

УДК 533.9.03

Генератор плазмы на основе автоколебательного геликонного разряда

К. М. Гуторов, И. В. Визгалов, В. А. Курнаев

Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Москва, Россия
E-mail: gkost@pochta.ru

Приведено описание генератора плазмы с автовозбуждением колебаний геликонного типа. Электромагнитные колебания развиваются в заполненном плазмой объеме, помещенном в продольное магнитное поле, вследствие неустойчивости контакта между плазмой и отрицательно смещенным холодным катодом с высокой эмиссионной способностью. Эффективность разряда сравнима с эффективностью традиционных геликонных разрядов, но для его осуществления не требуется СВЧ-техники.

PACS: 52.35.Hr; 52.35.Qz; 52.40.Hf; 52.50. Dg

Введение

Уникально высокая добротность и эффективность геликонных резонаторов для ВЧ-разрядных систем с внешней антенной индукционного типа были впервые обнаружены и исследованы Р. Босвеллом [1]. Обширные теоретические исследования геликонных источников плазмы были сделаны Ф. Ченом [2] и А. А. Рухадзе [3]. В настоящее время источники плазмы данного типа все чаще применяются в технологических и исследовательских установках, что обусловлено очень высокой энергетической эффективностью геликонного разряда. Так, в работе [4] был описан плазменно-поверхностный генератор электромагнитных колебаний. Рассмотрено автовозбуждение высокочастотных колебаний в цилиндрическом газоразрядном модуле с продольным магнитным полем, позволяющее повысить удельную мощность, вкладываемую в разряд, и плотность генерируемой плазмы. Была разработана модель, описывающая основные параметры автоколебаний, также указано на возможность дальнейшего повышения частоты автоколебаний за счет уменьшения геометрических размеров разрядной системы с учетом ее резонансных свойств и сделаны предположения о существовании режимов, допускающих распространение геликонных мод в плазме разряда.

Дальнейшие эксперименты позволили получить автовозбуждение геликонных мод в разрядной системе, работающей в конфигурации плазмозаполненного резонатора. Как и предполагалось, переход к геликонному автоколебательному разряду позволил повысить плотность плазмы, ионный выход и эффективность энерговклада в разряд.

Разработанный геликонный автоколебательный источник обладает всеми достоинствами традици-

онных геликонных источников с внешними антеннами, а также преимуществами ВЧ-автоколебательных разрядов [4], а именно: простота конструкции, отсутствие внешних ВЧ-генераторов, антенн, устройств согласования; кроме того, все переменные поля существуют только внутри разрядной камеры при постоянных во времени напряжениях во внешней цепи.

Возбуждение геликонных мод

Условием возникновения автоколебаний является наличие неустойчивости электрического контакта между холодным катодом и плазмой разряда, обусловленной N -образной мгновенной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) катода с повышенной электрон-электронной эмиссией. Падающий участок ВАХ с отрицательным дифференциальным сопротивлением способствует развитию неустойчивости, при этом катод работает как усилительный элемент [4].

Газоразрядный модуль в нашем эксперименте является плазмозаполненным резонатором, на собственных частотах которого и возникают колебания. Резонатор может быть открытого типа, при этом плазма распространяется по разрядному каналу на значительное расстояние от выходного отверстия модуля, или закрытого типа, когда выходное отверстие перекрыто диафрагмой или облучаемым образцом. Для возникновения колебаний геликонного типа необходимо первоначальное заполнение модуля форплазмой, обеспечивающей присутствие высокоэнергетичных электронов для развития неустойчивости плазменно-поверхностного контакта и достижение требуемого порога по плотности для распространения геликонных волн. В описываемых экспериментах пучково-плазменный разряд (ППР) в водороде при давлении 10^{-2} —

10^{-1} Па обеспечивал предварительное заполнение модуля плазмой с плотностью $n = 10^{11}$ см $^{-3}$. Водородная плазма используется для проведения исследований в управляемом термоядерном синтезе (УТС) и для технологических целей, водород практически не распыляет поверхность холодного катода.

