

02; 04

© 1993

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ  $C_6$  И  $C_{12}$   
ПОТЕНЦИАЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕННАРДА-ДЖОНСА (6-12)

А.М. В о р о н о в, В.Н. Ж у р а в л е в

Анализ уширения спектральных линий, вызываемого столкновениями поглощающих атомов с другими атомами, открывает новые возможности для изучения возмущения термов. Исследование с помощью этих эффектов межатомных и межмолекулярных сил представляет несомненный интерес. Информация о величинах сечений столкновений позволяет полнее понять природу взаимодействия атомов и молекул, поскольку общее выражение для энергии взаимодействия как для нормальных, так и для возбужденных состояний, пригодное для любых расстояний, найти крайне трудно.

Нестационарный характер сильноточных разрядов, высокая температура ( $T \sim 1-4$  эВ) [1] плазмы делают затруднительным непосредственное измерение пространственно-временных распределений параметров плазмы. Поэтому представляет интерес исследование оптических спектров излучения из разряда несущих информацию как об интегральных характеристиках дуги, так и об окружающих ее областях.

Если разряд осуществляется при высоком давлении ( $p \geq 1$  МПа), то плазма в разряде оказывается оптически непрозрачной. В этом случае излучение из разряда определяется некоторой поверхностной температурой и близко к излучению черного тела. Распределение температуры внутри дуги слабо влияет на спектр излучения. Однако периферийные области будут искажать излучаемый непрерывный спектр, на фоне которого появляются линии поглощения различных примесных элементов. Примесные атомы попадают в разряд из электродов и стенок разрядной камеры и, главным образом, из проволоочки, с помощью которой обычно инициируется разряд. Исследование спектров поглощения позволяет определить параметры поглощающей среды и константы межатомных потенциалов взаимодействия поглощающих атомов и атомов газа, заполняющего камеру.

В настоящей работе приводятся результаты спектроскопических исследований сильноточной ( $I_M \approx 70$  кА) импульсной ( $\tau \approx 120$  мкс) дуги в гелии. Получены спектры поглощения  $Na$ ,  $Cu$ ,  $Ca$ ,  $Al$ , на основании которых определены константы взаимодействия потенциала Леннарда-Джонса (6-12)  $C_6$ ,  $C_{12}$  некоторых возбужденных состояний указанных атомов с атомами гелия и температура газа в области поглощения.

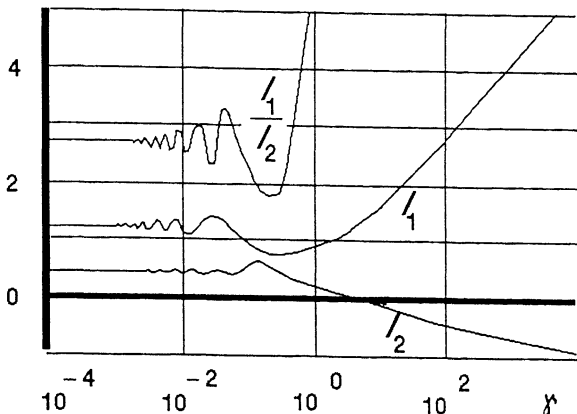
Регистрация спектров проводилась на установке, описанной в [2]. Разряд осуществлялся в замкнутой камере, заполненной ге-

Т а б л и ц а

Элемент, переход	$\lambda,$ $\text{\AA}$	$\Delta\nu$ $10^{-11}$ , $\text{с}^{-1}$	$C_6$ $10^{32}$ $\text{см}^{-6}\text{с}^{-1}$	$C_{12}$ $10^{74}$ $\text{см}^{-12}\text{с}^{-1}$
<i>NaI</i>				
$3^2S_{1/2} - 3^2P_{1/2}$	5896	4.3	25	4.2
$3^2S_{1/2} - 3^2P_{3/2}$	5890	4.3	25	4.2
<i>CuI</i>				
$3d^9 4s^2 2D_{5/2} - 3d^{10} 4p^2 P_{3/2}^0$	5105	4.6	20	2.7
$3d^9 4s^2 2D_{3/2} - 3d^{10} 4p^2 P_{3/2}^0$	5700	5.5	30	6.7
$3d^9 4s^2 2D_{3/2} - 3d^{10} 4p^2 P_{1/2}^0$	5782	3.6	13	1.1
$3d^{10} 4p^2 P_{1/2}^0 - 3d^{10} 4d^2 D_{3/2}$	5153	1.2	270	840
$3d^{10} 4p^2 P_{3/2}^0 - 3d^{10} 4d^2 D_{3/2}$	5220	1.1	72	3.4
$3d^{10} 4p^2 P_{3/2}^0 - 3d^{10} 4d^2 D_{5/2}$	5218	1.1	22	3.4
$3d^9 4s 4p^4 P_{5/2}^0 - 3d^9 4s 5s^4 D_{3/2}$	4275	9.8	100	94
<i>AlI</i>				
$3^2P_{3/2} - 4^2S_{1/2}$	3961	9.6	67	37
$3^2P_{1/2} - 4^2S_{1/2}$	3944	9.6	67	37
<i>CaI</i>				
$4^1S_0 - 4^1P_1^0$	4227	8.4	50	20
<i>CaII</i>				
$2^2S - 2^2P_{3/2}^0$	3933	7.7	65	36
$2^2S - 2^2P_{1/2}^0$	3968	7.7	65	36

