую развязку с плазменной средой, хотя конструктивно могут располагаться в зоне плазмообразования. В этом случае электрическая изоляция элементов аппликатора от плазмы осуществляется с помощью радиопрозрачных вакуумплотных перегородок (окон) или чехлов из диэлектрического материала.

Следующим типом разрядных устройств являются плазмотроны с безэлектродным возбуждением нерезонансного разрядного объема, заключенного в металлическом и, как правило, немагнитном корпусе. При этом разряд может возбуждаться либо локально в какой-то части корпуса, отделенной от остального объема кварцевым экраном [25] или специальной перфорированной перегородкой для исключения оптического излучения из плазмы за пределы разрядной камеры [26], либо полностью заполнять объем корпуса и изолироваться от его стенок магнитным полем [27].

Аппликаторы в виде замедляющих структур могут иметь гребенчатую [28], лестничную [29], зигзагообразную или спиральную форму [30]. При этом замедляющая структура может либо охватывать разрядную трубку, либо располагаться в непосредственной близости от разрядного объема. Замедляющие структуры хорошо согласуются с плазменной нагрузкой и за счет рационального выбора длины замедляющей структуры, ее шага и наклона к оси разрядной области можно добиться высокого коэффициента трансформации СВЧ энергии в плазму газового разряда. Однако при использовании этих устройств должны быть предусмотрены защитные экраны, предотвращающие излучение электромагнитной энергии в пространство.

Из числа СВЧ разрядных устройств, использующих эффект возбуждения поверхностных волн, следует особо отметить устройства типа «сурфогайд» и «сурфатрон». Конструктивно сурфогайд [31] состоит из симметрично расположенных сужающихся по узкой стенке отрезков прямоугольного волновода, разрядной трубки, устанавливаемой по оси симметрии перпендикулярно широкой стенке волновода, и короткозамыкающего подвижного поршня, расположенного на противоположном от места ввода СВЧ энергии конце волновода.

Основой конструкции сурфатрона [32] является коаксиально-волноводный аппликатор, функционально состоящий из двух частей: узла связи и возбуждающей структуры. Узел связи штыревого типа служит для введения СВЧ энергии в конструкцию. Возбуждающая структура представляет собой конструкцию коаксиального типа. С одной стороны коаксиал имеет короткозамыкающую плоскость, а с другой стороны между наружным и внутренним проводником коаксиальной линии имеется зазор. При

этом внутренний проводник коаксиальной линии выполнен полым и через него проходит диэлектрическая трубка, в которой возбуждается разряд. В зазоре формируется азимутально симметричная поверхностная волна, распространяющаяся за пределы коаксиальной линии, за счет которой и существует протяженный СВЧ разряд.

