

УДК 533.9.07

СТАЦИОНАРНЫЙ СВЧ ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ

Г. Е. Гогошвили, С. И. Нанобашивили, Г. И. Ростомашвили

Описываются стационарный СВЧ источник плазмы, его характеристики и возможность заполнения открытой магнитной ловушки плазмой, инжектируемой из него. В источнике плазма создается на частоте 2400 МГц (подводимая мощность до 150 Вт) в режиме электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) при давлении аргона 10^{-5} — 10^{-2} Тор. Изменяя условия разряда, можно изменять концентрацию инжектируемой плазмы от 10^9 до 10^{12} см $^{-3}$, при этом $T_e=3$ —8 эВ. Экспериментально показана возможность эффективной инжекции плазмы из источника в открытые магнитные ловушки различной конфигурации.

В разнообразных экспериментах по исследованию плазмы в магнитных ловушках с целью отработки методов нагрева и удержания плазмы, изучения взаимодействия электромагнитных волн с магнитоактивной плазмой и т. д. используются различные методы заполнения исследуемого объема плазмой. Из существующих способов наиболее часто применяются бесконтактные методы. Среди этих методов в последнее время наибольшее распространение получили СВЧ методы накопления плазмы в ловушке. Обычно формирование плазмы происходит в самой же ловушке в режиме ЭЦР (см., например, [1, 2]). Однако этот способ обладает рядом недостатков. В частности, пределы изменения магнитного поля в ловушке строго ограничены условием существования СВЧ разряда в магнитном поле; с изменением магнитного поля происходит изменение режима разряда и параметров плазмы и главное «горячая» область поглощения СВЧ волн плазмой находится в самой ловушке, что часто весьма нежелательно. В связи с этим представляет интерес использование независимого источника плазмы с регулируемыми параметрами, который будет находиться вдали от ловушки и из которого плазма будет инжектироваться в нее.

Именно этой задаче посвящена настоящая работа: описывается независимый стационарный СВЧ источник плазмы, приводятся его характеристики и возможность заполнения открытых магнитных ловушек различной конфигурации плазмой, инжектируемой из него.

1. Описание экспериментальной установки

Эксперименты проводились на стационарной установке (рис. 1), состоящей из двух основных частей: собственно независимого СВЧ источника плазмы и открытой магнитной ловушки. В СВЧ источнике формирование плазмы осуществляется в кварцевом баллоне 1 с внутренним диаметром 2.6 и длиной 10 см. Подвод стационарной СВЧ энергии (2400 МГц, 150 Вт) к разрядной камере осуществляется стандартным прямоугольным волноводом 2 сечением 7.2×3.4 см, в котором возбуждается волна TE_{01} . Для согласования с волноводным трактом концу баллона придается коническая форма. Разрядная камера помещается в стационарное магнитное поле, создаваемое короткой катушкой 3 с внутренним диаметром 19.5 и длиной 15 см. В катушке создается сильно неоднородное магнитное поле с максимумом на оси в центре катушки. Магнитное поле в центре катушки можно менять плавно от нуля до максимального значения 2000 Э.

Разрядная камера СВЧ источника плазмы подсоединяется к цилиндрической секции 4 длиной 15 см, изготовленной из нержавеющей стали. Внутренний диаметр секции 5.8 см. Она является запердельным волноводом для волны с частотой 2400 МГц. К средней части цилиндрической секции в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, вдоль ее радиуса подсоединено пять патрубков из нержавеющей стали. Они расположены под углом 45° относительно друг друга. К этим патрубкам можно подключать различные диагностические средства, что дает возможность у выхода из источника в одном сечении определять параметры инжектируемой плазмы и ее свойства. Поэтому эта секция одновременно является и диагностической.

К цилиндрической секции 4 с противоположной стороны разрядной камеры источника плазмы соосно с ней подсоединяется исследуемый объем 5, в который и происходит инжекция плазмы. В наших экспериментах в качестве исследуемого объема используется кварцевый баллон с внутренним диаметром 5.6 и длиной 80 см. Баллон размещается в стационарном магнитном поле, создаваемом соленоидом 6 с внутренним диаметром 19.5 и длиной 90 см. Соленоид состоит из 12 идентичных катушек, в каждой из которых по 4 обмотки. Соответствующими подключениями катушек и их обмоток к источнику тока с помощью соленоида можно получить как однородное магнитное поле (длина однородной части 50 см), так поле пробочной и многопробочной конфигурации с регулируемым пробочным отношением и ловушку со встречными полями. Колебание поля со временем не превосходит 0.1 %. Максимальное поле на оси соленоида можно менять плавно от нуля до максимального значения 5000 Э.

