

**АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ ПИКАЛЕВ**

аспирант, инженер кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*pikalev@dims.karelia.ru*

**ЛИДИЯ АНДРЕЕВНА ЛУИЗОВА**

кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*alim@karelia.ru*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР НА КОНТУР СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ НЕОНА\*

Упорядоченные плазменно-пылевые структуры образуются из заряженных макрочастиц, левитирующих в плазме, и влияют на некоторые ее параметры. Это влияние может быть обнаружено по изменению спектральных характеристик плазмы при инъекции пылевых частиц. В частности, изменение атомной температуры ведет к изменению контуров спектральных линий. В работе исследовался контур спектральной линии неона 585 нм в пылевой плазме положительного столба тлеющего разряда при давлениях 50–150 Па и токах 1–9 мА. Контур регистрировался с помощью интерферометра Фабри – Перо, сканирование осуществлялось путем изменения давления воздуха между зеркалами интерферометра. Предложен алгоритм обработки интерферограмм с учетом шумов и непостоянства скорости сканирования. Найдено ограничение сверху на влияние пылевой структуры на ширину контура спектральной линии в исследованных условиях. Внесение пыли меняет атомную температуру плазмы менее чем на 10 К.

Ключевые слова: контур спектральной линии, пылевая плазма, плазменно-пылевые структуры, интерферометр Фабри – Перо

### ВВЕДЕНИЕ

Пылевой плазмой, комплексной плазмой или плазмой с конденсированной дисперсной фазой называют плазму с левитирующими макрочастицами. Пылевая плазма широко распространена в природе и технике. Особый интерес представляют упорядоченные плазменно-пылевые структуры, возникающие из-за сильного взаимодействия между заряженными пылевыми частицами [5].

Макрочастицы значительно влияют на свойства плазмы. На них происходит рекомбинация электронов и ионов, а иногда они могут служить источником электронов за счет термо-, фото- или вторичной электронной эмиссии. Имея заряд, частицы создают вокруг себя электрическое поле, изменяя распределение концентрации электронов и ионов. Влияние пыли на плазму уже неоднократно исследовалось спектроскопическими методами (см., например, [1], [8]), однако влияние макрочастиц на контур спектральной линии исследовано слабо.

В работе [3] проводится моделирование влияния электрического поля, возникающего из-за заряженных макрочастиц на контур линии  $H_{\alpha}$ . Показано, что Штарковское уширение существенно и позволяет определять заряд частиц по контуру спектральной линии. В работе [9]

исследовалось влияние пыли на контур линии  $H_{\alpha}$  в смеси аргона и ацетилена. Оказалось, что в отсутствие пыли в плазме присутствуют «горячие» атомы водорода с энергиями в десятки эВ, вызывающие уширение основания контура спектральной линии. При появлении пыли «горячие» атомы водорода исчезают.

Одним из механизмов влияния пылевых частиц на контур может служить изменение температуры газа, которое ведет к изменению доплеровского контура линии. На пылинках гибнут заряженные частицы, что требует увеличения электрического поля для поддержания заданного тока [2], а значит, и большего энерговыделения. При этом поверхность частиц нагревается на десятки градусов из-за бомбардировки электронами и ионами [7], нагревая газ непосредственно в середине трубки, где свечение максимально.

Нами исследовался контур спектральной линии неона 585 нм в положительном столбе тлеющего разряда. Найдено ограничение сверху влияния пылевой структуры на ширину контура спектральной линии в исследованных условиях. Поскольку пылевые структуры образуются при низких токах и сильно сказывались шумы регистрирующей системы, был разработан алгоритм обработки интерферограмм, снижающий влияние шумов.

## УСТАНОВКА

Пылевая структура формируется в газоразрядной трубке диаметром 3 см. В трубку введена сужающая вставка. Структура зависит от нижней границы светящейся области первой страты над вставкой. Для формирования структуры в разряд инжектировались частицы цинка размером 1–10 мкм. Длина пылевой структуры составляла 7–10 мм, диаметр – 3–5 мм.

Сканирование контуров производилось путем напуска воздуха в откачанную барокамеру с интерферометром Фабри – Перо толщиной 14 мм. Интерференционные кольца фокусировались линзой с фокусным расстоянием 10 см на входной щели спектрометра ИСП 51 с фотоэлектрической приставкой, который выделял линию 585 нм. Благодаря линзе между разрядной трубкой и интерферометром на входной щели спектрометра фокусировалось уменьшенное в 1,5 раза изображение разряда. Центр колец приходился на ту часть изображения разряда, в которой зависала пыль. На входной щели спектрометра стояла диафрагма, выделявшая центральную часть интерференционной картины. Ширина входной и выходной щелей спектрометра, а также диафрагмы составляла 0,15 мм, таким образом, регистрировалось излучение из области разряда 225 × 225 мкм. Регистрация излучения происходила на ФЭУ 106, сигнал с которого оцифровывался.

