

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГАЗОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ИНТЕНСИВНОСТЯМ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОЛОС H_2 И D_2

I. ВРАЩАТЕЛЬНАЯ СТРУКТУРА ПОЛОС СИСТЕМЫ ФУЛХЕРА

Б. П. Лавров и Д. К. Оторбаев

На основе анализа литературных данных и измеренных с высоким разрешением спектров испускания дугового разряда низкого давления предлагается конкретная методика и численные данные, необходимые для определения «вращательной температуры» плазмы по относительным интенсивностям спектральных линий вращательной структуры диагональных электронно-колебательных полос системы Фулхера молекулы водорода (переходы $1s\sigma 3p\pi^3\Pi_u, v' \rightarrow 1s\sigma 2s\sigma^3\Sigma_g^+, v''$ при $v'=v''=0, 1, 2$).

Измерение относительного распределения интенсивности по вращательной структуре электронно-колебательных молекулярных полос широко используется для определения газовой температуры низкотемпературной плазмы [1]. При этом измеряемой величиной является «вращательная температура» T_{rot}^* , связанная с распределением молекул по вращательным подуровням возбужденных электронно-колебательных состояний. Наблюдаемые на опыте распределения обычно близки к бoльцмановскому, поэтому принято считать, что «вращательная температура» совпадает с поступательной или газовой температурой T_g , которая характеризует распределение тяжелых частиц плазмы по скоростям [2]. В случае низких давлений, когда частота столкновений нормальных молекул с возбужденными меньше вероятности радиационного распада последних, такое отождествление T_{rot}^* с T_g , с нашей точки зрения, недостаточно обосновано.

Выяснение связи между вращательной и газовой температурами с целью разработки методики определения T_g в газоразрядной плазме низкого давления является предметом настоящего цикла работ.

Рассматриваемый метод до сих пор не был применен для диагностики плазмы простейшего молекулярного газа — водорода. Это связано прежде всего с тем, что до настоящего времени спектр молекул H_2 вследствие его чрезвычайной сложности расшифрован далеко не полностью [3, 4]. С другой стороны, необходимые для оптической пирометрии плазмы данные о константах молекулярных переходов разбросаны по различным статьям, а если и систематизированы, то в интересах специалистов по молекулярной спектроскопии.

Цель данной работы состояла в том, чтобы на основе анализа литературных данных и измеренных с высоким разрешением спектров испускания водородной дуги низкого давления рассмотреть возможность определения «вращательной температуры» плазмы по относительным интенсивностям линий электронно-колебательно-вращательных полос системы Фулхера ($1s\sigma 3p\pi^3\Pi_u, v', J' \rightarrow 1s\sigma 2s\sigma^3\Sigma_g^+, v'', J''$) молекулы H_2 .

Такой выбор сделан по двум причинам. Во-первых, линии системы Фулхера в красной области спектра расположены достаточно редко и обычно доминируют над излучением, связанным с другими переходами. Во-вторых, эта система полос и необходимые молекулярные константы изучены наиболее подробно.

О п р е д е л е н и е « в р а щ а т е л ь н о й т е м п е р а т у р ы »

Как известно, интенсивность отдельной линии вращательной структуры электронно-колебательной молекулярной полосы может быть записана следующим образом:

$$I_{n''v''J''}^{n'v'J'} = N_{n'v'J'} \hbar c \nu A_{n''v''J''}^{n'v'J'} \quad (1)$$

где $I_{n''v''J''}^{n'v'J'}$ — интенсивность линии, возникающей при переходе с уровня, принадлежащего электронному состоянию n' и характеризующего колебательным и вращательным квантовыми числами v' и J' на уровень с n'' , v'' и J'' ; $N_{n'v'J'}$ — заселенность верхнего уровня; ν и $A_{n''v''J''}^{n'v'J'}$ — волновое число и вероятность перехода для данной линии, а \hbar и c — известные постоянные.

В случае бoльцмановского распределения молекул по вращательным подуровням верхнего, излучающего, электронно-колебательного состояния выражение для интенсивности линий $I_{n''v''J''}^{n'v'J'}$ имеет вид [2, 5]

$$I_{n''v''J''}^{n'v'J'} = C_{n''v''J''}^{n'v'J'} \nu^4 S_{J'J''} \exp\left(-\frac{\hbar c}{kT_{\text{rot}}^*} F_{J'}\right), \quad (2)$$

где $C_{n''v''J''}^{n'v'J'}$ — постоянная в пределах данной электронно-колебательной полосы; $S_{J'J''}$ — так называемая сила линии; T_{rot}^* — «вращательная температура»; $F_{J'}$ — энергия верхнего уровня в см^{-1} ; k — постоянная Больцмана.