Расстояние между СВЧ источником плазмы и основным объемом исследований (соленоидом) можно менять в широких пределах. При расстояниях, больших 30 см, влияние друг на друга рассеянных магнитных полей катушки источника и соленоида практически мало, но оно всегда контролируется и учитывается. В настоящих экспериментах это расстояние было равно 38.5 см.

В процессе экспериментов для определения условий существования разряда в СВЧ источнике плазмы использовали полупроводниковый датчик света 8, который подсоединялся к одному из диагностических патрубков в секции 4 и регистрировал интегральное световое излучение плазмы. Кроме того, измерения параметров инжектируемой плазмы — концентрации заряженных частиц, температуры электронов и их распределения по радиусу — осуществлялись подвижным двойным электрическим зондом 7, который подсоединялся также к одному из патрубков в секции 4.

Что касается определения эффективности заполнения магнитной ловушки плазмой, то оно осуществлялось полупроводниковым датчиком света 9, который мог перемещаться вдоль разрядной камеры 5.

В описываемых экспериментах рабочим газом служил аргон. Плазма в СВЧ источнике создавалась при давлении аргона от 10^{-5} до 10^{-2} Тор. Вакуумная система предварительно откачивалась до давления 10^{-8} Тор.

2. Характеристики СВЧ источника плазмы

В исследованном диапазоне давлений аргона (10^{-5} — 10^{-2} Тор) при помощи стационарной СВЧ мощности в источнике плазмы удается получить разряд лишь в том случае, если в области взаимодействия СВЧ поля с плазмой выпол-

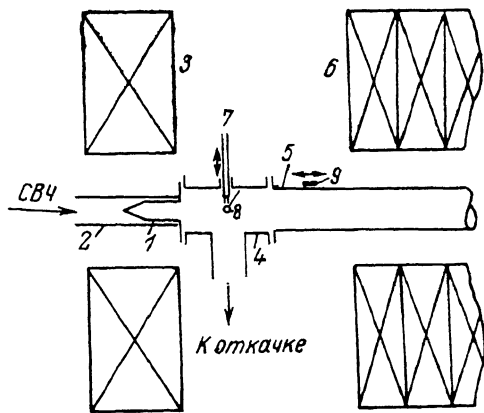


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — разрядная камера; 2 — прямоугольный волновод; 3 — катушка, создающая магнитное поле в источнике; 4 — диагностическая секция; 5 — кварцевый баллон; 6 — соленоид; 7 — двойной электрический зонд; 8, 9 — полупроводниковые датчики света.

няется условие электронного циклотронного резонанса $\omega_0 = \omega_{He} = eH_c/m_e c$, т. е. когда магнитное поле равняется циклотронному ($H_c = 850$ Э) или незначительно отличается от него.

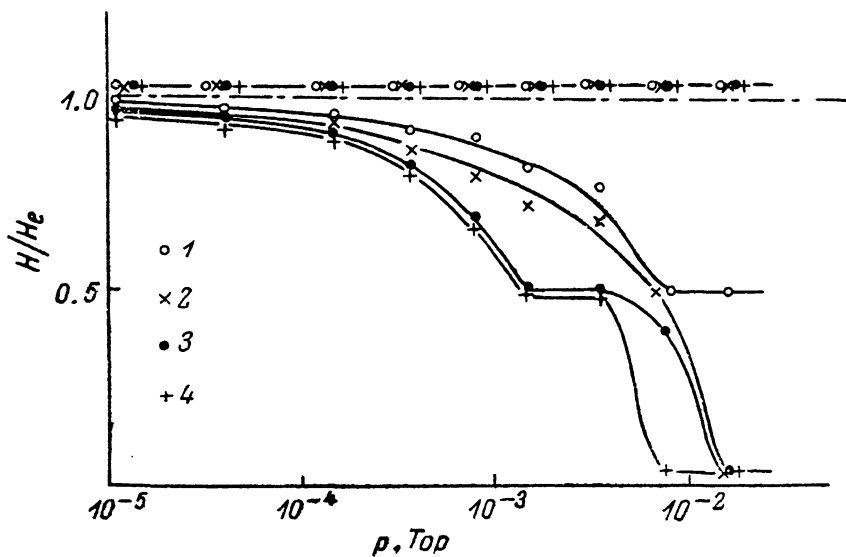


Рис. 2. Область существования плазмы в источнике при значениях подводимой мощности, равных 20 (1), 40 (2), 75 (3) и 100 Вт (4).

