

УДК 533.9.08

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСИММЕТРИЧНОГО САМООБРАЩЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ АЛЮМИНИЯ И МЕДИ

*Г.Г. Ильин, В.В. Дюков, Е.В. Сарандаев, М.Х. Салахов*

### Аннотация

Экспериментально и теоретически исследованы асимметричные самообращенные резонансные спектральные линии нейтральных атомов алюминия и меди при высоких значениях электронной концентрации плазмы, получаемые в условиях импульсного капиллярного разряда в воздухе. Зарегистрированная асимметрия линий алюминия Al I 394.4 и 396.1 нм хорошо согласуется с литературными значениями параметров штарковского уширения. Данные линии могут быть рекомендованы для определения электронной концентрации плазмы. Для линий атомов меди Cu I 324.7 и 327.4 нм по их параметрам асимметричного самообращения впервые оценены параметры штарковского уширения.

**Ключевые слова:** плазма, спектральная линия, штарковское уширение, асимметричное самообращение, электронная концентрация.

В обзорных работах [1, 2] нами с использованием теоретических и экспериментальных данных были рассмотрены различные возможности применения асимметричных самообращенных спектральных линий для определения параметров, в первую очередь электронной концентрации и структуры неоднородной плотной плазмы типа плазм импульсных разрядов и плазм, возникающих при воздействии лазерного излучения на твердые мишени. В таких плазмах, характеризующихся высокими значениями температуры и электронной концентрации, преобладающим является штарковское уширение электронами и ионами спектральных линий [3], обычно испытывающих квадратичный эффект Штарка. В [1, 2] теоретические данные были получены на основе модельных расчетов профилей самообращенных линий, в которых штарковское уширение задавалось строго только в далеких крыльях профилей. С целью уточнения возможностей диагностики плазмы по асимметричным самообращенным линиям нами, с одной стороны, была разработана более строгая схема модельного расчета профилей самообращенных линий при аналитическом задании сложного асимметричного профиля уширения в целом [4], что позволило существенно уточнить и выявить новые возможности диагностики плазмы по асимметричным самообращенным линиям [5–7]. С другой стороны, нами были проведены также новые более полные эксперименты, в которых наряду с исследованными резонансными самообращенными линиями нейтральных атомов алюминия Al I 394.4 и 396.1 нм и нейтральных атомов меди Cu I 324.7 и 327.4 нм одновременно регистрировалась также линия атомов водорода  $H_{\alpha}$ , по ширине которой определялась концентрация электронов  $n_e$  согласно [3]. Частично результаты исследований резонансных спектральных линий нейтральных атомов алюминия (Al I) и меди (Cu I) приведены в [8–11]. В данной работе приводятся результаты

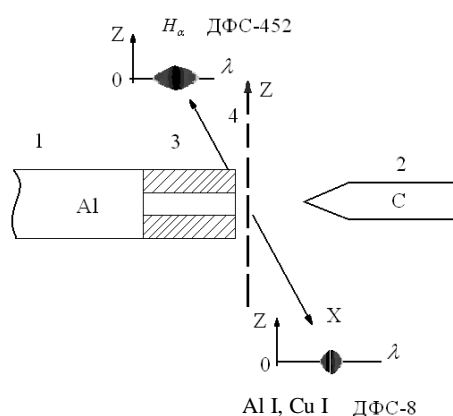


Рис. 1. Импульсный капиллярный источник света и схема регистрации спектров: 1 и 2 – алюминиевый и угольный электроды для случая регистрации самообращенных резонансных линий атомов алюминия (Al I), медный и угольный электроды для случая регистрации самообращенных резонансных линий атомов меди (Cu I); 3 – капилляр; 4 – исследуемое поперечное сечение плазмы. Излучение регистрируется одновременно на двух спектрографах ДФС-8 и ДФС-452 вдоль разных лучей зрения  $X$ , положение которых задается координатой  $z$  оси  $Z$

совместного анализа полученных нами расчетных и экспериментальных данных для линий атомов алюминия и меди, а также линии атомов водорода  $H_{\alpha}$ , что позволяет лучше понять возможности практического использования асимметрии самообращенных линий для определения как электронной концентрации плазмы на примере линий Al I 394.4 и 396.1 нм, так и параметров штарковского уширения линий Cu I 324.7 и 327.4 нм, для которых они еще надежно не определены.

