УДК 533.951

ЭЦР — источник плазмы для вакуумных технологий

В. В. Андреев, А. А. Балмашнов, А. М. Умнов
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Для формирования однородной плазмы высокой концентрации в области объекта обработки большого диаметра предлагается использовать цилиндрический H_{0nq}-резонатор, структура электрического поля в котором определяет возможность его проникновения в плазму с концентрацией частиц, превышающей критическое значение.

В настоящее время микроволновый разряд получил широкое применение в различных технологических процессах, в частности, в модификации физико-химических свойств поверхностей различных материалов и формировании тонких пленок с заданными свойствами [1, 2]. Прогресс в этом направлении обусловлен возможностями микроволнового разряда формировать плазму в широком диапазоне давлений рабочего газа (или смеси газов) с высокой степенью ионизации частиц, с высокой концентрацией таких активных частиц, как атомы, радикалы, возбужденные молекулы, с высокой концентрацией заряженных частиц в условиях контроля их распределения по энергиям.

При этом расширение области возможного применения связано с проблемой формирования низкотемпературной плазмы высокой концентрации вблизи поверхности большого диаметра. Ее решению и посвящена представляемая работа.

В зависимости от поставленной задачи для формирования плазмы могут быть использованы следующие механизмы поглощения микроволновой энергии плазмой:

• нерезонансный "столкновительный" механизм, который реализуется при относительно высоких давлениях рабочего газа в условиях $\nu_{en} >> \nu_{ei}$, где ν_{en}, ν_{ei} — частоты столкновений электронов с нейтральными частицами и с ионами, соответственно;

• резонансный "бесстолкновительный" механизм, реализуемый в условиях $\nu_{en,ei} << \omega$, где ω — частота высокочастотного поля. Наиболее часто используются:

плазменный резонанс

$$\omega = \omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N_e}{m}} = 5{,}7 \cdot 10^4 (N_e)^{\frac{1}{2}},$$

где N_e — концентрация электронной компоненты плазмы ($[N_e]$—см$^{-3}$);
e, m — заряд и масса электрона, соответственно;
электронный циклотронный резонанс

$$\omega = \omega_{-e} = \frac{eB}{mc} = 1{,}76 \cdot 10^7 B,$$

где B — индукция магнитного поля ($[B]$—Гс);
c — скорость света в вакууме;
верхний гибридный резонанс

$$\omega = \omega_{UH} = [(\omega_{pe})^2 + (\omega_{ce})^2]^{\frac{1}{2}} [3];$$

• нелинейный механизм, связанный с различным типом плазменных неустойчивостей, как правило, параметрического характера [4], условием возникновения которых является

$$V_E = \frac{eE}{m\omega} > 0{,}1 \cdot V_T,$$

где E — напряженность высокочастотного электрического поля;
V_T — тепловая скорость электронов ($[V_T]$ — см/с).

При этом пороговое значение поля определяется соотношением:

$$E_{th} \approx 5{,}2 \cdot 10^2 (T_e)^{\frac{1}{2}} (\lambda)^{-1},$$

где $[E_{th}]$— В/см;
T_e — температура электронов ($[T_e]$—эВ);
λ — длина волны высокочастотного поля ($[\lambda]$—см).

С энергетической точки зрения наиболее эффективными являются резонансные механизмы ввода энергии в плазму, в частности, электронный циклотронный резонанс (ЭЦР). Если частота столкновений электронов с нейтральными частицами достаточно мала ($\nu_{en} << \omega$), то в плазме ЭЦР-разряда присутствует значительное

© Андреев В. В., Балмашнов А. А., Умнов А. М., 2004

число высокоэнергетичных электронов, однако при давлениях рабочего газа $P > 10^4$ Торр столкновения ограничивают рост энергии. При этом для поля с правовращающейся поляризацией высокочастотная мощность, поглощаемая единицей объема плазмы, определяется выражением

$$P_r = \frac{N_e e^2 E^2}{2m\nu_{en}^2} \frac{\nu_{en}^2}{(\omega - \omega_{ce})^2 + \nu_{en}^2}.$$

Определенный интерес с точки зрения формирования плазмы высокой концентрации представляет вистлер — электромагнитная волна правой поляризации, которая при $\omega_{ce} > \omega$ способна распространяться в плазме с концентрацией, превышающей критическое значение ($N_e > N_{ec}$, где $N_{ec} = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}$) и транспортироваться в область ЭЦР-взаимодействия [5—7].