Перед экспериментом трубка откачивалась до  $10^{-3}$  Па, тренировалась разрядом в течение часа и снова откачивалась. Затем в трубку напускался неон и зажигался разряд, который горел 30–90 минут до регистрации контуров. Как показала регистрация спектров, за это время из спектра исчезали молекулярные полосы примесей. Затем регистрировались интерферограммы при наличии пылевой структуры и при ее отсутствии. Для компенсации влияния возможного изменения условий разряда порядок регистрации менялся: если в один день сначала регистрировался контур с пылью, а затем без пыли, то в другой – наоборот.

Сигнал с ФЭУ оцифровывался со скоростью  $2 \cdot 10^4$  отсчетов в секунду. Каждая экспериментальная точка получалась усреднением отсчетов за 600 мс. Регистрация одной интерферограммы занимала 1000 секунд. За это время регистрировалось 6–7 интерференционных максимумов.

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Перед и после регистрации интерферограммы замерялся темновой сигнал. Затем он вычитался из данных, при этом считалось, что он изменялся со временем линейно. Затем интерферограмма разбивалась на отдельные контуры.

Для дальнейшей обработки необходимо определить положение максимума каждого контура. Просто взять максимальное значение нельзя из-за шумов. Для определения максимума брались

верхние 15% контура и аппроксимировались параболой. За максимум принималась вершина параболы.

Далее преобразовывались абсциссы. За время между соседними максимумами сканируется спектральный интервал, равный постоянной интерферометра  $\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2d} \approx 12,2$  пм, где  $\lambda_0 = 585,2$  нм – середина спектральной линии,  $d = 14$  мм – толщина интерферометра. Сложность в том, что скорость сканирования менялась со временем. Поскольку скорость сканирования менялась медленно, считаем, что за время сканирования двух постоянных интерферометра она меняется линейно. Пусть  $t$  – абсциссы точек интерферограммы в единицах времени. Для каждого контура интерферограммы, кроме крайних, перейдем к новым координатам  $x$  по правилу:

$$x = c_0 + c_1 t + c_2 t^2,$$

где коэффициенты  $c$  определяются из условия, что координата  $x$  для максимума данного контура равна нулю, а для максимумов соседних –  $-1$  и  $+1$  соответственно. Таким образом,  $x$  – координата в долях постоянной интерферометра. Так как для обработки необходимы соседние контуры, крайние контуры интерферограммы не обрабатывались.

Далее проводилась нормировка по оси ординат. Так как ординаты максимумов в одной интерферограмме могли различаться до 10 %, при нормировке учитывался не только максимум данного контура, но и соседние. При этом каждое значение сигнала делилось на  $y_{\text{norm}}$ , полученное по формуле:

$$y_{\text{norm}} = k_0 + k_1 t_i + k_2 t_i^2,$$

где коэффициенты  $k$  определяются из условия равенства единице максимумов данного и соседних контуров после нормировки.

Далее обработка шла двумя путями:

1. Определение ширины контура. Для определения ширины контура отдельно определялась ширина для левой и правой частей контура. По точкам с ординатами после нормировки от 0,43 до 0,57 методом наименьших квадратов проводилась прямая. Для определения ширины использовалась абсцисса точки этой прямой с ординатой 0,5.

2. Усреднение контуров одной интерферограммы для сравнения формы контуров. Каждый контур (кроме крайних) разбиваем точками с шагом 0,01 от постоянной интерферометра. Значение в каждой точке получается путем аппроксимации экспериментальных данных между соседними точками прямой. Затем значения для всех контуров (кроме крайних) данной интерферограммы усредняются.

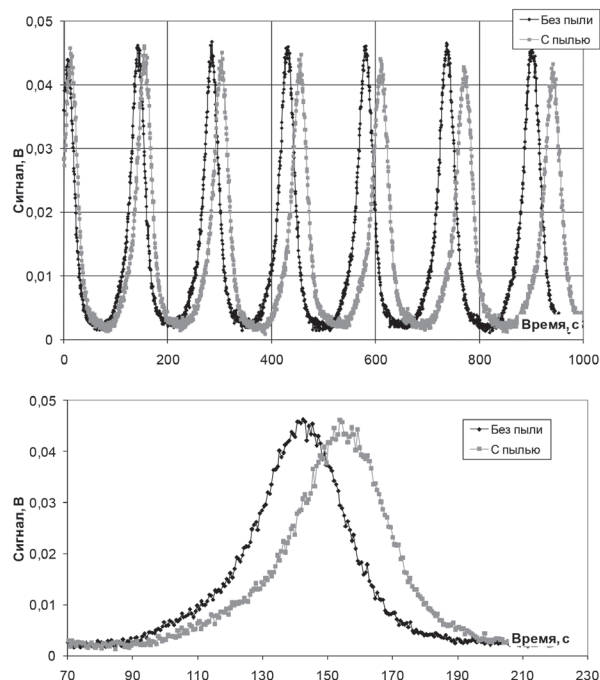


Рис. 1. Необработанные интерферограммы.  
 $p = 50$  Па,  $I = 6$  мА. Сверху – интерферограммы целиком,  
 снизу – один из пиков