лием при начальном давлении  $P_0 = (1-12 \text{ МПа})$ , посредством взрыва медной проволочки. В процессе разряда давление возросло до величин  $P \sim (20-70) \text{ МПа}$ . В полученном сплошном спектре наблюдались линии поглощения: *D*-линии *NaI* резонансные линии *CaI*, *CaII* и *AlI*, а также линии *Cu*. Резонансные линии *Cu*, из-за большой концентрации атомов меди в основном состоянии были сильно реабсорбированы. Это обстоятельство не позволяет достоверно определить их полуширину. Полуширина  $\Delta\nu$  остальных линий с учетом реабсорбции приведена в таблице для случая  $P = 33 \text{ МПа}$ . Заметного сдвига центра линии на фоне аппаратной ширины  $\sim 0.05 \text{ нм}$  не обнаружено.

Аномально широкими по сравнению с остальными линиями меди являются линии меди  $\lambda = 427.5 \text{ нм}$  и  $\lambda = 515.3 \text{ нм}$ . Уширение первой линии может быть объяснено тем, что верхний уровень является автоионизационным. Объяснение аномальной полуширины линии  $\lambda = 515.3 \text{ нм}$  встречает значительные трудности. По-видимому, уширение обусловлено наложением на нее линии *NaI*  $\lambda = 515.3 \text{ нм}$ .



Зависимость величин  $I_1(y)$ ,  $I_2(y)$  и  $\frac{I_1(y)}{I_2(y)}$  от параметра  $y$ .

Если поглощение излучения дуги происходит в сравнительно холодной области ( $T \leq 10^4$  К), то полуширина линий поглощения определяется столкновениями с атомами буферного газа (He). Будем предполагать, что взаимодействие между нейтральными атомами описывается потенциалом Леннарда-Джонса (6-12):

$$W = -\frac{\hbar C_6}{r^6} + \frac{\hbar C_{12}}{r^{12}}. \quad (1)$$

Константы взаимодействия  $C_6, C_{12}$  определяются состоянием атома. Для потенциала (1) полуширина и сдвиг линии поглощения определяются формулами [5]:

$$\Delta\nu = (3\pi/8)^{2/5} \delta C_6^{2/5} V^{3/5} N I_1(y), \quad (2)$$

$$\delta\nu = (3\pi/8)^{2/5} \delta C_6^{2/5} V^{3/5} N I_2(y), \quad (3)$$

$$y = 0.539 \delta C_{12} \delta C_6^{1/5} V^{6/5}, \quad (4)$$

где  $V = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2}$  — средняя относительная скорость и — приведенная масса соударяющихся частиц. Функции  $I_1(y)$  и  $I_2(y)$  имеют соответствующие интегральные представления:

$$I_1(\gamma) = \int_0^{\infty} 2 [1 - \cos(x^{-5} - \gamma x^{-11})] x dx, \quad (5)$$

$$I_2(\gamma) = \int_0^{\infty} [\sin(x^{-5} - \gamma x^{-11})] x dx. \quad (6)$$

Графики зависимостей  $I_1(\gamma)$ ,  $I_2(\gamma)$  и величины  $\frac{I_1(\gamma)}{I_2(\gamma)}$ , равной отношению полуширины линии поглощения к ее сдвигу (см. (2) (3)), изображены на рисунке. В предельном случае  $\gamma = 0$  (потенциал Вандер-Ваальса) интегралы (4) и (5) вычисляются аналитически  $I_1(0) \approx 1.20$  и  $I_2(0) \approx 0.43$  [3]. Из рисунка видно, что сдвиг линии отсутствует при  $\gamma \sim \gamma_{кр} \approx 5$ , причем в области  $0 \leq \gamma \leq \gamma_{кр}$  величина  $I_1$  меняется слабо  $I_1(\gamma) \approx I_1(0)$ . Это позволяет использовать константу Ван-дер-Ваальсовского взаимодействия  $\delta C_6$  D-линий Na, возмущаемых гелием [4], для определения температуры возмущающего газа в зоне поглощения, где газ предполагается равновесным. Величина газовой температуры в зоне поглощения составила  $T_g \sim 8 \cdot 10^9$  К. В свою очередь, по известной температуре  $T_g$  и измеренному давлению  $P$ , согласно (4) и (5) были найдены константы  $\delta C_6$  и  $\delta C_{12}$  для атомов  $Cu$ ,  $Ca$  и  $Al$ , возмущенных гелием.

В заключение авторы хотели бы поблагодарить Л.Н. Шабанову за полезные обсуждения.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Б а к ш т Ф.Г., Б о р о д и н В.С., В о р о н о в А.М., Ж у р а в л е в В.Н. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 10. С. 53-59.
- [2] Б а к ш т Ф.Г., Б о р о д и н В.С., В о р о н о в А.М., Ж у р а в л е в В.Н., Р у т б е р г Ф.Г. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 11. С. 190-193.
- [3] R o u e f f E. // Astron. and astrophys. 1970. V. 7. N 1. P. 4-9.
- [4] A l a r d N., K i e l k o p f J.E. // Rev. Mod. Phys. 1984. V. 54. N 4. P. 1103-1182.
- [5] H i n d m a r s h W.R., R e t f o r d A.D., S m i t h G. // Proc. Roy. Soc. 1967. V. 297. N 1449. P. 296-304.

Институт проблем электрофизики  
РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию  
5 марта 1993 г.