Стандартный ЭЦР-реактор [2, 8] состоит из цилиндрической разрядной камеры, представляющей собой резонатор, и системы формирования магнитного поля: либо системы соленоидов, либо постоянных магнитов. Ввод микроволнового излучения, как правило, осуществляется вдоль оси системы через вакуумное окно. При использовании соленоидов спадающее магнитное поле обеспечивает транспортировку плазмы из области ее формирования в область расположения обрабатываемой поверхности. Типичные параметры плазмы ЭЦР-разряда в CH_4 ($P = 4\cdot10^{-4}$—$3\cdot10^{-3}$ Торр) вблизи обрабатываемой поверхности представлены в табл. 1 [7].

Таблица 1

Микроволновая мощность, кВт	Плотность, $см^{-3}$	Температура электронов, эВ
0,2—0,5	$(0,2—0,5)\cdot10^{13}$	10—200
20	$2\cdot10^{13}$	≈ 2
90	$9\cdot10^{13}$	≈ 2

Видно, что увеличение микроволновой мощности сопровождается ростом концентрации частиц плазмы и уменьшением энергетической эффективности источника, что, видимо, является следствием развития параметрических процессов, приводящих к возникновению сильных турбулентностей.

Для формирования однородной плазмы большого диаметра используют системы с постоянными магнитами, создающими сильное магнитное поле вблизи стенок разрядной камеры. Существует большое количество такого типа источников плазмы [1, 2], отличающихся расположением и числом магнитов, а также модами колебаний, возбуждаемых в разрядной камере (резонаторе). В табл. 2 представлены параметры некоторых из них, разработанных в Мичиганском государственном университете [1].

Существенно то, что во всех резонаторных источниках плазмы используются TE_{mnq}, где $m \neq 0$, и реже TH_{01q} моды, в результате чего $\vec{E} \cdot grad\, N_e \neq 0$ и поляризационные эффекты ограничивают величину концентрации частиц плазмы в области ее формирования.

Из представленных результатов видно, что вблизи обрабатываемых поверхностей плотность плазмы может существенно превышать критическое значение для используемой частоты электромагнитного поля. Это является следствием ее эффективной транспортировки из области формирования в область расположения обрабатываемой поверхности за счет амбиполярных диффузионных процессов, определяемых столкновениями частиц и/или движением электронов в пространственно неоднородном магнитном поле:

- вдоль силовых линий магнитного поля ($\vec{B}$) скорость движения частиц плазмы связана с силой $F_l = -\mu\, grad\, B$, где $\mu = \frac{mV_T^2}{2B}$ магнитный момент электрона;
- поперек, если $\frac{\partial B_z(r)}{\partial r} \neq 0$, скорость определяется градиентным дрейфом электронов — $V_{gr} = \frac{V_T^2}{2\omega B_z(r)} \cdot \frac{\partial B_z(r)}{\partial r}$.

Таблица 2

Параметры	MPDR 5	MPDR 9	MPDR 13	MPDR 325	MPDR 20
Диаметр, см:					
резонатора	8,89	17,78	17,78	35,56	45,72
плазмы	4,8	9,1	13,1	24,0	19,6
Число магнитов	8	8	8	12	12
Объем плазмы, $см^{-3}$	54	325	876	3596	2967
Частота поля, ГГц	2,45	2,45	2,45	2,45	0,915
Мода колебаний	TE_{111}	TE_{211}	TE_{211}	Многомодовый	TE_{211}
Мощность, Вт	99—184	168—260	247—616	300—500	190—380
Давление, мТорр	1,1—1,5	0,7—1,3	0,8—1,5	0,6—1,0	0,6—1,5
Потенциал плазмы, В	18,3—22,6	25,5—36,0	17,5—18,5	9,4—10,8	6,8—11,8
Плотность плазмы, $см^{-3}$	$(3—5)\cdot10^{11}$	$(1,3—1,9)\cdot10^{11}$	$(1,2—2,5)\cdot10^{11}$	$(1,0—1,9)\cdot10^{11}$	$(4,6—6,2)\cdot10^{10}$
Энергия ионов, эВ	12,5—28,0	19,7—36,1	19,5—21,3	10,5—14,5	8,4—15,0