Перевод разряда в автоколебательный режим осуществляется подачей отрицательного напряжения на холодный катод. С ростом величины смещения увеличивается ток разряда, а после достижения порогового значения, соответствующего началу падающего участка ВАХ (обычно в интервале 100—200 В), происходит переход от устойчивого режима к неустойчивому. При дальнейшем увеличении смещения (до значений, соответствующих середине падающего участка ВАХ) устанавливается колебательный режим. Мощность вкладывается в разряд через поддерживаемый источником напряжения смещения ток вторичных электронов с холодного катода. В колебательном режиме величина среднего тока с катода в несколько раз превышает величину тока в режиме без колебаний. Этот эффект является следствием экстремально высокой вторичной электрон-электронной эмиссии, обусловленной присутствием группы высокоэнергетичных электронов в плазме и наличием сильного переменного электрического поля в тонком диэлектрическом слое на поверхности катода. Фактически имеет место стимулированная электронами полевая эмиссия, причем плазменный контакт снимает ограничение тока объемным зарядом, существующее в вакуумном случае. Изначально высокоэнергетичная группа электронов в плазме создается электронной пушкой, обеспечивающей горение ППР, но при переходе в колебательный режим для поддержания разряда достаточно высокоэнергетичных электронов, образующихся непосредственно в геликонном разряде [5].

Переход к геликонному разряду сопровождается изменением свечения плазменного шнура (рис. 1). Справа на фотографиях виден торец резонатора с выходным отверстием, из которого вытекает плазма. При работе в режиме ППР плазменный шнур, привязанный к электронному пучку, заполняет только часть резонатора и смещен немного вниз от оси системы (см. рис. 1, а). В геликонном режиме (см. рис. 1, б) плазма заполняет весь объем резонатора, при этом центр плазменного шнура светится ярче периферии и расположен строго по оси резонатора. В автоколебательном режиме разряд продолжает устойчиво гореть и после выключения электронной пушки, обеспечивавшей предварительное заполнение резонатора плазмой ППР. Плазменный шнур транспортирует-

ся вдоль магнитного поля на значительные расстояния от выхода из резонатора, что свидетельствует о распространении геликонных волн в плазменном шнуре (эффект каналирования разряда). Указанный эффект позволяет пространственно разделить источник плазмы и облучаемый ею предмет, что может быть полезно в технологических применениях.

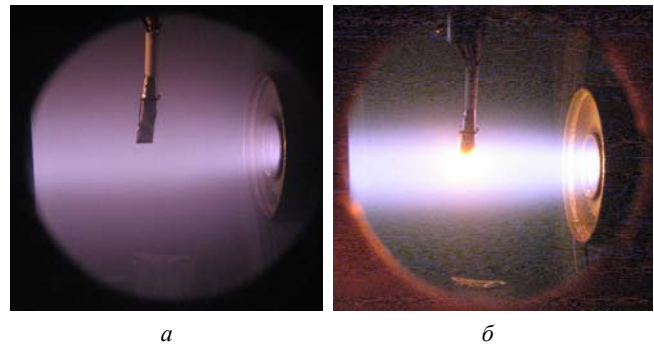


Рис. 1. Разряды:
а — ППР; б — автоколебательный

В цепи разряда наблюдаются колебания тока с амплитудой, превышающей величину постоянного тока от источника смещения. Также наблюдаются колебания потенциала холодного катода из-за наличия паразитной индуктивности между ним и шунтирующим конденсатором (при отсутствии этой паразитной индуктивности потенциал катода должен быть постоянен, колебания должны присутствовать только внутри резонатора).

На рис. 2 представлена типичная осциллограмма ВЧ-колебаний напряжения и тока холоднo-эмиссионного катода при смещении -300 В. Наличие переменных полей в плазме повышает эффективность передачи энергии, приводя к возрастанию плотности плазмы. На рис. 3 показан Фурье-спектр колебаний тока. В этом режиме вторая гармоника является самой мощной.