Сила линии для молекул с одинаковыми ядрами может быть представлена в виде произведения множителя Гунда G и фактора Хёнля—Лондона H [2]. Множитель Гунда зависит от величины ядерного спина и симметрии начального и конечного состояний. В случае молекулы водорода G принимает попеременно значения 1 и 3. Факторы Хёнля—Лондона для термов различной мультиплетности вычислены в работе [6]. Для водорода характерен «b» тип связи по Гунду [2], кроме того, для данной системы триплетное расщепление пренебрежимо мало [7], поэтому выражения для H интересующих нас переходов ${}^3\Pi \rightarrow {}^3\Sigma$ имеют вид [6]

$$\left. \begin{aligned} P\text{-ветвь } H &= \frac{1}{2}(J'' - 1), \\ Q\text{-ветвь } H &= \frac{1}{2}(2J'' + 1), \\ R\text{-ветвь } H &= \frac{1}{2}(J'' + 2). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Таким образом, приведенные интенсивности линий $I_{J'J''}$ вращательной структуры одной электронно-колебательной полосы должны удовлетворять уравнению

$$\ln I_{J'J''} \equiv \ln \left(\frac{I_{n''v''J''}^{n'v'J'}}{\nu^4 G H} \right) = -\frac{\hbar c}{kT_{\text{rot}}^*} F_{J'} + \text{const.} \quad (4)$$

Выполнимость прямолинейной зависимости $\ln I_{J'J''}$ от $F_{J'}$ является экспериментальным подтверждением существования бoльцмановского распределения. В этом случае T_{rot}^* определяется из соотношения

$$T_{\text{rot}}^* = \frac{\hbar c}{k \left| \frac{d \ln I_{J'J''}}{d F_{J'}} \right|} = \frac{\hbar c}{k |\text{tg } \psi|}, \quad (5)$$

где ψ — угол наклона прямой (4) к оси абсцисс.

Все численные данные, необходимые для определения «вращательной температуры» по относительным интенсивностям наиболее интересных в экспериментальном отношении Q и R ветвей диагональных ($v' = v'' = 0, 1, 2$) полос системы Фулхера, сведены в табл. 1. Длины волн в воздухе λ_a , волновые числа ν и энергии уровней $F_{J'}$ заимствованы из [4] с учетом уточнения идентификации, проведенного в работе [8]. Факторы Хён-

Таблица 1
 Данные о константах, необходимых для определения «вращательной температуры» $3r^2\Pi_u$ -состояния H_2

Линия	Спосоа											
	[0—0]			[1—1]			[2—2]					
	$\lambda_a, \text{Å}$	$\nu^2 S J J''$, 10^{16} см^{-1}	$F J'$, см^{-1}	λ_a	$\nu^2 S J J''$	$F J'$	λ_a	$\nu^2 S J J''$	$F J'$	λ_a	$\nu^2 S J J''$	$F J'$
Q (1)	6018.299	34.3	59.2	6121.787	32.0	56.1	6224.815	29.9	53.0	6201.185	6.75	53.0
Q (2)	6023.757	19.0	177.6	6127.246	17.7	166.2	6230.258	16.6	159.0	6182.990	30.8	159.0
Q (3)	6031.909	79.2	351.7	6135.395	74.0	334.5	6238.391	69.2	321.7	6167.732	13.8	321.7
Q (4)	6042.716	33.7	587.4	6146.186	31.5	541.8	6249.150	29.5	525.5	6155.629	52.1	525.5
Q (5)	6056.091	122.5	870.0	6159.565	114.5	826.4	6262.495	107	791.6	6146.901	21.0	791.6
Q (6)	6071.996	47.8	1215.3						1088.1	6141.787	73.7	1088.1
R (0)	5994.072	7.74	59.2	6098.235	7.22	56.1						
R (1)	5975.445	35.3	176.2	6080.783	32.9	167.9						
R (2)	5959.825	15.8	354.2	6067.736	14.7	327.9						
R (3)	5947.313	59.9	583.5	6063.283	55.4	554.5						
R (4)	5938.022	24.1	875.2									
R (5)	5932.036	84.7	1209.1									

ля—Лондона рассчитаны по формулам (3), а «сильные» и «слабые» линии и соответствующие значения H определены экспериментально.

Экспериментальная установка

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Изучалась прианодная плазма водородной дуги дуоплазматронной геометрии. Между накаливаемым оксидным катодом 1 и охлаждаемым проточной водой медным анодом 4 расположен дополнительный, конусообразный электрод 2. Этот промежуточный электрод и анод являются полюсами электромагнита 3, который создает неоднородное, сходящееся к центру прианодной области 5 магнитное поле. Разрядное устройство, вакуумная и электротехническая системы в целом аналогичны использованным нами ранее [9].