Краткий анализ показывает, что в настоящее время отсутствуют системы, которые могли бы быть эффективно использованы для обработки относительно больших поверхностей (диаметром до 30 см) плазмой, с концентрацией частиц $N_e \geq 10^{13}$ см$^{-3}$, при следующих условиях:

• в случае ЭЦР-разряда во всех известных установках имеет место соотношение $\vec{E} \cdot grad\, N_e \neq 0$, вследствие чего плотность электронов в ЭЦР-зоне не может превышать критическое значение для используемой частоты высокочастотного поля (для $f = 2{,}45$ ГГц, $N_{ec} \approx 7 \cdot 10^{10}$ см$^{-3}$). При этом концентрация плазмы вблизи обрабатываемой поверхности определяется пространственным масштабом области ее формирования, способами ее транспортировки в заданном направлении и фокусировки. Следует также отметить, что присутствие в разрядной камере (резонаторе) плазмы с концентрацией частиц, превышающей критическое значение, сопровождается изменением в ней пространственного распределения высокочастотного поля, изменением области локализации ЭЦР-взаимодействия, значительным изменением резонансной частоты;

• при использовании высокочастотных полей большой мощности рост концентрации плазмы связан с нерезонансными механизмами взаимодействия, в результате чего резко падает энергетическая эффективность источника плазмы;

• использование вистлера большой амплитуды для формирования плазмы высокой концентрации связано с возникновением различного типа неустойчивостей, ведущих к модификации пространственного распределения частиц в плазме [9—11], нарушению ее пространственной однородности.

Таким образом, для создания плазмы высокой концентрации $N_e \geq 10^{13}$ см$^{-3}$ вблизи поверхности достаточно большой площади (диаметр ≥ ≥ 30 см) необходима разработка источника, в котором в области ЭЦР темп наработки частиц плазмы будет значительно больше темпа, реализуемого в известных устройствах. Эта цель может быть достигнута использованием в качестве разрядной камеры H_{0nq}-резонатора, аксиальная симметрия электрического поля в котором позволяет исключить влияние поляризационных эффектов в условиях формирования плазмы со сверхкритической концентрацией ($\vec{E} \cdot grad\, N_e = 0$), что обеспечивает неизменность структуры поля в резонаторе и саму возможность создания плазмы с высокой концентрацией частиц.

Схематическое изображение разрабатываемого источника плазмы представлено на рис. 1. Источник состоит из цилиндрической разрядной камеры (H_{0nq}-резонатор) и системы формирования стационарного магнитного поля, представляющей собой электромагниты с профилированными сердечниками или кольцеобразные постоянные магниты, обеспечивающие ЭЦР-условия в областях с максимальной напряженностью высокочастотного электрического поля. При этом профиль магнитного поля определяет как пространственную протяженность области ЭЦР, так и эффективность транспортировки плазмы в область расположения обрабатываемой поверхности. К преимуществам предлагаемого источника следует также отнести высокую добротность H_{0nq}-резонатора и возможность использования торцевых стенок, не имеющих электрического контакта с его корпусом, что является достаточно удобным для ввода обрабатываемых поверхностей в систему и для частотной настройки резонатора.