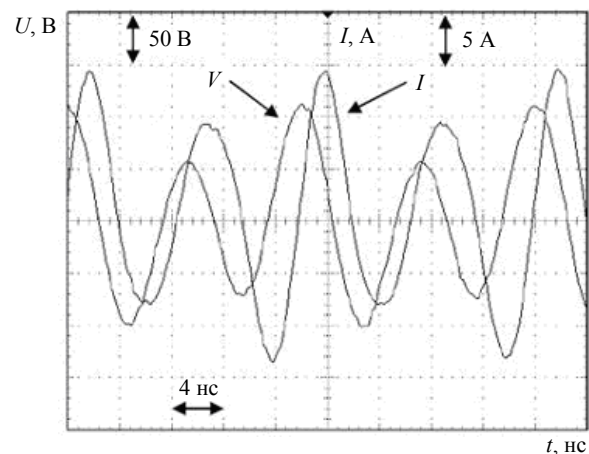


Рис. 2. ВЧ-компоненты напряжения и тока катода при постоянном смещении на нем -300 В

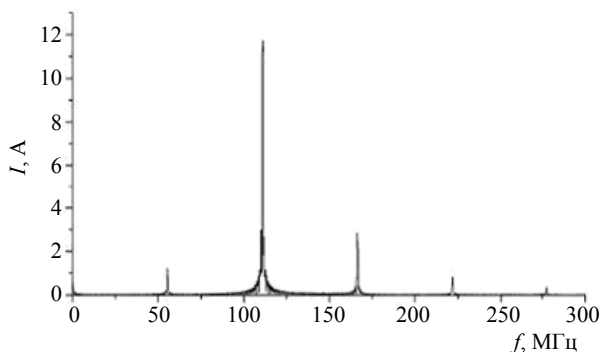


Рис. 3. Фурье-спектр переменного тока

Подавление первой гармоники можно объяснить повышенной диссипацией из-за близости ее частоты к частоте нижнегибридного резонанса. В общем случае гармонический состав колебаний зависит от давления рабочего газа, магнитного поля, электрического смещения и может варьироваться в широких пределах. Пики на Фурье-спектре узкие, что свидетельствует о высокой добротности резонатора, которая может быть оценена как 50—100. На высокую добротность указывает также амплитуда колебаний тока, превышающая величину постоянного тока, отбираемого от источника. Частота основной гармоники (~50 МГц) не зависит от параметров внешнего фильтра источника постоянного тока, но изменяется с плотностью плазмы и магнитным полем. Анализ показывает, что зависимость резонансной частоты от этих параметров находится в хорошем согласии с дисперсионными соотношениями для стоячих геликонных волн моды $m = 0$. Измеренная резонансная частота вместе с известным магнитным полем и размерами резонатора позволяют оценить плотность плазмы из дисперсионного соотношения для геликонных волн:

$$T^2 = \alpha^2 - k^2, \quad \alpha = \frac{ne\mu_0 \omega}{B_0 k},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость;
 e — заряд электрона;
 $B_0 = 600$ Гс — продольное магнитное поле;
 ω — частота основной гармоники;
 α — полное волновое число;
 $k \approx \pi/2 \cdot l$ (для открытого резонатора) — продольное волновое число;
 T — поперечное волновое число;
 n — плотность плазмы.

Усредненная плотность плазмы в резонаторе $n \approx 2,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, что подтверждается зондовыми измерениями на выходе из резонатора.

Заключение

Обнаруженный тип геликонного автоколебательного разряда позволяет создать простой генератор плазмы с повышенной концентрацией и протяженной ее областью, отсутствием полей вне разрядной камеры при постоянном внешнем питании.

Литература

1. Boswell R. W. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1984. No. 26. P. 1147—1162.
2. Chen F. F. // Ibid. 1991. No. 33. P. 339—364.
3. Vavilin K. V., Rukhadze A. A., Ri M. Kh., Plaksin V. Yu. // Technical Physics. 2004. No. 49. P. 691—697.
4. Акел М., Визгалов И. В., Курнаев В. А. // Инженерная физика. 2002. № 3. С. 49—54.
5. Chen F. F., Decker C. D. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1992. No. 34. P. 635—640.

Статья поступила в редакцию 28 мая 2009 г.

Plasma source based on the auto-oscillating helicon discharge

K. M. Gutorov, I. V. Vizgalov, V. A. Kurnaev

Moscow Engineering Physics Institute (State University), Moscow, Russia

E-mail: gkost@pochta.ru

The paper describes a plasma source with auto-generation of the helicon type oscillations. Electromagnetic oscillations arise in the plasma filled volume with a longitudinal magnetic field due to instability of the contact between plasma and negatively biased cold cathode with high emissivity. The discharge efficiency is comparable with the classical helicon discharge efficiency, but there is no need in RF devices.

PACS: 52.35.Hr; 52.35.Qz; 52.40.Hf; 52.50. Dg

* * *