

## Зондовая диагностика плотной плазмы сильноточного импульсного магнетронного разряда

*А.С. Бугаев, В.И. Гушенец\*, Е.М. Окс*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*gvi@opee.hcei.tsc.ru*

**Абстракт.** В докладе представлены результаты по измерению локальных параметров плазмы (концентрация ионов и температура электронов) в планарной магнетронной распылительной системе с медной мишенью методом двойного зонда Ленгмюра. Измерения параметров плазмы выполнялись в области разрядного кольца (над рейстрекром в магнитной ловушке) и на оси магнетрона на малом расстоянии (около 1.5–2 см) от мишени при различных токах магнетронного разряда, а также в режиме мощного импульсного магнетронного распыления (HiPIMS) в квазистационарном режиме.

**Keywords:** двойной зонд Ленгмюра, планарная магнетронная распылительная система, мишень, рейстрек, магнитная ловушка.

### 1. Введение

Магнетронное распыление является важной технологией вакуумного напыления для производства высококачественных покрытий методом физического осаждения из паровой фазы. Магнетронная распылительная система (планарный магнетрон) представляет собой двухэлектродный источник плазмы, состоящий из мишени-катода, за которым располагается магнитная система, и заземленным экраном мишени, выступающим в качестве анода. Для измерения свойств магнетронной плазмы ( $n_e$ ,  $n_i$ ,  $T_e$  и др.) часто используемыми диагностическими средствами являются одиночные зонды Ленгмюра и обычно их использование ограничивается областью, располагающейся вдали от мишени вне магнитной ловушки. В этой части разрядной области влияние магнитного поля на вольтамперную характеристику зонда незначительно, электроны практически незамагничены и интерпретация полученных зондовых характеристик относительно проста [1].

Вблизи поверхности мишени магнетрона величина магнитного поля такова, что электронный ток на зонд ограничен движением в скрещенных электрическом и магнитном полях. По сравнению с электронами, ионы как более тяжелые частицы, слабо подвержены влиянию магнитного поля и ток насыщения ионов остается неизменным, тогда как ток насыщения электронов уменьшается по сравнению с незамагниченным случаем [2]. Теория ленгмюровского зонда при наличии магнитного поля известна своей сложностью и поэтому полная теория так и не была разработана [3, 4]. В большинстве исследований расчет параметров плазмы зачастую выполняется по ионной ветви и небольшой части электронной ветви вольтамперной характеристики одиночного зонда [3, 4].

Измерение локальных параметров плазмы и их пространственное распределение в исследованиях, результаты которых приводятся в статье, осуществлялось с использованием техники или метода двойного зонда – в разрядную область вводятся два одинаковых зонда и измеряется ток в электрической цепи, связывающей зонды с источником питания, в зависимости от напряжения источника питания. При относительно большой разности потенциалов между зондами практически весь ток в двойном зонде ограничен ионным током насыщения на отрицательный зонд. Поскольку величина ионного тока насыщения значительно меньше электронного тока насыщения в одиночном зонде, двойной зонд незначительно возмущает окружающий зонд плазму. В методе двух зондов измерение концентрации заряженных частиц плазмы осуществляется по ионной ветви вольтамперной характеристики зонда, и в наших экспериментальных условиях при относительно небольших

величинах магнитного поля (0.1 Т) влияние магнитного поля на собираемый отрицательным зондом ионный ток незначительно и им можно пренебречь.

В технике двойных зондов не требуется опорного электрода (электрода с заданным потенциалом) – зонды изолированы от заземленного электрода и находятся под плавающим потенциалом, и таким образом вся зондовая система плавает, следуя за изменением потенциала плазмы. Поэтому эта техника зачастую применяется в разрядных системах с относительно высоким потенциалом плазмы (несколько сот вольт), например, в ускорителях с замкнутым дрейфом электронов с заземленным катодом, в плазме без-электродных разрядов, при измерении параметров распадающейся плазмы, а также в плазме с сильной модуляцией ее потенциала.

Однако методу двух зондов присущи некоторые недостатки. Так данный метод не позволяет по результатам исследований определить функцию распределения электронов по скоростям [3]. Но для большей части исследований, связанных с нанесением покрытий, для сравнительного анализа полученных покрытий в разных условиях их нанесения часто достаточно данных по концентрации плазмы и температуры ее электронной составляющей. Несмотря на широкое использование магнетронных распылительных систем, имеется относительно мало экспериментальных исследований прикатодной области магнетронного разряда. Цель этих исследований состояла в апробировании методики двойного зонда как возможного инструмента в исследовании параметров плазмы вблизи магнетронной мишени и главным образом в магнитной ловушке над рейстрекком.