Спектры регистрировались фотографически на установке, описанной в [12]. Схема наблюдения спектров одновременно на двух дифракционных спектрографах ДФС-8 и ДФС-452 показана на рис. 1. Источником излучения являлась плазма импульсного разряда между горизонтально расположенными металлическим электродом 1 (алюминиевым или медным) и острозаточенным угольным электродом 2 через текстолитовый капилляр 3 длиной 12 мм и внутренним диаметром 4 мм. При фотографировании спектров в направлении и против оси  $X$  на щель спектрографов проецировался участок плазмы, лежащий в плоскости сечения плазмы 4 и находящийся на расстоянии 0.5 мм от среза капилляра. Положение луча  $X$  в вертикальном направлении задается координатой  $z$  оси  $Z$ . В состав разрядного контура импульсного источника входит батарея высоковольтных конденсаторов общей емкостью 1800 мкФ и катушка с индуктивностью 500 мкГн. Импульс тока длительностью 6 мс имеет максимум через 1.5 мс после начала разряда. В экспериментах происходил разряд батареи конденсаторов в воздушной атмосфере между электродами 1 и 2 при начальном напряжении  $U_0 = 0.8-1.5$  кВ. Из капилляра в исследуемый участок плазмы 4 в ходе разряда поступали атомы алюминия или меди с электрода 1 и пары вещества стенок капилляра, содержащие атомы водорода.

На ДФС-452 (обратная линейная дисперсия  $\ell = 0.764$  нм/мм) регистрировалась линия атомов водорода  $H_{\alpha}$  с длиной волны  $\lambda = 656.3$  нм. На ДФС-8 ( $\ell = 0.3$  нм/мм) фотографировались резонансные линии атомов алюминия Al I 394.4 и 396.1 нм или резонансные линии атомов меди Cu I 324.7 и 327.4 нм. Фотографирование спектров в точке максимума тока импульсного разряда с временным разрешением 0.15 мс производилось на высокочувствительные фотопленки.

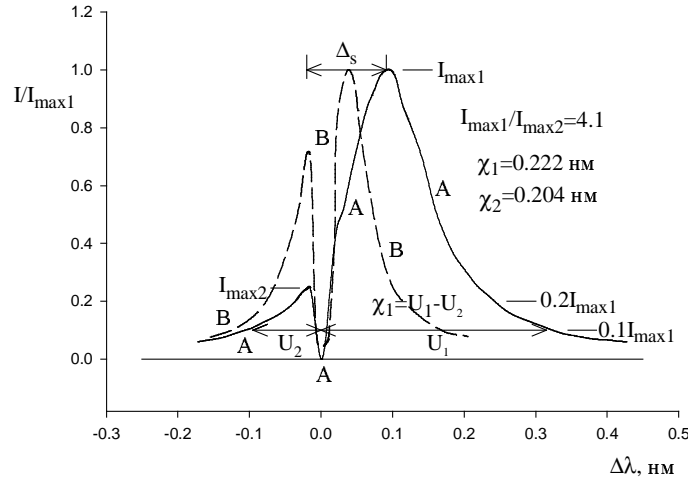


Рис. 2. Экспериментальные профили самообращенной линии Al I 396.1 нм (сплошной профиль A) при  $U_0 = 0.8$  кВ и самообращенной линии Cu I 327.4 нм (штриховой профиль B) при  $U_0 = 1.5$  кВ для одного из центральных лучей зрения в поперечном сечении плазмы 4 на рис. 1. По оси ординат отложена интенсивность  $I$  в относительных единицах, по оси абсцисс – разность длин волн  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ , где длина волны  $\lambda_0$  соответствует минимуму интенсивности в области самообращения в центре профилей. Обозначения и величины параметров соответствуют профилю A:  $\chi_1$  – параметр асимметрии крыльев  $\chi = U_1 - U_2$  при  $I = 0.1I_{\max 1}$ ,  $\chi_2$  – параметр  $\chi$  при  $I = 0.2I_{\max 1}$

На рис. 1 вверху слева схематически изображен вид линии  $H_\alpha$  и внизу справа вид самообращенной линии на полученных фотографиях. Интенсивности линий и профили линий изменяются по высоте, что отражает их зависимость от координаты  $z$  луча зрения вдоль оси  $Z$ .

