ДИАГНОСТИКА ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ

УДК 533.9.07

ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ПЛАЗМЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА

© 2011 г. А. В. Козырев, Н. С. Сочугов*, К. В. Оскомов*, А. Н. Захаров*, А. Н. Одиванова

Томский государственный университет, Томск, Россия

* Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

Поступила в редакцию 16.11.2010 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований свечения плазмы сильноточного импульсного магнетронного разряда методом высокоскоростной фоторегистрации. Показано, что плазма разряда пространственно неоднородна в азимутальном направлении. Формирующиеся плазменные сгустки вращаются с линейной скоростью ~1 см/мкс в холловском направлении дрейфа электронов, а их количество пропорционально току разряда. Неоднородности плазмы из прикатодной области в виде плазменных струй распространяются в направлении анода. Аналитически показано, что формирование неоднородностей обусловлено необходимостью переноса электронного тока большой плотности поперек линий магнитного поля.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сильноточный импульсный магнетронный разряд (СИМР), впервые предложенный в 1999 г. [1], привлекателен не только как инструмент для нанесения покрытий с уникальными характеристиками, но и как источник плазмы высокой концентрации. В традиционных магнетронах, работающих на постоянном или импульсном токе, плотность мощности ограничивается нагревом распыляемой мишени и обычно составляет 1-10 Вт/см². При этом концентрация плазмы вблизи магнетрона составляет 10⁹-10¹¹ см⁻³. Получаемая плазма в основном состоит из ионизированных частиц инертного газа, в котором содержание ионов распыляемого вещества меньше 10% [2]. Сильноточное импульсное магнетронное распыление реализуется при импульсной плотности мощности на катоде от сотен до тысяч Bт/см², при этом. благодаря высокой скважности импульсов, средняя плотность мощности по-прежнему находится в диапазоне 1-10 Вт/см². Увеличение амплитуды тока разряда до сотен ампер обеспечивает генерацию плазмы с концентрацией до 10¹³ см⁻³ [3] на значительных расстояниях от катода, при этом степень ионизации распыленного материала увеличивается до 70-90% [4].

Однако остаются не до конца выясненными механизмы формирования СИМР, в частности, особенности вольтамперных характеристик (ВАХ) этого разряда. В работах [5, 6] показано, что увеличение плотности тока на катоде приводит к ослаблению зависимости тока разряда от напряжения. Известно, что ВАХ магнетронного разряда на постоянном токе описывается выражением [7]

$$I = \alpha U^{\beta}$$

где β меняется в пределах 5 < β < 15, в зависимости от материала мишени и давления в камере. В работе [8] показано, что в СИМР при плотностях тока на мишени (хром диаметром 76 мм) менее 360 мА/см² и напряжении на разряде менее 400 В, $\beta \approx 18$, что согласуется со значениями, характерными для магнетронного разряда на постоянном токе. При плотностях тока 360-570 мА/см² и напряжении на разряде 400–500 В, значение в снижается до $\beta \approx 1$, т.е. зависимость тока от напряжения становится линейной. При плотностях тока в диапазоне 570-1900 мА/см² значение β вновь увеличивалось до $\beta \approx 7.5$, а при плотности тока выше 1900 мА/см² уменьшалось до 1.5. Авторы [6] полагают, что ступенчатое изменение показателя степени в зависимости I(U) определяется последовательным проявлением нескольких причин: обеднением прикатодного слоя атомами инертного газа (аргона), увеличением степени ионизации распыленного материала, снижением эффективности магнитной ловушки при увеличении рабочего напряжения. На наш взгляд, помимо этих механизмов увеличения тока, связанных с ионизационными процессами в плазме, следует рассмотреть влияние на рост тока разряда неоднородностей плазмы, приводящих к увеличению ее проводимости поперек силовых линий магнитного поля. Аналогичный эффект имеет место в разрядных системах с замкнутым дрейфом электронов типа "обращенный магнетрон" и описан, например, в [9].



Рис. 1. Схема экспериментальной установки. *1* – вакуумная камера; *2* – турбомолекулярный насос; *3* – двухкоординатная система перемещения; *4* – электрический зонд, или световод; *5* – окна камеры; *6* – регуляторы расхода газа; *7* – магнетрон с электромагнитной катушкой; *8* – внешний кольцевой магнит; *9* – внутренний кольцевой магнит; *10* – электромагнитная катушка; *11* – распыляемая мишень; *12* – импульсный источник питания магнетрона; *13* – осциллограф; *14* – высокоскоростная трехканальная камера видеорегистрации HSFC PRO.