В заключение следует отметить, что представленная классификация СВЧ плазмотронов по конструктивно-техническим признакам аппликаторов будет полезна не только при изучении и анализе известных технических решений плазменных источников этого класса, но и при проектировании и выборе типа плазменного источника для решения определенных технологических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев Ю.В., Яфаров В.К. Микроволновое ЭЦР вакуум-плазменное воздействие на конденсированные среды в микроэлектронике (физика процессов, оборудование, технология) // Зарубежн. электрон. техн. 1997. № 1. С. 77–120.
2. Lebedev Y.A. Some properties of the tunable cavity microwave plasma source // Plasma Sources Sci. Technol. 1995. V. 4. P. 474–481.
3. Zakrzewski Z., Moisan M. Plasma sources using long linear microwave field applicators: main features, classification and modeling // Plasma Sources Sci. Technol. 1995. V. 4. P. 379–397.
4. Батенин В.М., Климовский И.И., Лысов Г.В., Троицкий В.Н. СВЧ- генераторы плазмы: физика, техника применение. М., 1988.
5. Ganguli A., Akhtar M.K., Tarey R.D. Investigation of microwave plasmas produced in a mirror machine using ordinary-mode polarization // Plasma Sources Sci. Technol. 1999. V. 8. P. 519–529.
6. Мицуда Ё., Йосида Т., Акаси К. Новая СВЧ- плазменная горелка и ее применение для синтеза алмазов // Приборы для научных исследований. 1989. Т.60. С. 108–111.
7. Пишио М., Дюранде А., Пеллетье Г. Мультипольный источник СВЧ- плазмы с возбуждением по методу распределенного электронного циклотронного резонанса: концепция и характеристики // Приборы для научных исследований. 1988. Т.59. С. 56–60.
8. Заявка 2711035 Франция. МКИ⁶ H05H 1/46. Способ и устройство для генерации плазмы, возбужденной микроволновым излучением / Лоуе В., Жин А. Оpubл.14.04.95
9. Patent 05190294 Japan. Int. Cl. C23C 16/50, H01L 21/302. Apparatus for distributing microwave energy to excite plasma purpose / Pelletier J. Publ. 30.07.93.
10. EP 0459177. Int. Cl. H05H 1/46. Solid state microwave generating array material, each element of which is phase controllable, and plasma processing systems / Cuomo J.J., Whitenair S.J. Publ.12.04.91.
11. Patent 5262610 US. Int. Cl. H01J 37/32. Low particulate reliability enhanced remote microwave plasma discharge device / Huand S.S., Davis C.J., Jucha R.B. Publ. 16.11.93.
12. Lieberman M.A., Gottscho R.A. Design of hight density plasma sources for materials processing // Plasma Sources Thin Film Deposit. and Etching. San Diego. 1994. P. 1–119.
13. Бордусов С.В. Малогабаритная СВЧ-плазменная установка с резонатором прямоугольной формы // Электронная обработка материалов. 2001. № 1. С. 74–76.
14. Patent 4727293 US. Int. Cl. H01J 27/16. Plasma generating apparatus using magnets and method / Asmusen J., Reinard D., Dahimene M. Publ. 23.02.88.
15. Патент 2050610 Франция. МПК H05h 1/00. Высокочастотный плазмотрон. Оpubл. 11.05.71.
16. Patent 10298786 Japan. Int. Cl. C23F 04/00. Surface treating device / Sato H., Nakagawa K., Takugi K., Koide T., Tsukada T. Publ. 11.10.98.
17. EP 0477906. Int. Cl. H01J 37/32. Plasma processing apparatus using plasma produced by microwaves / Ohara K., Otsubo T., Sasaki I. Publ. 01.04.92.
18. EP 0716562. Int. Cl. H05H 1/46. Device for implementing a thin film process for the treatment of large area substrates / Gegendart R.D., Gesche R.D., Kretschmer K.D., Ritter J.D. Publ.12.06.96.
19. Patent 5726412 US. Int. Cl. B23K 10/00. Linear microwave source for plasma surface treatment / Briffod G., Knoi N.T. Publ. 10.03.98.
20. Patent 5955382 US. Int. Cl. H01L 21/00. Microwave excitation plasma processing apparatus and microwave excitation plasma processing method / Yamauchi T., Aoki K., Yamage M. Publ. 21.09.99.
21. Patent 5587038 US. Int. Cl. C23F 1/02. Apparatus for hight density plasma / Joen R., Paulet K. Publ. 24.12.96.
22. Заявка 4337119 ФРГ. МКИ⁶ H05H 1/46. Генератор высокочастотной плазмы / Клаус Ш., Юрген К., Ульф С. Оpubл. 24.05.95.

23. *Yasaka Y., Nazaki D., Koga K., Ando M.* Production of large-diameter plasma using multi-slotted planar antenna // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1999. V.8. P. 530–533.
24. Patent 4566403 US. Int. Cl. H01J 37/32. Apparatus for microwave glow discharge deposition / *Fournier E.* Publ. 28.01.86.
25. Patent 4866346 US. Int. Cl. H01J 7/24. Microwave plasma generator / *Gaudreau M.P., Smith D.K.* Publ. 12.09.89.
26. Patent 5866986 US. Int. Cl. H01J 37/32. Microwave gas phase plasma source / *Pennington M.A.* Publ. 02.02.99.
27. Patent 4778561 US. Int. Cl. H01J 27/18. Electron cyclotron plasma source / *Granbari E.* Publ. 18.10.88.
28. EP 0502269. Int. Cl. H01J 37/32. Method of and system for microwave plasma treatments / *Watanabe S., Nawata M., Fukuyama R., Kakehi Y., Kanai S., Kawasaki Y.* Publ. 09.09.92.
29. *Kieser J., Neusch M.* High rate, large area application of the plasmopolymerization (PP) – process // *Proc. Int. Ion Eng. Congr., Kyoto, 12-16 Sept., 1983.* P. 1447–1450.
30. А.с. 1829879 СССР. МКИ⁶ H05H 1/46, H05B 7/18. Сверхвысокочастотное разрядное устройство / *А.П. Достанко, С.В. Грушецкий, В.А. Ваишкевич.* Оpubл. 27.08.96.
31. Patent 11057460 Japan. Int. Cl. B01J 19/21. Device for exciting gas by surface wave plasma and gas treatment apparatus equipped with device thereof / *Moisan M., Etemadi R., Rostaing J.-C.* Publ. 02.03.99.
32. EP 0043740. Int. Cl. H05H 1/46. Generateur de plasma / *Bloyet E., Leprince P., Marec J.* Publ. 13.01.82.

Поступила 07.08.2001

Summary

Classification of microwave plasmatrons used in the processes of electronic technique devices production is presented. It based on constructive peculiarities and technical features of microwave applicators. The proposed classification of microwave plasmatrons will be useful while projecting and choosing the type of microwave plasma source for certain technical purpose and also for studying and examination well-known constructions of that type plasma generators.