## 2. Схема эксперимента и результаты исследований.

Схемы магнетрона, с планарной медной мишенью диаметром 51 мм, и системы двойного зонда представлены на рис. 1. Магнетрон работает в импульсном режиме с токами амперного диапазона ( $\geq 1$  А) и в режиме мощного импульсного магнетронного распыления (HiPIMS). Источник питания магнетрона построен с использованием двух формирующих линий - по входу от блока зарядки включенных параллельно, а по выходу последовательно. Для согласования выходного сопротивления блока питания и сопротивления магнетрона используется согласующая  $RL$  цепь.

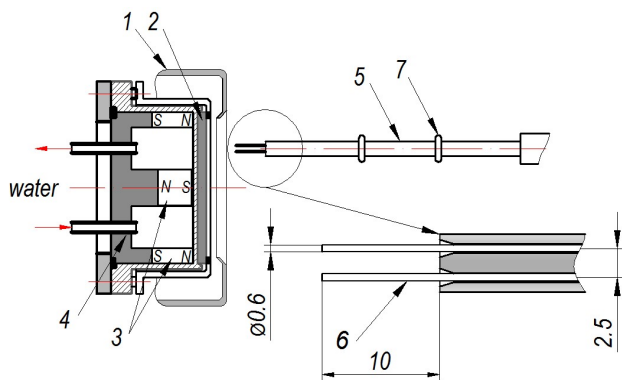


Рис. 1. Схема планарного магнетрона и системы двойного зонда. 1 – анод, 2 – мишень, 3 – магниты, 4 – магнитопровод, 5 – керамическая трубка, 6 – электроды зонда, 7 – кольца из силиконовой резины.

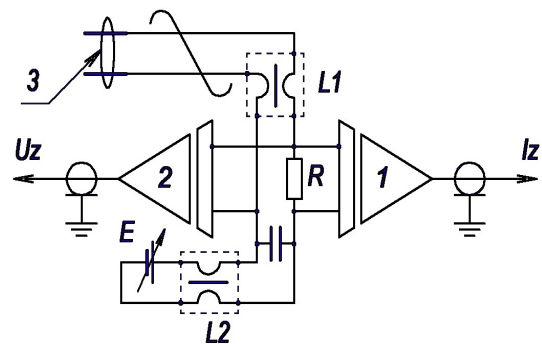


Рис. 2. Схема регистрации тока и напряжения двойного зонда. 1, 2 – дифференциальные пробники, 3 – двойной зонд,  $L1$ ,  $L2$  – EMI фильтры,  $E$  – источник постоянного тока.

Один из вариантов зонда представляет собой два вольфрамовых электрода 6, диаметром 0.6 мм с длиной активной части электродов около 10 мм. Электроды зонда располагаются на расстоянии 2.5 мм друг от друга, и это расстояние задается отверстиями в керамической

трубке 5, в которой они закреплены. Зондовая система монтировалась на металлическом штоке в виде полой трубки, внутри которого располагалась витая пара сигнальных проводов. Размеры электродов зондовой системы выбраны в соответствии с рекомендациями, приведенными в [5].

Ввод зондовой системы в вакуумный объем выполнялся с использованием подвижного вакуумного уплотнения типа Вильсона и, таким образом, зонд можно было перемещать вдоль оси разрядной области магнетрона, а благодаря несоосному расположению зонда и штока и в перпендикулярной плоскости по траектории в виде отрезка дуги радиусом  $\sim 30$  мм за счет вращения зондовой системы. Траектория вращения пересекала центральную ось разрядной системы магнетрона и область пространства, расположенную над мишенью, где располагается рейстрек распыления (место наиболее интенсивного распыления мишени).

Как было отмечено, двойной зонд находится под плавающим потенциалом и поэтому для регистрации тока в цепи электродов зонда и напряжения между ними использовались дифференциальные осциллографические пробники, предназначенные для измерения сигналов устройств под плавающим потенциалом до 1 кВ. Эти пробники отличаются тем, что имеют очень малые значения проходной емкости на заземлённый электрод. Схема подключения пробников, источника питания к двойному зонду приведена на рис. 2.

Для подавления синфазной наводки (сигнала одинаковой амплитуды и направления в зондах) и тока заряда паразитных проходных емкостей сигнальная витая пара пропусклась через ЕМІ-фильтр в виде цилиндра из ВЧ феррита (типа split snap-on core), встроенного внутрь штока вблизи выходного разъема.

