

04:07:09

Спектральные характеристики плотной газометаллической плазмы отражательного разряда

© Ю.В. Ковтун, Ю.В. Ларин, А.И. Скибенко, Е.И. Скибенко, А.Н. Шаповал, В.Б. Юферов

Харьковский физико-технический институт НАН Украины,
61108 Харьков, Украина
e-mail: Ykovtun@kpt.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 29 июня 2009 г.)

Спектрометрическим методом определен элементный состав плазмы, который в основном соответствует набору рабочих веществ, вводимых в разряд посредством напуска водорода и распыления титана. Проведенный анализ спектра флуктуаций уровня СВЧ-сигнала показывает, что характерные пики спектра соответствуют ионным циклотронным частотам тех газов и паров металлов, в атмосфере которых протекает разряд. Установлено совпадение характерных пиков оптического и СВЧ флуктуационного спектров в разряде.

Известно [1–3], что отражательный разряд Пеннинга может быть использован в сепарационных технологиях. Такие исследования проводились при $N_p = 10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. В то же время для промышленных устройств с высоким уровнем производительности требуется плотность плазмы $10^{12} - 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ и выше. Особенности образования плазмы таких параметров и ее плотностные характеристики были описаны ранее в [4,5].

Целью настоящей работы являлось определение элементного состава плазмы, корреляционной взаимосвязи спектральных характеристик газометаллической плазмы в оптическом и СВЧ-диапазонах.

Эксперименты проводились на установке „МАКЕТ“, описанной в [4,6]. Газометаллическая плазма образовывалась в результате разряда в бинарной смеси, состоящей из газообразного водорода и распыленного металлического титана, нанесенного на торцевые поверхности катодов. Количество титана в разряде определялось ранее в [5] путем расчета эффективной скорости ионизации газопаровой смеси с различным процентным содержанием титана и сравнение расчетных значений $\langle \sigma v \rangle_{\text{эф}}$ с экспериментально полученными для водородно-титановой плазмы, при этом процентное содержание титана в разряде находится на уровне 40–50% и более. Использовались следующие диагностические средства: с помощью спектрометра проводилось измерение интенсивности спектральных линий в диапазоне 200–700 nm; средняя плотность плазмы определялась с помощью СВЧ-интерферометра с рабочей длиной волны $\lambda = 8 \text{ mm}$; для определения флуктуаций плазмы использовался рефлектометр-коррелятор с $\lambda = 8 \text{ mm}$. Регистрация флуктуаций проводилась с помощью АЦП с частотой 500 kHz^{-1} . Разрядный ток фиксировался поясом Роговского.

Разряд при напряжении 3.4 kV в рабочем газе (водород) инициировался с задержкой 3 ms относительно включения магнитного поля. Длительность магнитного поля 18 ms. Время нарастания плотности плазмы до значения $N_p \geq 1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ составило $\Delta t \sim 200 \mu\text{s}$. Время существования плазменного слоя с плотностью

$N_p \geq 1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, регистрируемое по отсечке СВЧ-сигнала, составило $\Delta t \sim 1.2 \text{ ms}$.

На рис. 1 представлена зависимость изменения магнитного поля, разрядного тока и средней плотности плазмы во времени.

Основными компонентами плазмы являются: Н (рабочий газ), N и ОН (остаточная атмосфера в разрядной камере), С, Fe, Ti. Спектрограмма для водородно-титановой плазмы представлена на рис. 2. Возможным источником поступления углерода в разряд могут быть пары масла, мигрирующие из диффузионного насоса и находящиеся как в пространстве вакуумной камеры, так и на ее стенках. Впоследствии высокомолекулярные соединения в разряде диссоциируют и ионизируются, что приводит к образованию атомарного углерода. Высокомолекулярные соединения также попадают в разряд со стенок в режиме десорбции и распыления. Наличие железа — это распыление внутренних конструктивных элементов разрядной камеры. Титан в составе спектрограммы — это материал напыленного слоя катода, который под действием распыления, катодных пятен

