

04

Влияние пылевых частиц на интенсивности спектральных линий плазмы

© А.С. Костенко, В.Н. Очкин, С.Н. Цхай

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва

E-mail: tskhai@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 6 ноября 2015 г.

Измерены спектры излучения плазмы тлеющего разряда в газовой смеси Ar–Ne. При добавлении в плазму частиц Al_2O_3 наблюдается заметное изменение относительных интенсивностей спектральных линий.

Свойства плазмы самостоятельного газового разряда во многом определяются ее самосогласованными внутренними электрическими полями [1]. Задача их описания сильно усложняется, если исходный плазмообразующий газ содержит макроскопические частицы (пылевая плазма [2]), заряжающиеся при протекании тока. До настоящего времени используются преимущественно подходы, связанные с расчетами экранировки зарядов частиц [3,4], что связано с трудностями эксперимента. Они связаны в том числе с тем, что при типичных плотностях частиц $\approx (10^3 - 10^4) \text{ cm}^{-3}$ и размерах экранировки $\leq 10^{-2} \text{ cm}$ суммарная доля возмущенных областей мала ($\leq 1\%$) по сравнению с невозмущенной областью пространства плазмы.

Основной экспериментальный метод электрических зондов, хорошо отработанный для „чистой“ плазмы [5], испытывает в этом случае затруднения. Они связаны, с одной стороны, с возмущениями полей зондом, локальность которых сопоставима с расстоянием между пылевыми частицами, и, с другой стороны, с возмущающим влиянием частиц на зондовые характеристики (ВАХ) [6]. Оптические методы применялись либо для визуализации пылевых структур по рассеянию света, либо, с использованием лазеров, для оказания светового давления, возмущающего самоорганизующиеся пространственные структуры макрочастиц [7].

Практически не применялись методы спектроскопии. Исключение может составить работа [8], где теоретически анализировались особен-

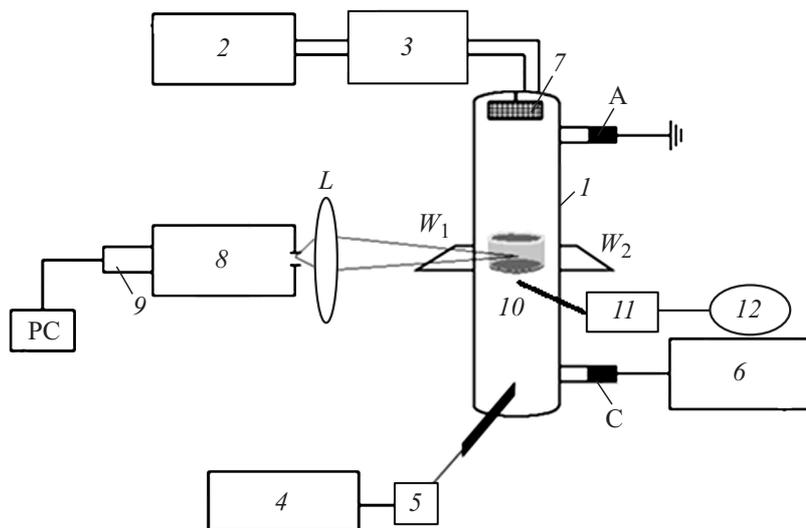


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — разрядная трубка, 2 — вакуумная станция, 3 — система контроля давления потока, 4 — резервуар, 5 — игольчатый накататель, 6 — источник тока, А и С — анод и катод, 7 — контейнер пылевых частиц, W_1 и W_2 — кварцевые окна, L — линза, 8 — монохроматор, 9 — линейка с системой MORS1, 10 — ввод зонда, 11 — блок управления зондом, 12 — осциллограф, PC — компьютер.

ности уширения линий водорода в пылевой плазме. Было показано, что сильно заряженные макрочастицы дают гигантское штарковское уширение по сравнению с обычным хольцмарковским. Однако именно из-за малости концентрации пылевых частиц по сравнению с концентрацией электронов и наличия доплеровского уширения эффекты, связанные именно с пылевыми частицами, проявляются лишь в далеких крыльях спектрального контура, где интенсивность $\leq 1\%$ от интенсивности в максимуме. Эти особенности весьма сложно исследовать экспериментально, тем более использовать в диагностике.