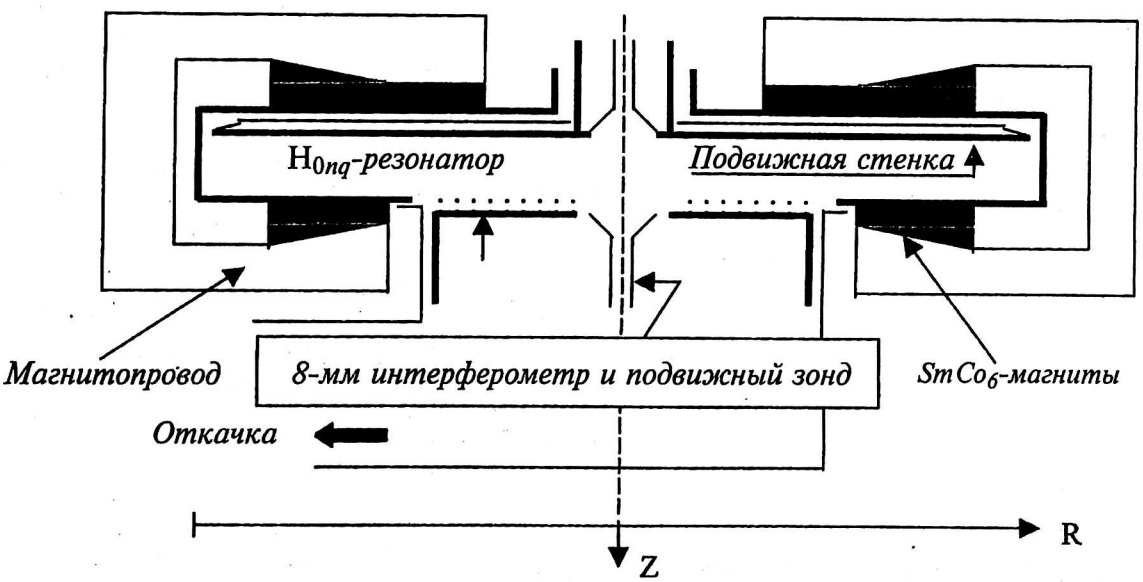

Рис. 1. Схема ЭЦР-источника плазмы

В настоящее время начаты работы по монтажу экспериментальной установки и исследованию процессов, проходящих в разрядной камере (H_{013}-резонатор, диаметр 60 см, f = = 2,45 ГГц), разрабатываемого источника плазмы. Вычислительный эксперимент осуществляется для различных профилей магнитного поля, которые могут быть реально созданы с использованием электромагнитов с профилированными торцевыми поверхностями сердечников или системы постоянных магнитов, два из которых представлены на рис. 2. Используется один из наиболее эффективных методов моделирования плазменных процессов — метод частиц в ячейке (PIC) [12]. Первоначально этот метод успешно применялся для бесстолкновительной плазмы, когда характерное время свободного пробега частиц плазмы меньше времени развития изучаемого процесса. Как правило, это характерно для высокотемпературной плазмы низкой плотности. Для изучения плотной низкотемпературной плазмы метод PIC дополняется методом Монте-Карло (PIC-MC) [13]. В целом схема метода частиц в ячейке сохраняется. Движение частиц плазмы между столкновениями определяется внешними полями и собственным полем плазмы, рассчитанным с помощью решения уравнения Пуассона. Основная проблема при этом заключается в существенном различии временных и пространственных масштабов для ионов и электронов. Для обеспечения точности PIC-метода должны быть учтены временные масштабы, определяемые гирочастотой электронов и частотой внешнего СВЧ-поля. Характерные времена в этом случае составляют десятки пикосекунд. Однако в ряде случаев возможно избежать пространственно-временных масштабов, связанных с дебаевской длиной и плазменной частотой за счет использования неявных схем решения уравнения Пуассона совместно с решением уравнений движения частиц.