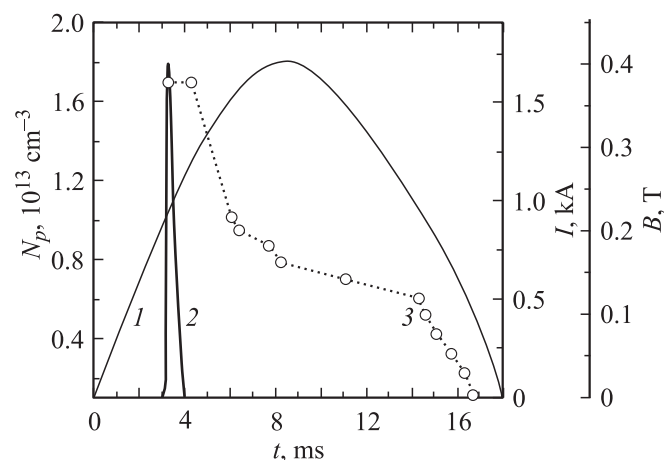


Рис. 1. Временная зависимость магнитного поля, разрядного тока и средней плотности водородно-титановой плазмы: 1 — магнитное поле; 2 — разрядный ток; 3 — средняя плотность.

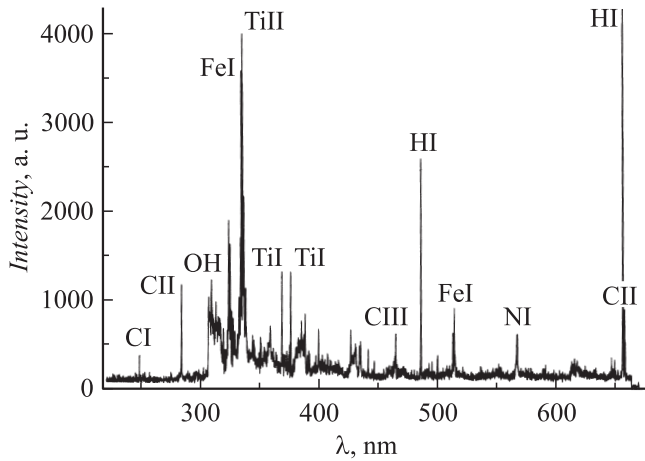


Рис. 2. Спектрограмма водородно-титановой плазмы.

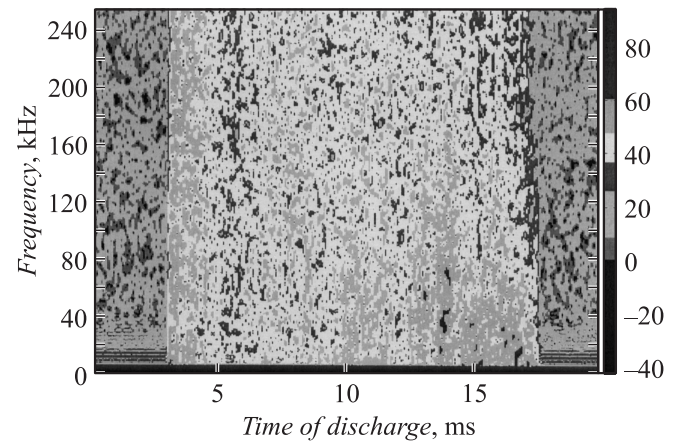


Рис. 3. Спектрограмма СВЧ-сигнала.

(дуг), блистиринга попадает в значительном количестве (до 50% и более) в разряд.

Спектр флуктуаций уровня СВЧ-сигнала, отраженного от плазменного слоя с плотностью $N_p \geq 1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, во времени представлен на рис. 3 (обзорный) и рис. 4 (в различные моменты времени). Временной интервал „окна“ наблюдения спектра флуктуаций (на рис. 4) составил $200 \mu\text{s}$. В спектре флуктуаций уровня СВЧ-сигнала зондируемого слоя присутствуют колебания с частотами, соответствующими циклотронным частотам ионов, находящихся в плазме.

Циклотронная частота зависит от массы иона, изменение ее пропорционально изменению магнитного поля, в нашем случае магнитное поле возрастает во времени. Таким образом, возможно идентифицировать наблюдаемые в спектре флуктуаций колебания с частотами, соответствующими циклотронной частоте для ионов различного сорта. Значение магнитного поля принималось равным значению поля в данный момент времени на расстоянии r (r — радиус плазменного слоя) от оси z . Расстояние x от границы плазмы до плазменного слоя с критической плотностью определялось по фазе отраженного сигнала

$$\Phi = \frac{2\omega}{c} \int_0^x \sqrt{1 - \frac{N(x)}{N_{\text{cr}}}} dx - \frac{\pi}{2}, \quad (1)$$

где N_{cr} — значение критической плотности для зондирующей волны; $N(x)$ — плотность плазмы в точке x ; ω — частота зондирующей волны; c — скорость света.