В настоящей работе мы экспериментально исследуем влияние пылевых частиц на эмиссионный линейчатый спектр плазмы. Предпосылкой служит то, что изменение структуры электрического поля частицами приводит к изменению вида функции распределения электронов по

энергиям. Как следствие, меняются скорости возбуждения электронами излучающих состояний атомов, причем по-разному для состояний с различной энергией в спектре. Эффект возникает вблизи частиц и тем заметнее, чем больше разница в энергиях возбуждения. Это вполне очевидно, вопрос в том, насколько он заметен для реальных условий, в которых интегральный объем возмущенных областей мал и имеет ли перспективу для диагностики?

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Разряд зажигался в вертикальной кварцевой разрядной трубке 1 внутренним диаметром 30 мм. Трубка оборудована оптическими окнами W_1 и W_2 для регистрации собственного свечения плазмы и ее просвечивания. Для откачки использовалась вакуумная станция TDS-22 (Balzers Pfeiffer) 2. Для контроля давления и потока наполняемого газа служила система 3, включающая элементы Balzers Pfeiffer: запорный клапан 016S, сенсоры давления TPR250 (10^3-10^{-3} Torr), IKR251 ($10^{-3}-10^{-9}$ Torr) и вакуумный контроллер TPG252A. Газ вводился в нижнюю часть трубки из резервуара 4 через игольчатый натекатель SS-1RS4 (Swagelok) 5. Ток поддерживался источником 6 (ИЛГН704). Для введения пылевых частиц в разряд использовался контейнер 7 со стороны заземленного анода А. Высокое напряжение поддерживалось на катоде С.

Диагностический блок установки включал оптическую и электрическую схемы.

Свечение плазмы через боковое окно W_1 собиралось линзой L на входную щель дифракционного монохроматора 8 (MS 2004) с решеткой 1200 line/mm и обратной линейной дисперсией 4.146 nm/mm. Регистрация велась линейкой CCD с зарядовой связью 9, сопряженной с системой обработки сигналов MORS1. Получаемые спектры обрабатывались компьютером PC. Визуализация частиц велась по рассеянию излучения 430 nm диодного лазера. Фото- и видео изображения частиц регистрировались с помощью цифрового микроскопа.

Трубка была также оборудована вакуумным вводом 10 для электрического зонда. Подача напряжения на зонд и регистрация ВАХ велись блоком 11 с выводом сигнала на цифровой осциллограф 12 с последующей обработкой на компьютере.

В качестве образующего плазму газа использовалась смесь аргона с гелием в равных пропорциях. Выбор этой комбинации связан с тем, что для инертных газов потенциалы возбуждения линий в видимой области спектра, с одной стороны, достаточно высоки и условия возбуждения довольно чувствительны к изменениям функции распределения

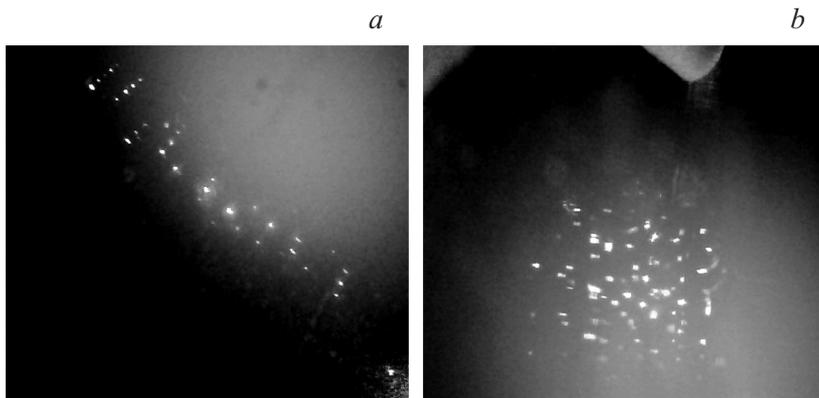


Рис. 2. Структура пылевых частиц Al_2O_3 в разряде постоянного тока: *a* — на границе страты, *b* — в объеме страты.

электронов по энергиям, а, с другой — заметно отличаются друг от друга. Нами использовались линии аргона $\lambda_1 = 518.7 \text{ nm}$ с порогом энергии возбуждения $E_1 = 15.3 \text{ eV}$ и гелия $\lambda_2 = 587.6 \text{ nm}$ с порогом $E_2 = 23.07 \text{ eV}$.

