

## ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ «МАГНЕТОР»

В. В. Вайтонис, Г. В. Крашевская, В. А. Курнаев, М. А. Курнаев, Г. В. Ходаченко

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

В настоящее время на кафедре физики плазмы МИФИ создана установка, являющаяся прообразом альтернативной токамакам термоядерной системы, а также предназначенная для использования в качестве технологической.

Идея данной установки – удержание плазмы магнитным полем двух многовитковых кольцевых катушек (внутренней и внешней) с токами противоположного направления, в результате чего в области между катушками создается магнитная пробка (поле в пробке около 1,8 кГс). Токи в катушках подобраны таким образом, чтобы сепаратриса магнитного поля находилась внутри рабочего объема. Удерживаемая плазма расположена в некотором вытянутом вокруг внутренней катушки торе.

Плазма образуется в результате разряда (объемного или низкого давления) в СВЧ поле. В качестве источника СВЧ-энергии используется магнетрон LG 39F мощностью 900 Вт «в луче». Для ввода СВЧ мощности в объем разработано и изготовлено устройство, позволяющее согласовать магнетрон с различными нагрузками в объеме. Данное устройство представляет собой коаксиальную линию передачи, связанную с объемом петлевой антенной через вакуумное уплотнение. Такой ввод менее подвержен пробоем по изолятору.

Установка предусматривает работу с двумя плазмообразующими газами: аргоном Ar и водородом H<sub>2</sub> в диапазоне рабочих давлений  $p = 10^{-1} \div 10^{-5}$  Торр. Время работы ограничено 80 с, что связано с нагревом катушек.

Чтобы определить степень удержания и захвата плазмы в магнитной конфигурации установки, необходимо знать распределение концентраций плазмы в направлении, пересекающем силовые линии магнитного поля (рис. 1). Для этих целей были разработаны диагностическое оборудование и диагностические методики.

Поскольку отсутствует экспериментально проверенная теория таких разрядов, то роль контактных методов оказывается большой в связи с тем, что именно они дают возможность проводить локальные измерения параметров плазмы, по результатам которых можно восстановить их пространственные распределения. На первом этапе в силу простоты исполнения выбран зондовый метод диагностики.

Теория зонда в магнитном поле разработана только для частных случаев ориентации зонда относительно силовых линий поля. Что касается зондовых измерений в присутствии СВЧ, то такие измерения проводятся, но теории, как таковой, тоже нет.

Чтобы минимизировать методическую погрешность, вносимую в измерения наличием магнитного и СВЧ полей, используется двойной зонд, т. к.:

- расстояние между опорным и измерительным электродами мало, поэтому при измерениях в СВЧ-плазме достигается значительное уменьшение действующего между ними переменного напряжения и тем самым уменьшение искажения ВАХ;
- вследствие большой инертности ионов действие СВЧ на ионную часть ВАХ незначительно;
- влияние магнитного поля на ионную часть ВАХ, определяющуюся для двухзондовых измерений, значительно слабее, чем на электронную.

Зонд представляет собой два цилиндрических вольфрамовых электрода диаметром  $d = 0.4$  мм с длиной рабочей части  $l = 5$  мм. Каждый электрод помещен в изолятор, которым является фторопластовая трубочка, и окружен металлическим экраном – посеребрен-

ной оплеткой, имеющей связь с «землей». Расстояние между электродами составляет 6 мм, что исключает перекрытие приэлектродных слоев.

Благодаря наличию у установки аксиальной симметрии, пересечение силовых линий можно обеспечить вращением зонда вокруг определенной оси. Для реализации этой идеи была разработана и сконструирована система перемещения зонда, удовлетворяющая условию, что все детали конструкции (за исключением самого зонда) находятся вне плазменного образования (за сепаратрисой), и обеспечена плавность и равномерность хода зонда на всей траектории перемещения. Точность установки зонда в пространстве  $\pm 1$  мм.