Линии Al I 394.4 и 396.1 нм исследовались при  $U_0 = 0.8$  кВ с осевым значением электронной концентрацией  $n_{eo} = (3.78 \pm 0.05) \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ , определенным по ширине линии  $H_\alpha$ , и  $U_0 = 1.0$  кВ с  $n_{eo} = (5.88 \pm 0.07) \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$ . Линии Cu I 324.7 и 327.4 нм исследовались при  $U_0 = 1.5$  кВ с  $n_{eo} \approx 10^{18}$  см $^{-3}$ . На рис. 2 показаны вид одного из зарегистрированных самообращенных профилей линии Al I 396.1 нм (профиль A) и вид одного из зарегистрированных самообращенных профилей линии Cu I 327.4 нм (профиль B): они имеют два разных пика интенсивности, разделенных провалом интенсивности вследствие самопоглощения излучения. Для всех самообращенных линий строились графики зависимостей максимальной интенсивности  $I_{\max 1}(z)$  ( $z = 0$  соответствует центральному лучу зрения в поперечном сечении плазмы) для оценки радиуса излучающей зоны  $R_0$  (для линий атомов алюминия  $R_0 \approx 0.7$  мм; для линий атомов меди  $R_0 \approx 1.3$  мм), расстояния между максимумами самообращения  $\Delta_s(z)$ , параметра асимметрии пиков интенсивности  $I_{\max 1}/I_{\max 2}(z)$ , параметра асимметрии крыльев  $\chi(z) = U_1 - U_2$  при разных значениях отношения  $I/I_{\max 1}$  (на рис. 2  $\chi_1$  соответствует  $I = 0.1I_{\max 1}$ ,  $\chi_2 - I = 0.2 - I_{\max 1}$ ), а также ширины  $\Delta\lambda_{1/2}(z)$  линии  $H_\alpha$  для оценки радиального изменения электронной концентрации  $n_e(r)$  ( $r$  – радиус плазмы; осевое значение  $n_{eo}$  соответствует точке с  $r = 0$ ). Согласно [1] в первом приближении зависимость  $\chi(z)$  отражает радиальные зависимости электронной полуширины самообращенной линии  $\delta_e(r)$  и электронной концентрации  $n_e(r)$  ( $\delta_e \sim n_e$  [3]). Совместно зависимости  $\Delta\lambda_{1/2}(z)$  и  $\chi(z)$  показывают, что электронная концентрация  $n_e$  мало меняется в пределах излучающей зоны ( $0 \leq r \leq R_0$ ) и резко уменьшается (на порядок и бо-