Радиус плазменного слоя в линейном приближении равен

$$r = \frac{3}{8} \lambda \Phi(t), \quad (2)$$

где λ — длина зондирующей волны; $\Phi(t)$ — фазовый сдвиг, вызванный наличием плазмы, в момент времени t .

Как видно из рис. 4, в различные интервалы времени, например, для ионов N^+ и O^+ , происходит увели-

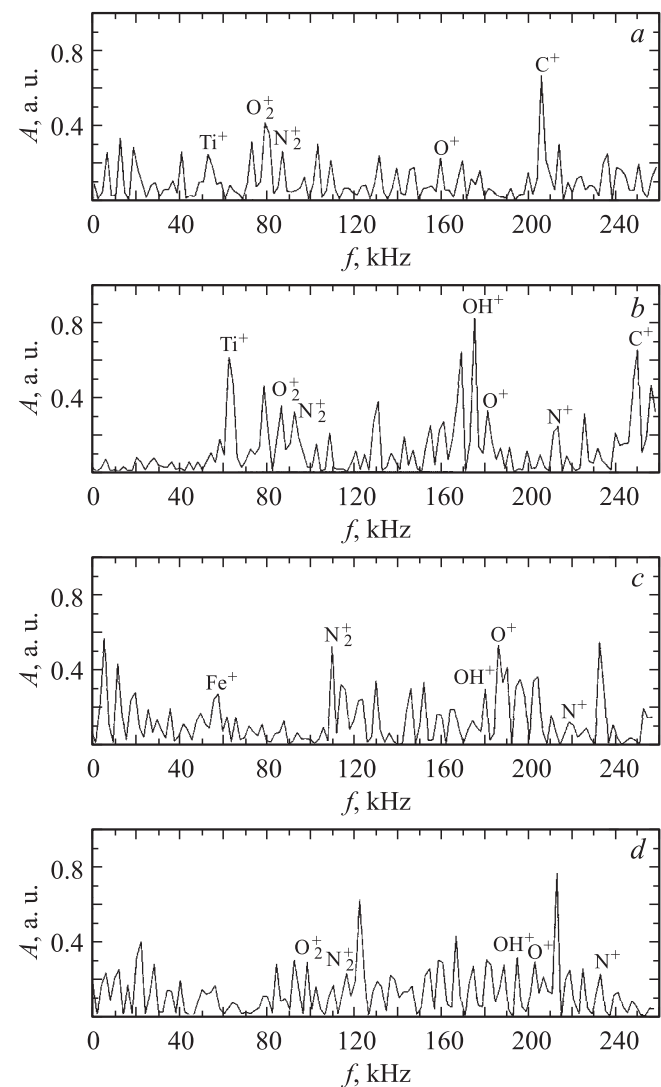


Рис. 4. Спектр флуктуаций уровня отраженного от плазменного слоя с $N \geq 1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ сигнала водородно-титановой плазмы в различные моменты разряда: a — интервал времени 3.2–3.4 ms от начала включения магнитного поля; b — 3.4–3.6; c — 3.6–3.8; d — 3.8–4 ms.

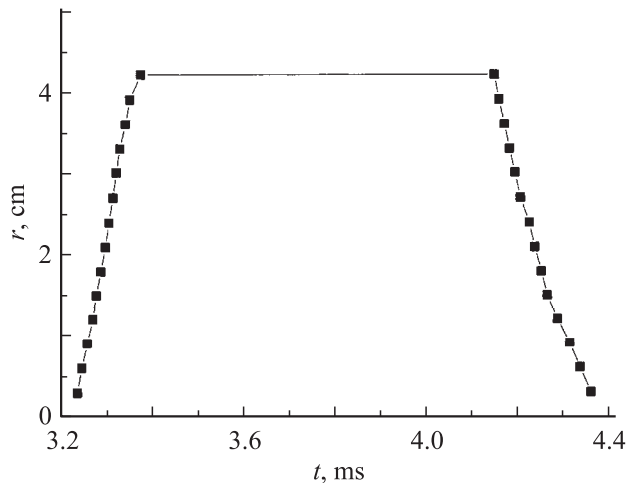


Рис. 5. Радиальное распределение плотности плазмы.