Система смонтирована на одном из боковых фланцев установки и состоит из ввода вращения и узлов, обеспечивающих передачу вращения в другую плоскость посредством натянутого тонкого немагнитного троса. Передаточное отношение системы равно единице, поэтому при повороте ручки для перемещения зонда на заданный угол зонд поворачивается на тот же угол. Вследствие конструктивных особенностей системы значение угла поворота ограничено  $540^\circ$ . Траектория движения зонда показана на рис. 1.

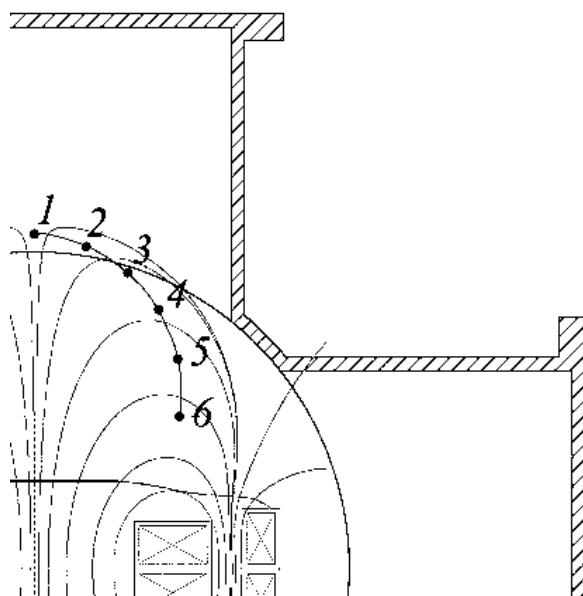


Рис. 1. Траектория движения зонда

В процессе движения зонда необходимо измерять концентрацию плазмы и температуру электронов во многих точках траектории на разных магнитных поверхностях. Получение такой информации возможно только при регистрации в каждой выбранной точке (или мини-области, где параметры плазмы можно считать однородными) полной зондовой характеристики.

Для решения этой задачи был разработан специальный генератор развертки. Наиболее простым и подходящим генератором оказалась обычная силовая электрическая сеть 220 В 50 Гц. Зондовая характеристика в этом случае прописывается за 10 мс. В качестве генератора развертки для зонда была выбрана сеть 127/220 В. Главным достоинством такой сети является ее оторванность от «земли», что облегчает избавление измерительной схемы от части низкочастотных наводок.

На первом этапе требуется, чтобы измерительная схема была, по возможности, проста и экранирована от ВЧ и СВЧ наводок. Анализ различных вариантов привел к созданию элементарной схемы, и, как следствие, постановке эксперимента с ее использованием. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

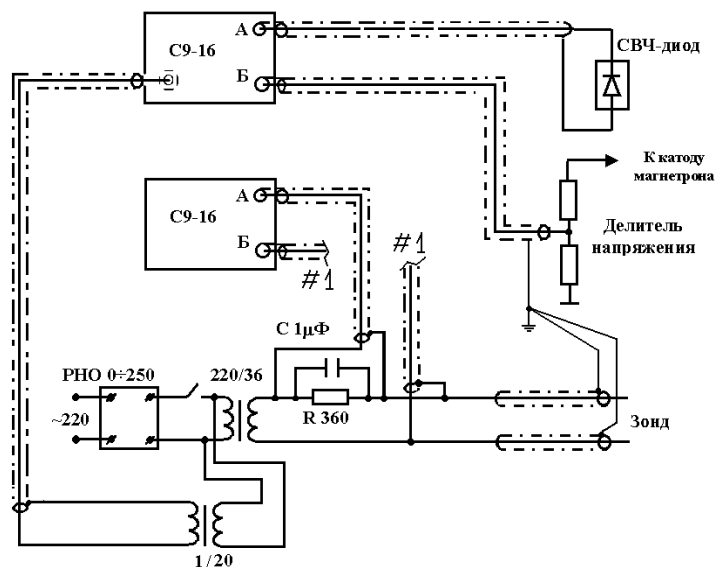


Рис. 2. Схема эксперимента с двумя синхронизированными осциллографами С9-16

Принцип работы схемы следующий. Электрический синусоидальный сигнал частотой 50 Гц от сети через понижающий трансформатор подается на зонд. Амплитуда сигнала регулируется однофазным регулятором напряжения (РНО). Роль понижающего разделительного трансформатора также заключается в «очистке» сети от ВЧ составляющих и наводок (за счет железного сердечника и малой межобмоточной емкости).