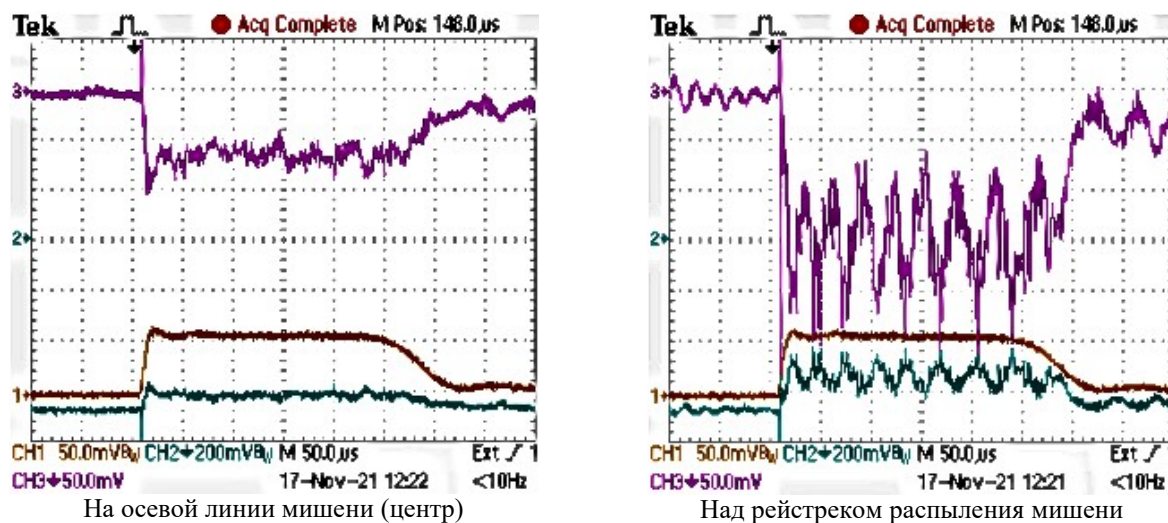


Рис. 3. Осциллограммы тока разряда магнетрона 1 (5 А/дел), напряжения между электродами зонда 2 (10 В/дел) и зондового тока (режим ионного тока насыщения) – 3 (7.5 мА/дел).

На рис. 3, в качестве примера, приводятся типичные осциллограммы тока разряда, зондового тока и напряжения на зондах, измеренные в «стандартных» рабочих условиях (давлении рабочего газа аргона  $\sim 1.3 \cdot 10^{-3}$  мм рт ст.) в двух точках радиальной плоскости, находящейся на расстоянии около 1.5 см от мишени. Одна точка находилась вблизи осевой линии мишени (центр), вторая в области рейстрека.

Ввиду достаточно сильной нестабильности зондового тока, особенно вблизи области сильного магнитного поля (над рейстреком распыления мишени) измерения выполнялись усреднением, как минимум, 16 значений тока с использованием возможностей встроенной математики в осциллографах фирмы Тектроникс. Дальнейшая обработка сигналов осуществлялась с помощью математического пакета OriginPro с использованием такой

процедуры как SignalProcessig. Типичные вольтамперные характеристики (ВАХ) двойного зонда, измеренные вблизи мишени магнетрона – в центре и в области магнитной ловушки (над рейстреком), приведены на рис. 4. Полученные характеристики отличаются высокой воспроизводимостью, хорошей симметричностью и малым наклоном ионных ветвей насыщения. Хорошая симметричность ВАХ зондов – признак одинаковости самих зондов. При нулевом напряжении между зондами ток равен нулю, видимо зонды расположены достаточно близко и изменение потенциала на этом расстоянии в плазме очень мало. Все это свидетельствует о верном выборе размеров зондов и расстояния между ними для условий данного эксперимента.

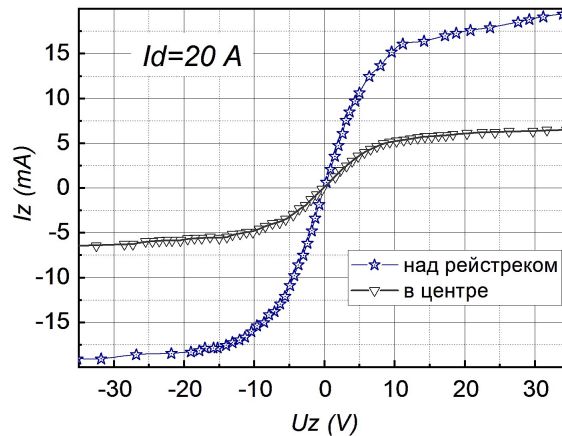


Рис. 4. Типичные вольтамперные характеристики двойного зонда. Условия эксперимента: ток разряда в магнетроне  $I_d = 20$  А, давление фонового газа аргона  $p = 1.3 \cdot 10^{-3}$  мм рт ст.,  $I_z$  – ток зонда,  $U_z$  – потенциал зонда.