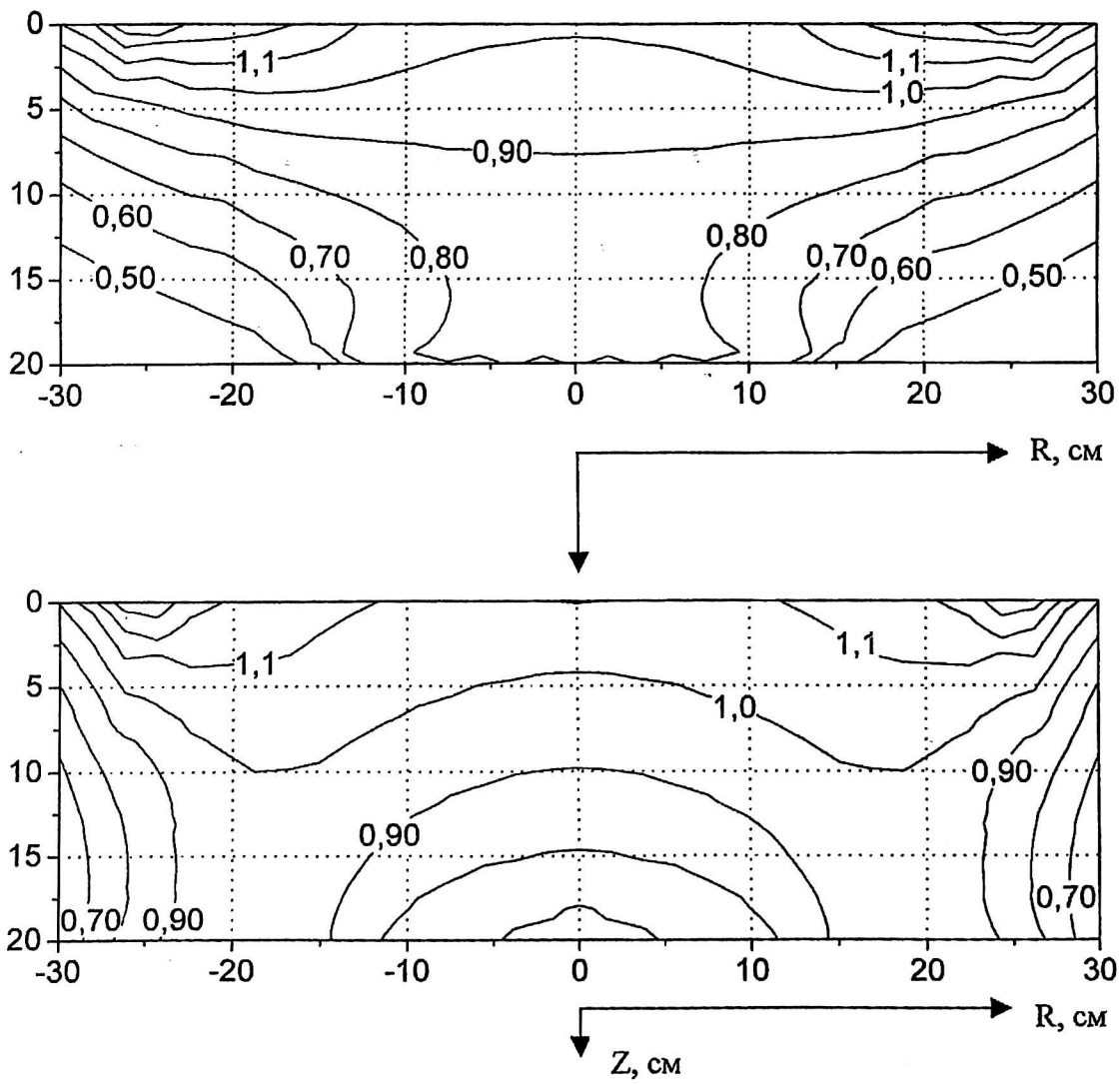

Рис. 2. Пространственные распределения ω_{ce}/ω для различных профилей торцевых поверхностей сердечников электромагнита

В разрабатываемой модели электроны считаются замагниченными. Рассчитывается лишь движение их ведущих центров без учета циклотронного вращения. В то же время сохраняется полный учет взаимодействия ионов с внешними полями и собственным полем плазмы. В модель включены ион-нейтрал столкновения по методу Монте-Карло и электрон-ион, ион-ион столкновения по методу Ланжевена—Монте Карло [14].