После возникновения разряда плазма существует и при изменении магнитного поля в определенных пределах, величина которых зависит от давления нейтрального газа и подводимой к плазме СВЧ мощности. Возникновение и прекращение разряда регистрировалось полупроводниковым датчиком света δ , сигнал с которого подавался на Y-ось двухкоординатного самописца. На X-ось самописца подавался сигнал, пропорциональный магнитному полю в катушке \mathcal{Z} источника плазмы.

Результаты измерений области существования плазмы для различных значений подводимой к плазме СВЧ мощности представлены на рис. 2. Экспериментальные точки на рисунке соответствуют максимальным и минимальным магнитным полям, при которых отмечалось прекращение разряда. Таким образом, область между соответствующими сплошными линиями определяет диапазон изменения магнитного поля, в котором существует разряд в СВЧ источнике плазмы. Как следует из рис. 2, при низких давлениях газа плазма существует при магнитных полях, не отличающихся существенно от циклотронного. С повышением давления область существования разряда значительно расширяется в сторону магнитных полей, меньших циклотронного, что находится

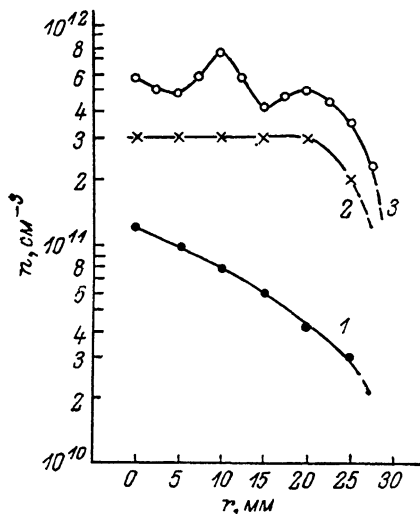


Рис. 3. Распределение концентрации плазмы по радиусу.

p (Тор), W (Вт): 1 — $3 \cdot 10^{-4}$, 50; 2 — 4.6×10^{-3} , 50; 3 — $4.6 \cdot 10^{-3}$, 150.

в хорошем согласии с исследованиями СВЧ разряда в магнитном поле (см., например, [1]). Как следует из [1], в этой области поглощение СВЧ мощности определяется линейной трансформацией волн в верхнем гибридном резонансе.

Измерения двойным зондом показали, что изменением подводимой СВЧ мощности, давления нейтрального газа и магнитного поля катушки \mathcal{Z} можно

в широких пределах изменять концентрацию инжектируемой из источника плазмы. В условиях наших экспериментов концентрацию плазмы можно изменять от 10^9 до 10^{12} см $^{-3}$, при этом температура электронов плазмы $T_e = 3-8$ эВ. Эти изменения вполне контролируемы и хорошо воспроизводимы.

Что касается распределения концентрации по радиусу, то, как видно из рис. 3, при низких давлениях ($p < 10^{-3}$ Тор) и сравнительно небольших подводимых СВЧ мощностях ($W \leq 50$ Вт) концентрация монотонно спадает от центра к периферии. С повышением давления профиль концентрации уплотняется. При высоких давлениях ($p > 3 \cdot 10^{-3}$ Тор) распределение концентрации становится однородным почти во всем сечении камеры, резко спадая на сравнительно небольшом участке вблизи стенки.

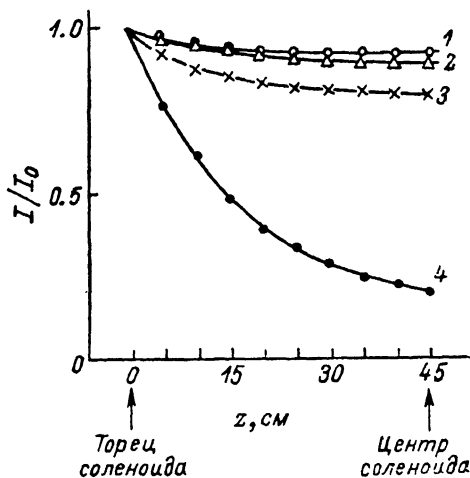
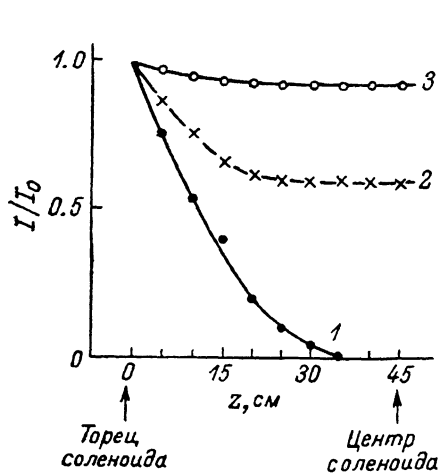


Рис. 4. Распределение интегрального свечения плазмы вдоль соленоида при значениях магнитного поля, равных 0 (1), 90 (2), 390 Э (3) и $p = 2.3 \cdot 10^{-4}$ Тор.