Определение параметров плазмы (температуры электронов и концентрации) выполнялось по полученным ВАХ зонда. Так температура электронов рассчитывалась с использованием методики, приведенной в работе [1], а концентрация по упрощенной теории ионной ветви зондовой характеристики для цилиндрического зонда и холодных ионов [3]:

$$I_i = c q_e n_0 (2 z q_e T_e / M_i)^{1/2} S_p,$$

где  $c = 0.4$  (для цилиндрического зонда),  $n_0$  – концентрация плазмы,  $q_e$  – заряд электрона,  $z$  – средняя зарядность ионов плазмы,  $T_e$  – температура электронов,  $M_i$  – масса иона и  $S_p$  – площадь зонда. Для условий нашего эксперимента  $z = 1$ . При расчете концентрации плазмы по вышеприведенной формуле учитывалось, что при токах  $\geq 10$  А, доля ионов меди в квазистационарном режиме составляет 90 и более процентов. При токе 1 А доля ионов меди не превышала 10% [6].

Полученные результаты исследования и расчета параметров плазмы вблизи мишени сведены в отдельную таблицу.

Таблица 1. Результаты исследований.

Ток разряда, А	1		10		20	
Место измерения	центр	рейстрек	центр	рейстрек	центр	рейстрек
Температура $T_e$ (эВ)	4.1	2.9	3.9	4.5	3.7	3.3
Концентрация $n_0$ (1/см <sup>3</sup> )	$7.2 \cdot 10^{10}$	$1.8 \cdot 10^{11}$	$4.7 \cdot 10^{11}$	$1.2 \cdot 10^{12}$	$9.3 \cdot 10^{11}$	$2.7 \cdot 10^{12}$

Как видно из приведенных в таблице данных температура электронов на оси разрядной системы (центр) выше, чем в области разрядного кольца в магнитной ловушке, за

исключением режима разряда с током 10 А, возможно это связано с переходом разряда в сильноточный режим, при котором происходит переход от доминирования ионов фонового газа к плазме с преобладанием металлических ионов. Физика разряда в этих двух режимах работы существенно различается. Скачок температуры не сказывается существенно на концентрации плазмы, так как температура в уравнении входит в подкоренной член уравнения.

### 3. Заключение.

Каждый метод диагностики плазмы имеет свои сильные и слабые стороны с точки зрения точности, чувствительности измерений и практических соображений, таких как сложность экспериментальной установки. Метод двойного зонда несколько сложнее технически чем одинарный зонд, вследствие необходимости использования гальванически развязанных пробников и источника питания. Вторым недостатком – двойной зонд собирает только быстрые электроны из хвоста распределения. Однако из последнего вытекает и преимущество – полный ток в системе зондов не может быть больше ионного тока насыщения, в результате возмущения, вносимые системой двойных зондов минимальны. И еще одна важная положительная сторона – зондовая система вместе с измерительными устройствами и источником питания не имеет гальванической связи с землей, что улучшает помехозащищенность и повышает отношение сигнал/шум. Как было установлено в исследованиях двойной зонд может быть с успехом использован для исследования параметров магнетронной плазмы в области магнитной ловушки, так как полученные результаты близки к данным полученным другими методами [4].

### Благодарности

Эта работа выполнена в рамках государственного задания Института сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, проект FWRM-2021-0006.

### 4. Литература

- [1] Yurii M. Kagan, and V. I. Perel, Probe methods in plasma research, *Sov. Phys. Usp.*, vol. **6**, 767, 1964, doi: 10.1070/PU1964v006n06ABEH003611
- [2] B.W. Koo, N. Hershkowitz, and M. Sarfaty, Langmuir probe in low temperature, magnetized plasmas: Theory and experimental verification, *Appl. Phys.*, vol. **86**, 1213, 1999, doi: 10.1063/1.370873
- [3] R.H. Huddlestone and S.L. Leonard (eds.), *Plasma diagnostic techniques*. New York: Academic Press Inc, 1965.
- [4] P.J. Ryan, *Electron diagnostics of magnetron discharges, Thesis for the degree of Doctor in Philosophy*, Liverpool: University of Liverpool, 2019.
- [5] V.A. Godyak, *Measuring EEDF in Gas Discharge Plasmas in book Plasma-Surface Interactions and Processing of Materials, NATO ASI Series*, vol. **176**, Dordrecht: Kluwer Academic, 1990, doi: 10.1007/978-94-009-1946-4\_4
- [6] E. Oks and A. Anders, Evolution of the plasma composition of a high power impulse magnetron sputtering system studied with a time-of-flight spectrometer, *Appl. Phys.*, vol. **105**, 093304, 2009, doi: 10.1063/1.3125443