Измерения проводилась при давлениях $0.5\text{--}0.7 \text{ Torr}$ и токах $1\text{--}2 \text{ mA}$. При этом разряд стратифицирован. Такая форма позволяет наблюдать захваченные в плазме пылевые частицы как в упорядоченной (голова страты, рис. 2, *a*), так и в неупорядоченной (тело страты, рис. 2, *b*) формах. Такое поведение уже ранее неоднократно отмечалось [2,6]. В качестве пылевых частиц использовались полидисперсные частицы Al_2O_3 с поперечным размером $a = (6 \pm 4) \mu\text{m}$.

Радиационные времена жизни верхних уровней переходов, излучающих рассматриваемые линии аргона и гелия, $\tau_r \sim (10^7\text{--}10^8) \text{ s}$, поэтому в условиях эксперимента при низком давлении тушение состояний при столкновениях несущественно и скорости возбуждения пропорциональны (с точностью до спектральной чувствительности фотоприемника) интенсивностям линий в спектре. Примеры записи спектров разрядов как в отсутствие пыли, так и в ее присутствии приведены на рис. 3. Значения интенсивностей линий, усредненные по 5 записям спектров, приведены в таблице при давлении газовой смеси Ar-He (1:1) 0.68 Torr , ток разряда 2 mA . Здесь I_0 и I — интенсивности линий в отсутствие и при наличии пылевых частиц соответственно.

Интенсивности спектральных линий и их отношения

Газ	λ , nm	В отсутствие частиц		При наличии частиц	
		$I_0^{\text{Ar,He}}$, а.е.	$I_0^{\text{Ar}}/I_0^{\text{He}}$	$I^{\text{Ar,He}}$, а.е.	$I^{\text{Ar}}/I^{\text{He}}$
Ar	518.7	890 ± 70	2.3 ± 0.1	1140 ± 90	1.7 ± 0.1
He	587.6	390 ± 30		670 ± 50	

Видно, что интенсивности линий меняются при внесении в плазму пылевых частиц. Отношение интенсивностей линий аргона и гелия при добавлении частиц в данных условиях изменяется в пользу гелия на величину $(I_0^{\text{Ar}}/I_0^{\text{He}} - I^{\text{Ar}}/I^{\text{He}})(I_0^{\text{Ar}}/I_0^{\text{He}})^{-1} = (26 \pm 8)\%$. Это хорошо измеряемая величина и может быть использована для спектральной диагностики пылевой плазмы, в частности для определения изменений усредненной по пространству величины средней энергии электронов. Исходя из приведенных данных, можно говорить, что внесение частиц увеличивает среднюю энергию, поскольку потенциал возбуждения линии гелия превышает таковой для аргона.

Об увеличении средней энергии электронов можно также судить по росту интенсивности линий в спектрах излучения при внесении в разряд пылевых частиц. Такое увеличение интенсивностей линий Ar в спектре излучения наблюдалось в ряде работ по мере роста размеров пылевых частиц углеводородов [9]. Объяснение роста интенсивности связывалось с ростом средней энергии электронов и, таким образом, более эффективным возбуждением высоколежащих излучающих состояний. Однако при низких плотностях электронов их концентрация может заметно изменяться в присутствии пылевых частиц. Действительно, если $n_e \sim 10^8 - 10^9 \text{ cm}^{-3}$, плотность частиц $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$, плотность зарядов на частицах $\sim 10^4$ при сохранении квазинейтральности плазмы, плотность свободных электронов может быть заметно меньше по сравнению с плазмой без пылевых частиц. В этом случае интенсивность спектральных линий в присутствии частиц может не меняться или уменьшаться. В то же время на отношение интенсивностей, рассматриваемое в данной работе, общая плотность электронов не влияет.

Обсудим в этой связи возможный вклад в соотношение интенсивностей процесса рассеяния света частицами, сечение которого зависит от длины волны. Как следует из общей теории рассеяния