Рис. 5. Распределение интегрального свечения плазмы вдоль соленоида при давлениях нейтрального газа, равных $2.3 \cdot 10^{-4}$ (1), $4.6 \cdot 10^{-4}$ (2), $7.6 \cdot 10^{-4}$ (3), $2.3 \cdot 10^{-3}$ Тор (4) и $H = 390$ Э.

Повышение подводимой СВЧ мощности ($W > 100$ Вт) приводит к расслоению разряда с образованием сложной структуры с несколькими максимумами концентрации по радиусу (рис. 3, 3). Эта структура хорошо наблюдается и на световом излучении плазмы. К сожалению, пока нет ясной физической картины причин образования этой структуры, но очевидно, что это явление связано с особенностями поглощения электромагнитных волн при сравнительно большой напряженности электрического поля вблизи электронного циклотронного резонанса.

Измерения с помощью двойного зонда флуктуаций плотности по сечению плазмы показали, что во всем исследовавшемся диапазоне они практически отсутствуют.

3. Инжекция плазмы в ловушку

В первых экспериментах об эффективности заполнения ловушки плазмой судили по интегральному световому излучению плазмы. Как известно, в слабоионизированной плазме интенсивность интегрального светового излучения плазмы при постоянной температуре пропорциональна концентрации плазмы и поэтому их относительные изменения должны совпадать. Действительно, проведенное нами исследование показало хорошее совпадение относительных изменений (в одном сечении) концентрации плазмы, измеренной двойным электрическим зондом 7, и интегрального светового излучения плазмы, измеренного полупроводниковым датчиком 8. Это дало нам возможность по изменению интегрального светового излучения плазмы судить об относительных измене-

ниях концентрации. В наших экспериментах распределение света вдоль исследуемого объема 5 регистрировалось движущимся полупроводниковым датчиком 9.

На рис. 4 приведено распределение интегрального свечения плазмы в пределах соленоида 6 в случае однородного магнитного поля при давлении аргона $2.3 \cdot 10^{-4}$ Тор. Видно, что в отсутствие магнитного поля (кривая 1) концентрация плазмы быстро спадает с расстоянием. Эксперименты показали, что характерная длина спада с увеличением давления нейтрального газа уменьшается и при давлении $p > 5 \cdot 10^{-3}$ Тор плазма практически уже не выходит за пределы диагностической секции 4.

Наложение магнитного поля соленоида приводит к эффективному сжатию плазменного шнура и его полному отрыву от стенок камеры. Кроме того, оно приводит к эффективному затягиванию плазмы в ловушку. С увеличением магнитного поля происходит более однородное заполнение исследуемого объема плазмой (рис. 4, 2, 3).

Однородность заполнения зависит не только от величины магнитного поля, но и от давления нейтрального газа. Как видно из рис. 5, при $p < 10^{-3}$ Тор однородность заполнения весьма высока, а с увеличением давления при $p > 10^{-3}$ Тор характерная длина спада концентрации резко уменьшается.

Кроме того, в первых экспериментах показана возможность заполнения плазмой магнитных ловушек пробочной и многопробочной конфигурации и ловушки со встречными полями [3].

Заключение

Таким образом, эксперименты показали эффективность действия независимого стационарного СВЧ источника плазмы, с помощью которого можно получить спокойную плазму с изменением ее концентрации в широких пределах (10^9 — 10^{12} см $^{-3}$). При этом температура электронов плазмы равна 3—8 эВ. Кроме того, имеется возможность управления и профилем концентрации.

Первые эксперименты показали возможность эффективной инжекции плазмы из СВЧ источника в открытые магнитные ловушки различной конфигурации. Исследование характеристик и свойств плазмы, накапливаемой в этих ловушках, является предметом дальнейших исследований на нашей установке.

Литература

- [1] Anisimov A. I., Budnikov B. N., Vinogradov N. I. et al. Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res., 1969, v. 11, p. 399—413.
- [2] Залесский Ю. Г., Комаров А. Д., Лаврентьев О. А. и др. Физика плазмы, 1979, т. 5, № 5, с. 954—957.
- [3] Gogiashvili G. E., Nanobashvili S. I., Rostomashvili G. I. Proc. 17th Int. Conf. Phenomena Ionized Gases. Budapest, 1985, p. 951—953.

Институт физики АН ГССР
Тбилиси

Поступило в Редакцию
11 июля 1986 г.