Цель настоящей работы — исследование свечения плазмы методом скоростной фоторегистрации для получения информации о динамике и однородности плазмы СИМР.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Вакуумная камера (1) с объемом 200 л выполнена из нержавеющей стали и откачивается с помощью турбомолекулярного насоса (2) до остаточного давления не выше 6 × 10⁻³ Па. Внутри камеры расположена двухкоординатная система перемещения (3), на которую закрепляется ленгмюровский зонд, или световод (4). На стенках камеры размещены несколько окон (5), позволяющих производить фоторегистрацию снаружи камеры. Подача рабочих газов в камеру осуществляется через двухканальную систему газонапуска (б). На камеру крепится магнетронная распылительная система (7) с регулируемой степенью несбалансированности. Магнитная система магнетрона состоит из внешнего (8) и внутреннего (9) кольцевых постоянных магнитов из сплава NdFeB, а также электромагнитной катушки (10). В зависимости от величины и направления тока в электромагнитной катушке (от -1 до +1 А) могут реализовываться различные конфигурации магнитного поля. К распыляемому титановому катоду (11) диаметром 90 мм обращен южный полюс внешнего (8) и северный полюс внутреннего (9) кольцевых магнитов. Средний диаметр зоны распыления составлял 70 мм. В качестве рабочего газа в экспериментах использовался аргон, или смесь аргона и азота, давление газа в камере поддерживалось на уровне 0.2 Па.

Напряжение на магнетрон подавалось с импульсного источника питания (12), включающего накопительную емкость C_1 , индуктивность L_1 и тиристорный ключ Т₁. Амплитуда и форма импульса тока разряда определялись напряжением зарядки накопительной емкости С₁ и индуктивностью L_1 . Величина емкости C_1 составляла 10 мк Φ , а величина индуктивности L_1 60 мкГн. Волновое сопротивление LC-цепи и период собственных колебаний при $C_1 = 10$ мк Φ составляли 2.45 Ом и 170 мкс соответственно. Частота повторения импульсов изменялась от 1 до 100 Гц. Напряжение зарядки накопительной емкости С₁ изменялось от 300 до 1000 В. Для облегчения инишиирования импульсного магнетронного разряда использовался вспомогательный слаботочный разряд с током около 200 мА, возбуждаемый от источника постоянного напряжения через высокоомное сопротивление R_1 .

Ток и напряжение на магнетроне, а также ток на зонд регистрировались осциллографом (13). Фотометрические измерения плазмы разряда осуществлялись с помощью установленного на систему перемещения гибкого световода диаметром 0.5 мм с коллиматором на торце. При проведении фотометрических измерений световод располагался на расстоянии 4 см от катода и мог перемещаться радиально, а сигнал с него поступал на фотодиод, сигнал с которого затем регистрировался осциллографом. В ходе экспериментов изменялись: ток магнетрона, пространственное положение зонда и ток катушки.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 37 № 7 2011



Рис. 2. Осциллограммы тока (верхний луч) и напряжения (нижний луч) на сильноточном импульсном магнетронном разряде при различных напряжениях зарядки емкости C_1 : 650 В (*a*), 750 В (*b*), 900 В (*b*).

Для исследования динамики свечения плазмы СИМР использовалась высокоскоростная трехканальная камера фоторегистрации HSFC PRO (14). Этот прибор позволяет получить три снимка со временем экспозиции от 3 нс до 1 с и регулируемым интервалом времени между снимками.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 приведены осциллограммы тока и напряжения на магнетроне для трех значений напряжения зарядки емкости C₁: 650, 700 и 900 В. Осциллограммы получены при работе с титановой мишенью в атмосфере аргона. Длительность импульса тока составляет 85 мкс, что соответствует половине периода колебаний в LC-контуре. До момента включения тиристора T_1 напряжение на разрядном промежутке составляет около 300 В, что соответствует напряжению горения вспомогательного разряда. При включении тиристора T₁ напряжение на магнетроне увеличивается до напряжения зарядки накопительной емкости, но в течение 1-2 мкс уменьшается за счет падения на индуктивности L₁. Пульсации на осциллограммах напряжения в течение импульса свидетельствуют о наличии нестационарных процессов, протекающих в разряде при больших амплитудах тока. Амплитуда импульса тока определяется напряжением зарядки накопительной емкости С₁, волновым сопротивлением *LC*-контура и сопротивлением разряда.