Предварительные результаты исследования показывают, что:

в условиях отсутствия столкновительных процессов ($P < 5 \cdot 10^{-4}$ Торр)

$$\frac{V_e}{\nu_{en}} > d;\ \nu_{ei}^{-1},\ \nu_{in}^{-1},\ \nu_r^{-1} > \tau,$$

где V_e, d — средняя скорость электрона и длина его пути вдоль силовой линии магнитного поля, соответственно;

ν_{in}, ν_r — частота упругих столкновений ионов с нейтральными частицами и частота столкновений, приводящих к резонансной перезарядке, соответственно;

τ — время движения заряженных частиц от области их образования к объекту обработки, в области расположения обрабатываемой поверхности распределение частиц плазмы определяется исключительно профилем силовых линий стационарного магнитного поля;

учет столкновений ($P > 10^{-3}$ Торр) существенно влияет как на концентрацию частиц плазмы в области обрабатываемой поверхности, так и на характер его распределения, причем степень влияния сильно зависит от типа рабочего газа, определяющего характер взаимодействия частиц.

Результаты предварительных расчетов показывают наличие для каждого типа газа или смеси газов оптимального давления с точки зрения степени однородности и величины концентрации плазмы вблизи обрабатываемой поверхности.

В ближайшее время предполагаются проведение экспериментальных исследований условий формирования плазмы сверхкритической концентрации в H_{013}-резонаторе и продолжение вычислительного эксперимента по детальному исследованию процессов, сопровождающих транспортировку частиц плотной плазмы, а также по влиянию области локализации ЭЦР-разряда и дифференциальной откачки различных областей резонатора, разделенного диафрагмами, на параметры плазмы вблизи обрабатываемой поверхности.

Авторы работы считают, что в плане формирования плазмы и ее транспортировки предлагаемая конструкция реактора имеет существенные преимущества перед известными [1, 2, 8, 15] и что дополнительные конструктивные решения позволят в дальнейшем применять разрабатываемый источник плазмы не только для создания вблизи обрабатываемых поверхностей плазмы с высокой концентрацией заряженных частиц, но и для создания атмосферы, состоящей из атомов и/или радикалов.

Работа поддерживается грантом Министерства образования РФ.

Литература

1. *Asmussen J.*//Proc. of Int. Workshop "Microwave plasma and its applications", Russia. Zvenigorod. 1994.P. 52—83.
2. *Musil J.*//Ibid. P. 318—351.
3. *Balmashnov A. A., Golovanivske K. S., Kamps E.*//Proc. ICPP. Kiev. 1987. V. 2. P. 239.
4. *Силин В. П.* Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму. — М.: Наука, 1973.
5. *Ohkubo K., Tanaka S.*//Journal of Physical Society of Japan. 1974. V. 36. № 3. P. 843.
6. *Sugai H., Sato V., Ido K., Takeda S.*//Ibid. 1978. V. 44. № 6. P. 1953.
7. *Balmashnov A. A., Juul Rasmussen J.*//Physics Letters. 1981. V. 84A. № 2. P. 65.
8. *Ivanov A. A.*//Proc. of XXII ICPIG. Hoboken, NJ July-August 1995. Aip Press. 1996. Woodburg, New York. P. 41—73.
9. *Brinca A. L.*//Journal of Geophysical Research. 1973. V. 78. № 1. P. 181.
10. *Vomvoridis J. L., Denavit J.*//Phys. Fluids. 1980. V. 23. № 1. P. 174.
11. *Balmashnov A. A.*//Physics Letters. 1980. V. 79A. № 5, 6. P. 402.
12. *Hockney R. W., Eastwood J. W.* Computer Simulation Using Particles. New York: McGrow-Hill, 1981.
13. *Birdsall C. K.*// IEEE Trans. Plasma Sci. 1991. V. 19. P. 65.
14. *Manheimer W. M., Lampe M., Joyce G.*//Journal Comput. Phys. 1997. V. 138. P. 563.
15. *Pelletier J., Lagarde T., Durandet A., Tynelius-Diez K.*// Proc. of Int. Workshop "Microwave plasma and its applications", Russia. Zvenigorod. 1994. P. 352—405.

ECR plasma source for vacuum technology

V. V. Andreev, A. A. Balmashnov, A. M. Umnov
People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

A system based on H_{0nq} cavity for generation of uniform plasma of high density in the region of the treatment object of large diameter is proposed. RF electric field structure provides the possibility for microwave penetration into overdense plasma.