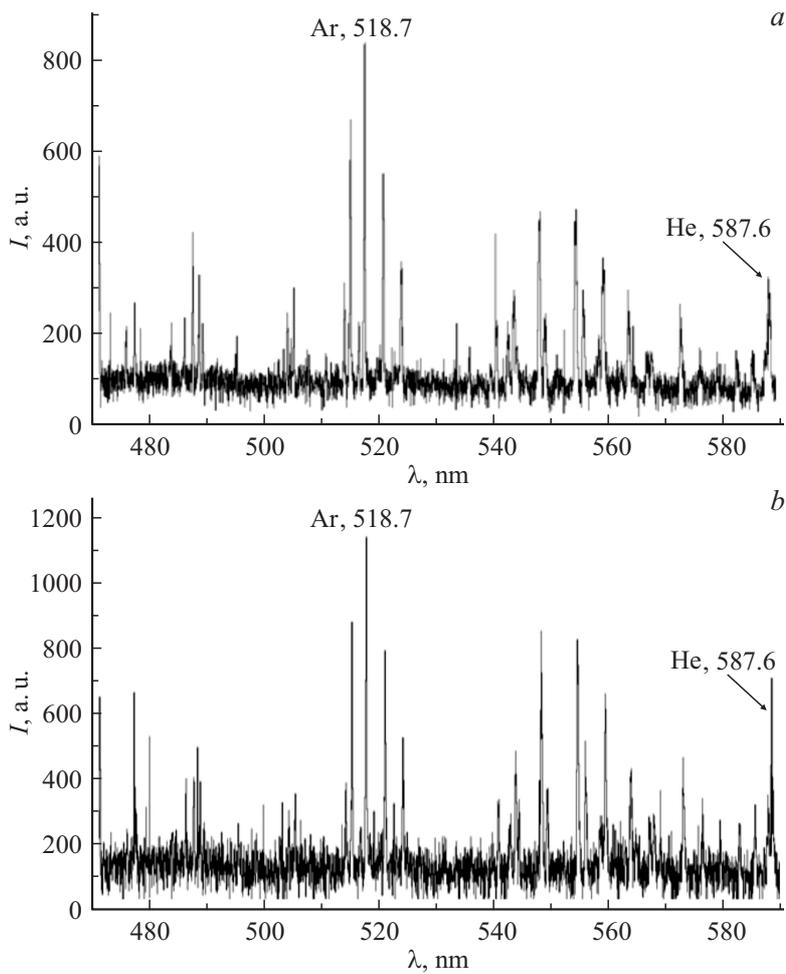


Рис. 3. Спектр излучения разряда в смеси Ar–He (1 : 1) при давлении 0.68 Торг, ток 2 мА: *a* — без пыли, *b* — с пылью.

света макроскопическими частицами [10], сечения рассеяния достигают максимальных величин $(4-6)\pi a^2$, где a — поперечный размер, при длинах волн $\lambda = 2a\sqrt{\epsilon}/m$ (резонансы Ми). Здесь a — поперечный

размер частицы, ε — диэлектрическая постоянная материала частицы, m — целое число. Для частиц сапфира используемого размера и $\varepsilon \sim 10$ резонансы Ми могут проявляться в средней и дальней ИК-области, т.е. вдали от исследуемого нами диапазона. В отсутствие резонансов сечение можно приближенно оценивать геометрически $\sigma \sim \pi a^2/4$. При плотности частиц в наших условиях $\sim (10^3 - 10^4) \text{ см}^{-3}$ экстинкция света в видимой области на 1 см пути составит $k = \sigma N \approx 10^{-3} - 10^{-4}$. Таким образом, изменения интенсивности, связанные с разностью в сечениях рассеяния ($\sigma \sim \lambda^{-4}$), пренебрежимо малы по сравнению с наблюдаемыми.

В работе впервые выявлен эффект изменения относительных интенсивностей спектральных линий в пылевой плазме самостоятельного разряда, связанный с изменением электрического поля плазмы при добавлении частиц. Эффект имеет заметную величину и может быть применен для диагностики состояния пылевой плазмы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-02-00784.

Список литературы

- [1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, Физматлит, 1992. 536 с.
- [2] Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
- [3] Цытович В.Н. // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 81. В. 9. С. 563–567.
- [4] Филиппов А.В., Дятко Н.А., Костенко А.С. // ЖЭТФ. 2014. Т. 146. № 5. С. 1122–1134.
- [5] Демидов В.И., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996. 240 с.
- [6] Липаев А.М., Молотков В.И., Нефедов А.П. и др. // ЖЭТФ. 1997. Т. 112. С. 2030–2044.
- [7] Schablinski J, Block D, Piel A, Melzer A, Thomsen H. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. P. 013 705.
- [8] Леонов А.Г., Паль А.Ф., Сивохин Д.В., Старостин А.Н., Филиппов А.В. // Материалы IV Российского семинара „Современные средства диагностики и их применение для контроля веществ и окружающей среды“. Москва, МИФИ, 12–14 ноября 2003 г. С. 123–125.
- [9] Layden D, Cheung V, Samarian A.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 39. P. 2762–2763.
- [10] Кросиньяни Б., Ди Порто П., Бертолотти М. Статистические свойства рассеянного света. М.: Наука, 1980. 206 с.