Как можно видеть, напряжение на разряде монотонно падает в течение импульса, а кроме того,

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 37 № 7 2011

напряжение в момент максимума тока заметно снижается с ростом тока, т.е. ВАХ разряда имеет отрицательный наклон.

На рис. 3 приведены осциллограммы тока разряда (I_p), тока фотодиода ($I_{\phi \pi}$), регистрирующего свечение плазмы, попадающее на торец световода, расположенного на расстоянии 40 мм от катода магнетрона и тока на зонд (I_3), расположенный на расстоянии 125 мм от катода. На осциллограммах фототока и тока зонда наблюдаются колебания с периодом около 20 мкс, что свидетельствует о существенной неоднородности движущейся в промежутке плазмы.

Детальные исследования свечения плазмы были проведены с помощью высокоскоростной трехканальной камеры фоторегистрации HSFC PRO. Съемка проводилась при двух положениях камеры: параллельно оси магнетрона – для регистрации свечения на поверхности мишени и практически перпендикулярно оси магнетрона для регистрации свечения плазменного потока. Время экспозиции всех снимков составляло 1 мкс. На рис. 4 представлены снимки свечения СИМР, сделанные в различные моменты импульсов СИМР с амплитудой тока 200 А в сбалансированной конфигурации магнитного поля. Все снимки в фас и профиль относятся к различным импульсам СИМР. В течение первых 10 мкс импульса свечение магнетронного разряда является достаточно однородным и локализовано в области арки магнитного поля магнетрона. При увеличении тока разряда происходит образование плазменных сгустков, существующих достаточно



Рис. 3. Осциллограммы тока импульсного сильноточного магнетронного разряда (I_p), ионного тока на зонд (I_3) и тока фотодиода ($I_{\phi n}$).



Рис. 4. Снимки свечения СИМР в различные моменты импульса: 9 мкс (а), 43 мкс (б), 69 мкс (в), 95 мкс (г). Зарядное напряжение 700 В, амплитуда импульса тока 200 А.

длительное время (10 и более мкс). Отметим также, что свечение плазмы, а также ее неоднородность сохраняется в течение нескольких десятков микросекунд после окончания импульса тока (рис. 4г).

На рис. 5 представлены три снимка, сделанные в течение одного разрядного импульса. Задержка начала экспозиции каждого последующего кадра относительно начала экспозиции предыдущего составляла 2 мкс. Обнаруживается вращение плазменных сгустков по часовой стрелке с линейной скоростью ~1 см/мкс. Поскольку в центре магнитной системы магнетрона расположен северный полюс магнита, то можно определить, что направление вращения плазменных сгустков совпадает с направлением дрейфа электронов.

На рис. 6 представлены снимки свечения СИМР, сделанные в момент максимума тока с экспозицией 1 мкс, для трех значений тока. Количество плазменных сгустков увеличивается с



Рис. 5. Снимки свечения плазмы СИМР в различные моменты одного импульса: 36 мкс (а), 38 мкс (б), 40 мкс (в). Зарядное напряжение 700 В, амплитуда импульса тока 200 А.



Рис. 6. Свечение плазмы СИМР при различных амплитудах тока: 200 (а), 400 (б), 600 А (в).



Рис. 7. Свечение СИМР при амплитуде тока 400 А: в сбалансированном режиме магнетрона (а), в несбалансированном режиме (б).

ростом амплитуды тока импульса. При токе 200 А количество неоднородностей равно трем, а при токе 600 А – около десяти.