лее) в низкотемпературной зоне плазмы (в основном поглощающей) при  $r \geq R_0$ , где нейтральные атомы алюминия и меди, находящиеся там в основном на нижнем энергетическом уровне  $j$  спектральных линий, поглощают излучение в центре спектральных линий и формируют их самообращение. Зависимости  $I_{\max 1}/I_{\max 2}(z)$  для линий атомов алюминия и меди имеют интересные особенности. Для линий атомов алюминия Al I 394.4 и 396.1 нм параметр асимметрии пиков  $I_{\max 1}/I_{\max 2}$  достигает больших значений  $3 \div 5$  для центральных лучей зрения и заметно уменьшается для периферических лучей зрения в пределах излучающей зоны, однако даже для периферических лучей зрения параметр  $I_{\max 1}/I_{\max 2}$  остается довольно большим ( $>1.7$ ). Такое поведение зависимости  $I_{\max 1}/I_{\max 2}(z)$  указывает, как отмечено в [6], на то, что концентрация  $n_j$  поглощающих атомов алюминия мала в излучающей зоне и резко возрастает в поглощающей зоне плазмы при  $r_0 \geq r > R_0$  ( $r_0$  – радиус поглощающей зоны). В случае атомов алюминия малые значения  $n_j$  в излучающей зоне могут быть обусловлены их высокой степенью ионизации из-за малой энергии ионизации атомов алюминия. Прямые определения  $n_j(r)$  по спектру поглощения для атомов алюминия в условиях импульсных разрядов [2] дают именно такое распределение. Для линий атомов меди Cu I 324.7 и 327.4 нм, наоборот, параметр асимметрии пиков  $I_{\max 1}/I_{\max 2}$  имеет малые значения  $1.3 \div 1.5$  (для профиля В на рис. 2  $I_{\max 1}/I_{\max 2} = 1.4$ ) для центральных лучей зрения и сильно возрастает до значений  $3 \div 5$  для периферических лучей зрения в пределах излучающей зоны. Такое поведение зависимости  $I_{\max 1}/I_{\max 2}(z)$  указывает, как отмечено в [6], на то, что поглощающие атомы меди на уровне  $j$  сосредоточены в основном в излучающей зоне. Эти особенности распределений  $n_e(r)$  и  $n_j(r)$  учитывались нами при теоретическом моделировании профилей самообращенных линий.

Проведенный анализ поведения линий Al 394.4 и 396.1 нм позволил лучше, по сравнению с [1], уяснить возможности использования их асимметрии крыльев для определения концентрации электронов в плазме. Заданный определенным способом параметр асимметрии крыльев  $\chi(0)$  для центрального луча зрения является достаточно большим (на рис. 1  $\chi \approx 0.21$  нм при  $I/I_{\max 1} = 0.1 \div 0.2$ ) и согласно [1] пропорционален электронной полуширине  $\delta_{eo} = \delta_e(0)$  и, тем самым, соответствующей электронной концентрации  $n_{eo}$  ( $\delta_{eo} \sim n_{eo}$  [3]). Полученные нами значения  $\chi(0)$  при разных начальных напряжениях  $U_0$  с разными  $n_{eo}$  подтвердили эту пропорциональность. Центральным вопросом при определении  $n_{eo}$  по  $\chi(0)$  является установление связи  $\chi(0)$  с  $\delta_{eo}$  согласно формуле  $\delta_{eo} = \chi(0)/\chi_0$ , где  $\chi_0$  есть некоторый числовой параметр, который в [1] предлагается оценивать теоретически на основе численных расчетов уравнения переноса излучения с использованием разных моделей неоднородной плазмы. По полученным значениям  $n_{eo}$  по линии  $H_\alpha$  с использованием соответствующих значений электронной полуширины  $\delta_{eo}$  [3] нами впервые напрямую были оценены значения  $\chi_0$  как экспериментальные значения  $\chi_{0\text{э}}$ :  $\chi_{0\text{э}} \approx 3.6$  на уровне интенсивности  $I = 0.1I_{\max 1}$  и  $\chi_{0\text{э}} \approx 3.1$  при  $I = 0.2I_{\max 1}$ . Модельные расчеты, проведенные согласно [4], с использованием указанных выше зависимостей электронной полуширины  $\delta_e(r) \sim n_e(r)$  и  $n_j(r)$  для атомов алюминия, а также электронного сдвига линий и вклада ионного уширения, согласно [3], при осевом значении температуры плазмы  $T_o \approx 15000$  К [1] дали теоретические значения  $\chi_0 = 3.0 \div 3.2$  при экспериментально наблюдаемых отношениях  $\Delta_s(0)/\chi(0) \approx 0.5$ . Большие теоретические значения  $\chi_0$  подтверждают большие экспериментальные значения  $\chi_{0\text{э}}$  и, тем самым, данные расчетов [3]. Согласно полученным нами расчетных и экспериментальных данных при оценке  $n_{eo}$  по линиям Al I 394.4 и 396.1 нм целесообразно в первом приближении положить  $\chi_0 = 3.5$  при  $I = 0.1I_{\max 1}$  и  $\chi_0 = 3.2$  при  $I = 0.2I_{\max 1}$ . При таком задании  $\chi_0$  наиболее вероятной при нахождении  $n_{eo}$  будет ошибка в относительных единицах в  $\pm 10\%$ . Отсюда

видно, что самообращенные линии Al I 394.4 и 396.1 нм могут быть рекомендованы для определения высоких значений электронной концентрации плазмы.