чение циклотронной частоты пропорционально увеличению магнитного поля. Состав ионов зондируемого плазменного слоя изменяется во времени. Так, в этом слое (см. рис. 4, а и 5) присутствуют ионы Ti^+ , O_2^+ , N_2^+ , O^+ , C^+ (циклотронная частота выше 260 kHz не регистрировалась), в следующий интервал (см. рис. 4, б) добавляются ионы N^+ , OH^+ . Присутствие титана на стадии роста радиуса слоя говорит о том, что он вводится в разряд на начальной стадии создания плазмы. Отсутствие ионов железа в слое связано с его ионизацией в периферийных слоях. Поскольку железо вносится в разряд перпендикулярно относительно плазменного столба, то глубина проникновения в плазму будет определяться временем τ ионизации нейтрала в плазме. Время ионизации определяется выражением $\tau = 1/N_e \langle v_e \sigma_e \rangle$, где N_e — плотность электронов, cm^{-3} ; $\langle v_e \sigma_e \rangle$ — скорость ионизации электронным ударом, cm^3/s . При температуре электронов $T_e \sim 20-40$ eV и плотности $N_e = 10^{12}-10^{13} cm^{-3}$ время ионизации железа $\tau \sim 6 \cdot 10^{-6}-10^{-7}$ s. Если радиус плазмы разряда равен радиусу катодов (т.е. 5 см), скорость нейтрального атома порядка тепловой с учетом времени ионизации атома железа, получим, что расстояние, пройденное атомом до его ионизации, составит 0.3–0.03 см.

В дальнейшем ионы с массой $m > 28$ под действием центробежной силы (электрических полей) уходят из слоя. Исключением является ион Fe^+ , который попадает в слой за счет перезарядки в периферийных областях и движется в виде нейтрального атома радиально внутрь плазмы, где ионизируется. Сечение резонансной перезарядки в диапазоне значений энергии ионов 0.1–10 eV составляет $2.23-1.3 \cdot 10^{-14} cm^2$, что на два порядка превышает сечение ионизации для железа.

Полученные результаты связываются с развитием электростатической ионно-циклотронной неустойчивости [7] и, как следствие, с развитием электростатических ионных циклотронных волн. Таким образом, появление

резонансных пиков (см. рис. 4), соответствующих ионно-циклотронным частотам различных ионов, фиксируемых в разряде другими средствами, может объясняться развитием именно этой неустойчивости.

Выводы

1. Элементный состав плазмы, определенный методом оптической спектроскопии, коррелирует с результатами исследования спектра флуктуаций уровня отраженного от плазмы разряда СВЧ-сигнала по определению ее ионного состава.

2. В плазменном столбе и, соответственно, в зондируемом плазменном слое происходит перенос ионно-атомной массы из периферийных областей во внутренние и наоборот, о чем свидетельствует изменение его состава в различные моменты времени (см. рис. 4). Перемещение частиц может осуществляться за счет механизмов центробежного дрейфа и перезарядки.

Список литературы

- [1] Власов В.В., Залобовский И.И., Киричкин Ю.А., Кривонос М.Г., Крячко Ю.П., Рожков А.М., Сосипатров М.В., Степанов К.Н., Фареник В.И. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 27. № 5. С. 264.
- [2] Довбня А.Н., Друй О.С., Егоров А.М., Ильичева В.О., Лапшин В.И., Сосипатров М.В., Швец О.М., Юферов В.Б., Винников Д.В., Ковтун Ю.В., Моисеенко А.В., Шевченко Е.А. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2004. № 4. С. 51.
- [3] Ковтун Ю.В., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. // Вісник Харківського Національного Університету ім. В.Н. Каразіна. № 794. Сер. фізична: „Ядра, частинки, поля“. 2008. № 1/37. С. 115.
- [4] Скибенко А.И., Ларин Ю.В., Прокопенко А.В., Незовибатько Ю.Н., Ковтун Ю.В., Скибенко Е.И., Юферов В.Б. // Вестн. НТУ ХПИ. Техника и электрофизика высоких напряжений. 2007. № 34. С. 104.
- [5] Скибенко А.И., Скибенко Е.И., Ковтун Ю.В., Ларин Ю.В. // Мат. VI Рос. семинара „Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды“. М.: МИФИ, 2008. 148 с.
- [6] Скибенко А.И., Скибенко Е.И., Ковтун Ю.В., Ларин Ю.В. // Вестн. НТУ ХПИ. Техника и электрофизика высоких напряжений. 2008. № 44. С. 147.
- [7] Ломинадзе Д.Г. Циклотронные волны в плазме. Тбилиси: Мецниереба, 1975. 223 с.