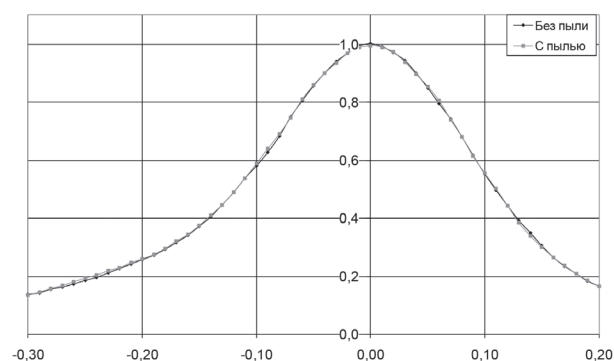


Рис. 2. Усредненные контуры, полученные из интерферограмм, показанных на рис. 1.  $p = 50$  Па,  $I = 6$  мА.  
 Абсциссы в долях постоянной интерферометра

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Примеры необработанных интерферограмм приведены на рис. 1. Полученные из этих интерферограмм усредненные контуры показаны на рис. 2. Отличие исходных интерферограмм обусловлено разницей скорости сканирования и несовпадением моментов начала сканирования. Изменений формы контура при внесении пыли не обнаружено. Полученные контуры несимметричны вследствие изотопической структуры [6].

Для проверки влияния пыли на ширину контуров вычислялись разности ширин контуров без пыли и с пылью. Далее проверялась гипотеза о равенстве этой разности нулю. Полученные данные приведены в таблице.

Разности между ширинами контуров без пыли и при наличии пылевой структуры

Условия	Количество пар контуров	Средняя разность ширин, пм	Доверительный интервал для вероятности 90 %, пм
50 Па 1 мА	19	–0,019	0,032
50 Па 3 мА	16	–0,012	0,038
50 Па 6 мА	21	0,003	0,019
50 Па 9 мА	18	0,013	0,018
60 Па 3 мА	10	–0,031	0,044
100 Па 1 мА	18	–0,012	0,033
100 Па 3 мА	37	0,007	0,031
100 Па 6 мА	18	–0,010	0,026
150 Па 3 мА	19	–0,008	0,042

Как видно из таблицы, нулевая разность попадает в доверительный интервал для всех исследованных условий.

Величина доверительного интервала является оценкой сверху влияния пылевой структуры на ширину контура спектральной линии при данных условиях. Для сравнения было проведено моделирование контура в программе [8], показавшее, что изменение температуры газа на 10 К приводит к изменению ширины регистрируемого контура на 0,029 пм. При моделировании контур считался чисто доплеровским, а аппаратная функция установки – аппаратной функцией идеального интерферометра Фабри – Перо с коэффициентом отражения зеркал 0,8.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами исследовалось влияние пылевой структуры на контур спектральной линии неона 585 нм в положительном столбе тлеющего разряда при давлениях 50–150 Па и токах 1–9 мА. Предложен алгоритм обработки интерферограмм, устойчивый к шумам и учитывающий непостоянство скорости сканирования. Данный алгоритм может быть использован как в дальнейших исследованиях влияния пылевых структур на контур спектральной линии, так и в других исследованиях при необходимости обработать зашумленные интерферограммы. Влияния пылевых структур на контур спектральной линии выявлено не было. Найдены ограничения сверху на изменение ширины контура, вызванного пылевой структурой в исследованных условиях.

\* Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ № 14.B37.21.0755 и проекта «Комплексная плазма: модификация поверхности» Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012–2016 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бульба А. В., Луизова Л. А., Подрядчиков С. Ф., Хахаев А. Д., Щербина А. И. Самоорганизация и рост пылевых структур в тлеющем разряде // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 2. С. 155–160.
2. Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Поляков Д. Н., Фортков В. Е. Кооперативный характер образования пылевых структур в плазме // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. № 3. С. 609–613.
3. Паль А. Ф., Сивохин Д. В., Старостин А. Н., Филиппов А. В. Определение заряда пылевых частиц по штарковскому уширению спектральных линий атомов водорода // Материалы школы-семинара «Методы и техника экспериментального исследования процессов самоорганизации упорядоченных структур в плазменно-пылевых образованиях». Петрозаводск, 2002 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://plasma.karelia.ru/pub/fntp/Sivohin.pdf>
4. Соловьев А. В. Программа «Apparat» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://plasma.karelia.ru/distort/apparat.ru.php>
5. Фортков В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А., Молотков В. И., Петров О. Ф. Пылевая плазма // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–544.
6. Connor T. R., Biondi M. A. Dissociative recombination in neon: spectral line-shapes studies // Phys. Rev. 1965. V. 140. № 3A. P. A778–A791.
7. Khrapak S. A., Morfill G. E. Grain surface temperature in noble gas discharges: Refined analytical model // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 104506–104510.
8. Mitic S., Pustynnik M. Y., Morfill G. E. Spectroscopic evaluation of the effect of the microparticles on radiofrequency argon plasma // New Journal of Physics. 2009. Vol. 11. Issue 8. P. 083020–083036.
9. Stefanovic I., Kovacevic E., Berndt J., Winter J. H $\alpha$  emission in the presence of dust in an Ar-C $_2$ H $_2$  radio-frequency discharge // New Journal of Physics. 2003. Vol. 5. Issue 1. P. 39.1–39.12.

Pikalev A. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

Luizova L. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## STUDY OF DUSTY STRUCTURES INFLUENCE ON SPECTRAL LINE PROFILE OF NEON

Charged macroparticles levitated in plasma can form ordered dusty structures which influence on plasma conditions. Changes in plasma spectral characteristics as dusty particles are injected can detect this influence. For instance, changing atomic temperature leads to changing spectral lines profiles. We study the profile of a 585 nm neon spectral line in the dusty structures. The structures are formed in a glow discharge positive column with 50–150 Pa pressure and 1–9 mA current. The profile is scanned with a Fabry – Perot interferometer by changing air pressure between interferometer mirrors. We present a data processing algorithm that is resistant to noise and scanning speed instability. We have found an upper bound of the dusty structures influence on the profile width. Appearance of macroparticles changes atomic plasma temperature less than by 10 K.

Key words: spectral line profile, dusty plasma, dusty structure, Fabry – Perot interferometer

## REFERENCES

1. Bul'ba A. V., Luizova L. A., Podryadchikov S. F., Khakhaev A. D., Shcherbina A. I. Self-organization and growth of dust structures in a glow discharge [Samooorganizatsiya i rost pylevykh struktur v tleyushchem razryade]. *High Energy Chemistry*. 2006. Vol. 40. № 2. P. 125–130.
2. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. Cooperative formation of dust structures in plasma [Kooperativnyy kharakter obrazovaniya pylevykh struktur v plazme]. *JETP*. 2002. Vol. 94. № 3. P. 521–524.
3. Pal' A. F., Sivokhin D. V., Starostin A. N., Filippov A. V. The determination of dusty particles charge with Stark broadening of hydrogen spectral lines [Opredelenie zaryada pylevykh chastits po shtarkovskomu ushireniyu spektral'nykh liniy atomov vodoroda]. *Materialy shkoly-seminara "Metody i tekhnika eksperimental'nogo issledovaniya protsessov samooorganizatsii uporyadochennykh struktur v plazmenno-pylevykh obrazovaniyakh"* [Proc. of school "Methods and techniques of experimental research into self-organization of plasma dusty structures"]. Petrozavodsk, 2002. Available at: <http://plasma.karelia.ru/pub/fntp/Sivohin.pdf>
4. Solov'ev A. V. Programma "Apparat" [Software "Apparat"]. Available at: <http://plasma.karelia.ru/distort/index.en.php>
5. Fortov V. E., Khrapak A. G., Khrapak S. A., Molotkov V. I., Petrov O. F. Dusty plasmas [Pylevaya plazma]. *UFN*. 2004. Vol. 174. № 5. P. 447.
6. Connor T. R., Biondi M. A. Dissociative recombination in neon: spectral line-shapes studies // Phys. Rev. 1965. V. 140. № 3A. P. A778–A791.
7. Khrapak S. A., Morfill G. E. Grain surface temperature in noble gas discharges: Refined analytical model // Phys. Plasmas. 2006. Vol. 13. P. 104506–104510.
8. Mitic S., Pustynnik M. Y., Morfill G. E. Spectroscopic evaluation of the effect of the microparticles on radiofrequency argon plasma // New Journal of Physics. 2009. Vol. 11. Issue 8. P. 083020–083036.
9. Stefanovic I., Kovacevic E., Berndt J., Winter J. H $\alpha$  emission in the presence of dust in an Ar-C $_2$ H $_2$  radio-frequency discharge // New Journal of Physics. 2003. Vol. 5. Issue 1. P. 39.1–39.12.

Поступила в редакцию 04.07.2013