

СВЧ ПЛАЗМА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Ю.А. Лебедев

*Институт нефтехимического синтеза РАН
119991, Москва, Ленинский проспект, 29. lebedev@ips.ac.ru*

Термин “СВЧ-плазма” объединяет плазменные образования, полученные в различных СВЧ устройствах (СВЧ-разряды). В настоящее время разработаны многочисленные СВЧ устройства для получения плазмы и свойства последней оказываются зависящими от способа ее получения. Эти устройства определяют структуру электромагнитного поля, энергетическую эффективность устройства, широкополосность, зависимость свойств плазмы от частоты, уровни минимальной и максимальной мощности. Поэтому при анализе такой плазмы более целесообразно рассматривать СВЧ-разряд - систему, представляющую плазму в конкретном газоразрядном устройстве.

СВЧ-разрядами (микроволновыми разрядами) обычно называют разряды, создаваемые с помощью электромагнитных волн с частотой, превышающей 300 МГц. Разрешенными для промышленных, медицинских и научных применений являются частоты 460, 915, 2450, 5800, 22125 МГц. Наиболее часто используется частота 2450 МГц.

СВЧ-разряды заняли прочное место в ряду других генераторов плазмы. Свойства таких разрядов и полученной в них плазмы рассматриваются на всех научных мероприятиях, связанных с физикой плазмы, плазмохимией и плазменными технологиями. Интерес к этой области науки и технологии обусловил и проведение специализированных периодических научных совещаний, посвященных проблемам СВЧ-плазмы. Это международные совещания “Strong Microwaves in Plasmas” (проводится раз в три года в ИПФ РАН) и “Microwave Discharges: Fundamentals and Applications” (проводится раз в три года попеременно в России и за рубежом). На основе трудов этих совещаний, а также монографий, посвященных СВЧ разрядам, составлен настоящий обзор [1-10].

В обзоре кратко рассмотрены методы получения СВЧ плазмы. Технические приемы, которые используются для получения СВЧ плазмы свойственны СВЧ диапазону и отличны от применяемых при более низких частотах, используются системы с распределенными параметрами. Плазма может быть создана при давлениях от 10^{-5} Тор до атмосферного в импульсном и непрерывном режимах, используемые средние мощности лежат в пределах от единиц ватт до сотен киловатт. В разряде может поглощаться до 90% падающей мощности. Концентрации электронов в СВЧ плазме обычно велики и превышают критическую для используемой частоты СВЧ поля концентрацию электронов n_{ec} ($n_{ec} [\text{см}^{-3}] \approx 1,24 \cdot 10^{10} f^2 [\text{ГГц}]$).

Основным элементом СВЧ-разряда является устройство, позволяющее вводить электромагнитную энергию в разрядный объем. Все конструкции СВЧ диапазона могут быть условно разделены на несколько групп: генераторы плазмы, основанные на передающих линиях СВЧ, генераторы плазмы на основе резонаторов СВЧ, генераторы плазмы с использованием волн в плазме, генераторы плазмы с применением замедляющих структур, генераторы с распределенным в пространстве вводом энергии в плазму, генераторы плазмы в волновых пучках, генераторы плазмы с электродными СВЧ системами, генераторы плазмы с иницированными СВЧ-разрядами генераторы плазмы с применением комбинаций полей СВЧ диапазона и других частот, генераторы плазмы в СВЧ системах с внешними магнитными полями.

В обзоре кратко рассмотрены особенности физических процессов в СВЧ плазме (пространственная структура разряда, особенности функции распределения электронов по энергиям, энерговклад в плазму, формализм эффективного электрического поля, химическая активность СВЧ плазмы), структурообразование в неограниченной стенками плазме. Проанализированы основные подходы к использованию плазмы для решения

различных прикладных задач (активная зона разряда, зона послесвечения, излучение плазмы), их различия и недостатки. Представлены избранные аспекты применения СВЧ разрядов в плазмохимии, получении волоконных световодов, аналитической химии, газоразрядных источниках света и др.

Основными достоинствами СВЧ-разрядов являются:

- простота получения плазмы с высоким удельным энерговыделением ($>1 \text{ Вт/см}^3$),
- простота получения плазмы с малыми удельными энерговыделениями ($\ll 1 \text{ Вт/см}^3$),
- широкая область рабочих давлений (от 10^{-5} Тор до давлений, превышающих атмосферное давление),
- возможность создания как квазиравновесной, так и существенно неравновесной плазмы,
- простота управления внутренней структурой разряда путем изменения электродинамических характеристик устройства ввода СВЧ энергии в плазму,
- возможность создания плазмы в безэлектродных и электродных системах (в последнем случае отсутствует загрязнение объема и образцов продуктами эрозии электродов),
- возможность создания плазмы в малых и больших объемах, включая свободное пространство (атмосфера Земли),
- возможность обработки больших поверхностей сканированием области плазменного образования, имеющего малые размеры,
- возможность совместного воздействия плазмы и электромагнитного поля на объекты в плазме для увеличения эффективности процесса,
- разработанные семейства разнообразных эффективных СВЧ генераторов плазмы позволяют выбрать конструкцию для любых применений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 02-02-16021).

ЛИТЕРАТУРА

1. Батенин В.М., Климовский И.И., Лысов Г.В., Троицкий В.Н. СВЧ генераторы плазмы: Физика, техника, применение. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Дресвин С.В., Бобров А.А., Лелевкин В.М., Лысов Г.В., Паскалов Г.З., Сорокин Л.М.. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны. Наука, Сиб.отделение, 1992 г.
3. *Microwave Excited Plasmas*. Eds. M. Moisan, P. Pelletier. Amsterdam: Elsevier, 1992.
4. *Microwave Discharges: Fundamentals and Applications*. Eds. C.M. Ferreira and M. Moisan. Plenum Press, New York and London, 1993.
5. *Microwave Plasma and its Applications*. Ed. by Yu.A. Lebedev. Proc. Int. Workshop on Microwave Plasma and its Applications, 5-8 September 1994, Zvenigorod (Russia), The Moscow Physical Society, 1995.
6. *J. Phys. IV France*, 1998, v.8, Pr7. Proc. III Int. Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications, 20-25 April, 1997, Fontevraud (France), Eds. C. Boisse-Laporte and J. Marec.
7. *Strong Microwaves in Plasmas*. Ed. By A.G. Litvak. Institute of Applied Physics RAS, 2000. Proc. of the Int. Workshop. August 2-9, 1999, Vol.1, p.271-290.
8. *Microwave Discharges: Fundamentals and Applications*. Ed. by Yu. A. Lebedev. The United Phys. Soc. of the Russian Federation, Publ. Comp. "Yanus", 2001. Proc. IV Int. Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications, September 18-22, 2000, Zvenigorod (Russia).
9. *Химия плазмы*. Под ред. Л.С. Полака и Ю.А. Лебедева. Новосибирск, Наука, Сибирское отд., 1991.
10. Брандт А.А., Тихомиров Ю.В. Плазменные умножители частоты. М., Наука, 1974.