Азимутальная неоднородность плазмы СИМР в области магнитной ловушки приводит к образованию плазменных сгустков, вытянутых к аноду. Для регистрации свечения этих сгустков камера была размещена практически перпендикулярно оси разрядной системы, поэтому снимки позволяют визуализировать аксиальный разлет плазменных струй в вакуумную камеру. Наличие неодкак раз и отражается на показаниях оптического и электрического зондов, примеры осциллограмм которых приведены на рис. 3. Существенного повышения однородности плазмы удается достичь при работе магнетрона в несбалансированном режиме (рис. 7б). В этом случае, наряду с линиями магнитного поля, замыкающимися вблизи мишени, существуют линии, направленные в сторону от мишени. Реализуемые в изучаемой магнетронной распылительной системе конфигурации магнитного поля описаны в [8]. Свечение СИМР,

нородностей плазмы в разрядном объеме (рис. 7а)

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 37 № 7 2011

возбуждаемого при несбалансированной конфигурации магнитного поля магнетрона, сосредоточено вблизи мишени, однако, имеется протяженный и однородный луч, отчетливо видимый на расстоянии до 20 см.

Из представленных результатов экспериментов можно сделать несколько предварительных обобщений:

1. Сильноточный режим горения магнетронного разряда наблюдается при токах свыше 100 A, что при площади светящейся области на мишеникатоде $S \approx 20$ см² соответствует средней плотности тока $j \approx 5$ A/см². Эта величина примерно на порядок выше плотности тока магнетронного разряда, описанного в работах [5, 6].

2. Переход разряда в сильноточный режим сопровождается появлением азимутальных неоднородностей свечения плазмы, причем области повышенного свечения вращаются с линейной скоростью ~1 см/мкс в холловском направлении дрейфа электронов. Неоднородность из прикатодной области в виде плазменных струй распространяется в сторону анода.

3. Увеличение амплитуды тока разряда в сильноточном режиме сопровождается заметным уменьшением падения напряжения на промежутке. Это роднит СИМР с дуговыми разрядами, которые также имеют падающую вольтамперную характеристику. Падающая ВАХ свидетельствует о росте эффективности процесса генерации заряженных частиц в разряде. В дуговом разряде это связано с переходом к термоавтоэлектронному механизму эмиссии на катоде.

В сильноточном режиме высокая плотность прикатодной плазмы обеспечивает повышение потока распыленных атомов с металлической мишени. Последние имеют более низкую энергию ионизации, чем атомы рабочего газа. Поэтому ионизация металлических паров происходит более эффективно, чем атомов газа. В этом состоит, на наш взгляд, основная причина снижения требуемого для поддержания сильноточного разряда прикатодного падения потенциала, а следовательно, и напряжения горения всего разряда.

Для оценки максимально возможной плотности тока пространственно-однородного магнетронного разряда можно оценить поток замагниченных электронов, движущихся к аноду в режиме диффузии поперек силовых линий магнитного поля

$$j_e < e D_e \frac{v_e^2}{\omega_e^2 + v_e^2} \nabla n_e, \quad \omega_e = \frac{eB}{m},$$

$$v_e = n_a \sigma_e \sqrt{kT_e/m}, \quad D_e \approx \frac{1}{3} \frac{\sqrt{kT_e/m}}{n_e \sigma_e}.$$
(1)

Здесь m — масса электрона, σ_e — транспортное сечение столкновений электронов с атомами, n_e и n_a — концентрация электронов в плазме и атомов рабочего газа соответственно, B — индукция магнитного поля. Для исследуемого разряда при $\sigma_e \approx 10^{-15}$ см², $n_a \approx 5 \times 10^{13}$ см⁻³, $B \approx 100$ Гс, $kT_e \approx 3$ эВ, $\Delta n_e \approx 10^{14}$ см⁻⁴ получаем из (1) оценку $j_e \sim 30$ мА/см², а полный ток $I_0 = j_e S \sim 0.6$ А. Хотя эта оценка получена для довольно высокой концентрации прикатодной плазмы $n_e \sim 10^{13}$ см⁻³, величина тока оказалась сравнительно небольшой.

Таким образом, пространственно однородный разряд не может обеспечить плотности электронного тока, достигаемой в сильноточном режиме. Для переноса более высокой плотности тока разряд меняет свою форму – он теряет азимутальную однородность плазмы. Благодаря азимутальной модуляции концентрации прикатодной плазмы появляется азимутальное электрическое поле, скрещенное с магнитным полем магнетрона. Азимутальное электрическое поле E_{ω} приводит к двум эффектам: во-первых, плазма получает возможность дрейфовать поперек силовых магнитных линий с большой скоростью $u = E_{\phi}/B$, вовторых, поперечное электрическое поле дополнительно разогревает электроны плазмы, способствуя ускорению процесса ионизации, т.е. локальному повышению концентрации плазмы. Таким образом, процесс развития азимутальной неоднородности увеличивает модуляцию концентрации плазмы.