Важные для практики линии Cu I 324.7 и 327.4 нм прежде всего интересны тем, что в [3] для них не приведены теоретические значения параметров штарковского уширения. Теоретический квантовомеханический расчет параметров для этих линий был впервые проведен нами в [13]. Малые зарегистрированные для самообращенных линий атомов меди значения  $\chi(0) \approx 0.05$  нм для центральных лучей зрения и высокие значения  $I_{\max 1}/I_{\max 2} = 3 \div 5$  для периферических лучей зрения, с одной стороны, говорят о малых значениях электронной полуширины  $\delta_e$  даже при  $n_e \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а с другой – об относительно высоких значениях ( $\sim 1$ ) отношения  $\eta = |\Delta_e|/\delta_e$  электронного сдвига  $\Delta_e$  к полуширине  $\delta_e$ . Именно такие значения  $\delta_e$  и  $\eta$  были теоретически получены в [13]. Подробно об оценке  $\delta_e$  по  $\chi$  для линий атомов меди сказано в [8]. Здесь же в заключение можно отметить, что модельные расчеты самообращенных профилей, проведенные согласно [4], с учетом специфики распределения поглощающих атомов меди в поперечном сечении плазмы дали для линий Cu I 324.7 и 327.4 нм значение  $\chi_0 \approx 3.0$ . Это значение  $\chi_0$  близко к значениям  $\chi_{0\text{э}}$ , полученным нами для линий Al I 394.4 и 396.1 нм. Близость значений  $\chi_0$ , с одной стороны, обусловлена близостью значений  $\eta$  для линий атомов меди ( $\eta \approx 1.0$  при  $T_o \approx 22000 \text{ К}$  [12]) и алюминия ( $\eta \approx 1.2$  при  $T_o \approx 15000 \text{ К}$  [3]), а с другой стороны, говорит о сравнительно малой чувствительности значений  $\chi_0$  к индивидуальным условиям формирования самообращенных линий. Модельные расчеты показывают, что значения  $\chi_0$  в первую очередь определяются значениями  $\eta$  и вкладом ионов в общее штарковское уширение спектральных линий, что было ранее отмечено в [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-2965.2008.2).

### Summary

*G.G. Il'in, V.V. Dyukov, E.V. Sarandaev, M.Kh. Salakhov.* The Experimental and Theoretical Investigations of the Asymmetric Self-Reversal of the Neutral Aluminum and Copper Resonance Spectral Lines.

The asymmetric self-reversed resonance neutral aluminum and copper atoms spectral lines have been investigated at the high electron concentrations under the conditions of an impulse capillary discharge in the air. The recorded asymmetry of Al I 394.4 and 396.1 nm lines are in good agreement with the literary values of the Stark broadening parameters. Those lines may be recommended for the plasma electron concentration determination. At first the Stark broadening parameters of the copper atoms Cu I 324.7 и 327.4 nm lines have been determined by their asymmetric self-reversal parameters.

**Key words:** plasma, spectral line, Stark broadening, self-reversal, electron concentration.

### Литература

1. *Fishman I.S, Il'in G.G., Salakhov M.Kh.* Review. Spectroscopic diagnostics of a strongly inhomogeneous optically thick plasma. Part 1. The formation of asymmetric self-reversed emission and absorption lines: determination of electron impact half-width and electron concentration // Spectrochim. Acta Part B. – 1995. – V. 50. – P. 947–959.
2. *Fishman I.S, Il'in G.G., Salakhov M.Kh.* Review. Spectroscopic diagnostics of a strongly inhomogeneous optically thick plasma. Part 2. Determination of atom concentration and