Схема дает возможность снимать ВАХ непрерывно по ходу движения зонда (это является главной причиной выбора в качестве источника питания сети переменного тока). Однако в этом случае из-за накопления большого количества данных, с которым обычные осциллографы и графопостроители справиться не могут, необходимо привлечение ЦАП-АЦП с последующей обработкой на компьютере, что рассчитывается сделать в ближайшем будущем.

На рис. 3. представлены осциллограммы токов и напряжений для измерений параметров плазмы. Синхронизация измерений осуществлялась относительно возникновения СВЧ поля в объеме.

При включении питания на магнетрон подается высокое напряжение частотой 50 Гц. Однако при переходе магнетрона в режим генерации на выходе с блока питания мы имеем сигнал напряжения практически идеальной прямоугольной формы.

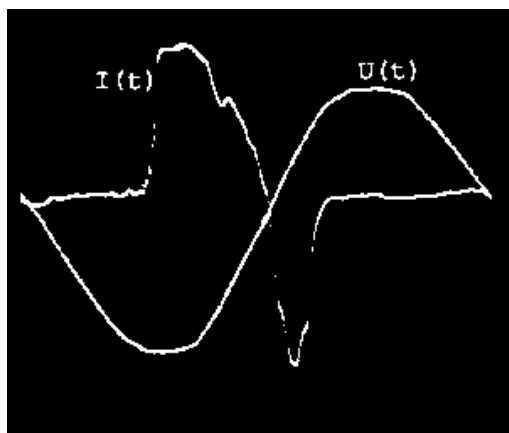


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения с зонда

Так как питание зонда производится от той же сети, то синусоида попадает своими линейными участками на фронты импульса напряжения, а не на «полочку». Поэтому необходимо ее сдвинуть по фазе на  $90^\circ$ , тогда линейная часть как раз попадает на «полку» импульса. Самым простым решением было воспользоваться устройством трехфазной сети. Поэтому, взяв фазу для питания зонда, не участвующую в питании магнетрона, получили сдвиг синусоиды по фазе на  $120^\circ$ .

Из полученных осциллограмм тока и напряжения с помощью осциллографа С9-16 были построены ВАХ двойного зонда. В силу того, что сдвиг произведен не на  $90^\circ$ , в область ионного тока насыщения попадает только один зонд, другим зондом данная область до окончания импульса генерации не достигается. Однако причиной этого явления может быть не сдвиг синусоиды, а огромный градиент концентраций, в результате чего при амплитуде приложенного напряжения, которая составляет порядка 50 В, насыщения также нет. Для экспериментальной проверки были изменены полярности зондов. Результаты измерений показали отсутствие большого градиента концентраций.

Результаты исследования распределения концентраций плазмы и температуры электронов в ловушке при давлении  $p = 10^{-5}$  Торр представлены в табл. 1 и на рис. 1. Видно, что в точке 6 (на магнитной поверхности  $V/V_{\max} = 0.3$ ) степень ионизации плазмы близка к единице. Концентрация плазмы в большинстве точек превышает критическую, что не противоречит данным измерений на технологических установках использующих для генерации плазмы СВЧ-излучение.

Таблица 1

№	$n_i, \text{см}^{-3}$	$T_e, \text{эВ}$
1	$6 \cdot 10^{10}$	6
2	$6,2 \cdot 10^{10}$	5
3	$1,1 \cdot 10^{11}$	8
4	$1,6 \cdot 10^{11}$	7
5	$2 \cdot 10^{11}$	7
6	$3 \cdot 10^{11}$	11

$$\Delta n/n = 0.1; \Delta T/T = 0.3$$