Если представить, что концентрация прикатодной плазмы меняется в зависимости от азимутального угла ф по закону

 $n_e(\phi) = n_0 + n_1 \sin \mu \phi$, $n_1 < n_0$, $\mu = 1, 2, 3, ...,$ (2) то оценить азимутальную напряженность электрического поля в неоднородной квазинейтральной плазме можно по известной формуле

$$E_{\varphi} = -\frac{kT_e}{e} \frac{\nabla_{\varphi} n_e}{n_e} \approx -\frac{kT_e}{eR} \frac{\mu n_1 \cos \mu \varphi}{n_0 + n_1 \sin \mu \varphi}, \qquad (3)$$

где μ — порядок неоднородности, т.е. количество наблюдаемых по азимуту максимумов концентрации, R — средний радиус плазменной дорожки.

Можно получить оценку величины полного тока в случае азимутальной неоднородности, принимая во внимание только ток, протекающий в области плазменных сгустков

$$I_1 \approx e \Delta y R \mu \int_{-\pi/2\mu}^{\pi/2\mu} n_e(\varphi) \frac{E_{\varphi}(\varphi)}{B} d\varphi = 2\mu n_1 \frac{k T_e}{B} \Delta y, \quad (4)$$

где Δy – ширина плазменной дорожки. Для $\mu = 3$, $n_1 \approx 10^{13}$ см⁻³ и $\Delta y \approx 1$ см из (4) получаем оценку тока $I_1 \sim 30$ А. Этот ток на два порядка величины больше, чем ток I_0 в азимутально-однородной плазме (1). Величина тока (4) действительно проКак видно на рис. 4, плазменная дорожка визуально остается однородной даже при токе разряда 35 А, что заметно превышает оценку плотности тока (1) в однородном режиме. По нашему мнению при токах разряда, выше, чем вытекает из оценки (1), начинает формироваться азимутально-неоднородная концентрация плазмы (2), но при малой глубине модуляции ($n_1 \ll n_0$) она визуально остается незаметной, так как амплитуда напряженности поля (3) еще не способна существенно повлиять на константу ионизации газа и яркость свечения в области повышенной электронной температуры.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при токах выше нескольких десятков ампер, плазма сильноточного импульсного магнетронного разряда теряет однородность в азимутальном направлении и в ней формируются сгустки, количество которых возрастает с ростом тока разряда. Области повышенного свечения вращаются с линейной скоростью ~1 см/мкс в холловском направлении дрейфа электронов. Неоднородности из прикатодной области в виде плазменных струй распространяются в направлении анода.

Аналитически показано, что формирование неоднородностей обусловлено необходимостью переноса электронного тока большой плотности поперек линий магнитного поля. Азимутальная модуляция концентрации прикатодной плазмы приводит к появлению азимутального электрического поля, скрещенного с магнитным полем магнетрона. В этом электрическом поле плазма получает возможность дрейфовать поперек силовых магнитных линий с большой скоростью, кроме того, поперечное электрическое поле дополнительно разогревает плазменные электроны, способствуя локальному повышению концентрации плазмы.

Работа выполнена в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009–2013 годы", проект НК-532П-6, госконтракт П310.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Kouznetsov V., Macak K., Schneider J.M. et al. // Surface and Coatings Technol. 1999. V. 122. P. 290.
- Christou C., Barber Z.H. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2000. V. 18. P. 2897.
- Alami J., Gudmundsson J.T., Bohlmark J. et al. // J. Plasma Sources Sci. Technol. 2005. V. 14. P. 525.
- 4. Bohlmark J., Lattemann M., Gudmundsson J.T. et al. // Thin Solid Films. 2006. V. 515. P. 1522.
- Ehiasarian A.P., New R., Münz W.-D. et al. // Vacuum. 2002. V. 65. P. 147.
- Alami J., Sarakinos K., Mark G., Wuttig M. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 154104.
- Rossnagel S.M., Kaufman H.R. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. V. 223. P. 223.
- Соловьев А.А., Сочугов Н.С., Оскомов К.В., Работкин С.В. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. С. 443.
- 9. Окс Е.М., Чагин А.А., Щанин П.М. // ЖТФ. 1989. Т. 59. С. 188.