- variations of different physical values in the plasma cross-section using asymmetric self-reversed emission and absorption lines // Spectrochim. Acta Part B. – 1995. – V. 50. – P. 1165–1178.
3. *Грим Г.* Уширение спектральных линий в плазме. – М.: Мир, 1978. – 491 с.
  4. *Ильин Г.Г., Коновалова О.А., Салахов М.Х.* Моделирование переноса излучения в спектральной линии в условиях неоднородной плазмы (конспекты лекций и задания к практикуму по численным методам и математическому моделированию). – Казань: Казан. гос. ун-т, 2001. – 123 с.
  5. *И'ин G.G., Konovalova O.A., Sarandaev E.V., Salakhov M.Kh.* The dependence of asymmetry of self-reversed spectral lines with the quadratic Stark-effect on the absorption parameter // Publ. Astron. Obs. Belgrade. – 1997. – No 57. – P. 51–54.
  6. *И'ин G.G., Konovalova O.A., Salakhov M.Kh., Sarandaev E.V.* Estimation of atom concentration variation in the cross-section of thick plasma using asymmetric self-reversed emission spectral lines // XXIV Int. Conf. Phenom. Ionized Gases. Proc. Contrib Pap. – Warsaw, Poland, 1999. – V. 1. – P. 219–220.
  7. *Ильин Г.Г., Коновалова О.А.* Анализ взаимосвязи параметров асимметричных самообращенных спектральных линий в условиях плотной неоднородной плазмы с преобладанием штарковского уширения заряженными частицами // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: Сб. ст. – Казань: Изд-во «РегентЪ», 2001. – С. 173–180.
  8. *И'ин G.G., Konovalova O.A., Salakhov M.Kh., Sarandaev E.V.* The experimental and theoretical investigations of the asymmetric self-reversal of the neutral copper atoms resonance spectral line Cu I 327.396 nm under the conditions of an impulse discharge // Publ. Astron. Obs. Belgrade. – 2003. – No 76. – P. 201–204.
  9. *Дюков В.В., Ильин Г.Г., Сарандаев Е.В.* Определение электронной концентрации плазмы по асимметричным самообращенным резонансным спектральным линиям нейтральных атомов алюминия // Вестн. Тат. гос. гуманит.-пед. ун-та. – 2006. – № 7. – С. 17–26.
  10. *Дюков В.В., Ильин Г.Г., Сарандаев Е.В.* Моделирование асимметричных самообращенных спектральных линий нейтральных атомов алюминия в условиях импульсного капиллярного разряда в воздухе // Вестн. Тат. гос. гуманит.-пед. ун-та. – 2006. – № 9-10. – С. 31–37.
  11. *Дюков В.В., Ильин Г.Г., Сарандаев Е.В., Яковлев А.Б., Яковлева Ю.В.* Моделирование асимметричных самообращенных спектральных линий нейтральных атомов алюминия в условиях импульсного капиллярного разряда // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: Сб. ст. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2007. – С. 299–302.
  12. *Сарандаев Е.В., Салахов М.Х., Фичман И.С.* Спектрометрическая установка с капиллярным источником света для исследования штарковского уширения спектральных линий // Журн. прикл. спектроск. – 1988. – Т. 48, № 3. – С. 513–516.
  13. *Babina E.M., И'ин G.G., Konovalova O.A., Salakhov M.Kh., Sarandaev E.V.* The complete calculation of Stark broadening parameters for the neutral copper atoms spectral lines of  $4s^2 S-4p^2 P^0$  and  $4s^2^2 D-4p^2 P^0$  multiplets in the dipole approximation // Publ. Astron. Obs. Belgrade. – 2003. – No 76. – P. 163–166.

Поступила в редакцию  
10.03.08

**Ильин Геннадий Григорьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптики и нанофотоники Казанского государственного университета.

**Дюков Валерий Владимирович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и экспериментальной физики Татарского государственного гуманитарно-педагогического университета, г. Казань.

**Сарагдаев Евгений Владимирович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптики и нанофотоники Казанского государственного университета.

Email: *sarev@ksu.ru*

**Салахов Мяззюм Халимуллович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой оптики и нанофотоники, ректор Казанского государственного университета.