Изображение центральной части прианодной плазмы с помощью объектива 7 проектировалось на входную щель спектрального прибора 8. Построенный на базе стандартного спектрографа ДФС-8, этот монохроматор с решеткой 1800 штр./мм имел в первом порядке дисперсию около 1.8 Å/мм , что позволяло осуществлять спектральное разрешение на уровне $0.1 \div 0.2 \text{ Å}$. Несколько меньшей дисперсией, но существенно большей светосилой обладал монохроматор МСД-2 16 с решеткой 1200 штр./мм, использовавшийся во втором порядке. Вращающаяся плоскопараллельная пластина 13 и спектрофотометрическая система 16—20 применялись для измерения поперечного распределения интенсивностей линий в источнике.

Измерения относительных интенсивностей линий вращательной структуры по-

лос системы Фулхера проводились спектрофотометрической системой 6—12; с помощью системы 14—20 контролировалась стабильность разрядных условий, путем регистрации на самописце 20 интенсивности линии H_{β} от времени. С помощью коммутационного устройства 21 на

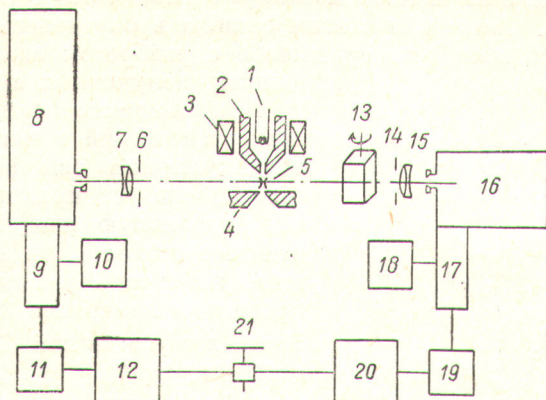


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

1 — накаливаемый оксидный катод; 2 — промежуточный электрод; 3 — катушка электромагнита; 4 — анод; 5 — прианодная плазма; 6, 14 — присовые диафрагмы; 7, 15 — ахроматические объективы; 8 — длиннофокусный дифракционный монохроматор; 9, 17 — фотоэлектронные умножители ФЭУ-79; 10, 18 — стабилизированные выпрямители ВС-22; 11, 19 — усилители постоянного тока; 12, 20 — электронные автоматические потенциометры; 13 — вращающаяся плоскопараллельная пластина; 16 — монохроматор МСД-2; 21 — коммутатор меток времени.

лентах самописцев 12 и 20 одновременно ставились метки времени. Во всех исследованных режимах изменение интенсивности линии H_{β} не превышало 3%, поэтому при обработке спектров нестабильность плазматрона во внимание не принималась.

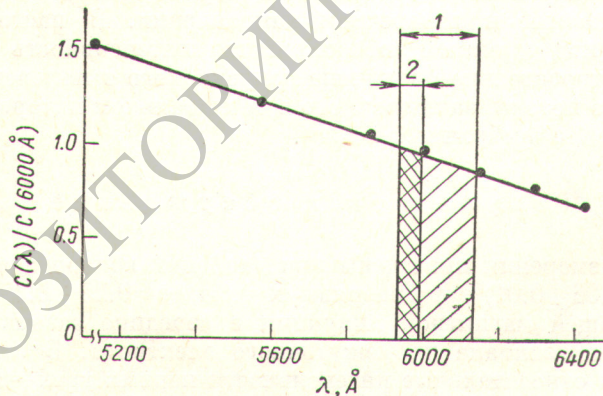


Рис. 2. Спектральное распределение относительной чувствительности спектрофотометрической установки $C(\lambda)/C(6000 \text{ \AA})$.

1 — область свечения исследованных полос системы Фулхера, 2 — область свечения первых шести линий [O—O] R-ветви.

Для определения спектрального распределения чувствительности фотоэлектрической системы 6—12 был измерен спектр светоизмерительной ленточной лампы СИ10-300, спектральная плотность светимости которой рассчитывалась по данным работы [10]. Найденная таким образом относительная спектральная чувствительность $C(\lambda)/C(6000 \text{ \AA})$ в интересующем нас интервале длин волн показана на рис. 2. Относительная калибровка

в принципе позволяет учесть некоторую селективность спектрофотометрической схемы. Однако из рис. 2 и табл. 1 видно, что в пределах одной ветви $C(\lambda)$ можно считать постоянной с точностью $\approx 4\%$. В данной работе «вращательная температура» измерялась по отдельным ветвям электронно-колебательных полос, поэтому зависимость $C(\lambda)$ во внимание не принималась. Связанная с этим ошибка в определении T_{rot}^* в нашем случае оказалась малой по сравнению с разбросом экспериментальных данных, полученных в разных опытах.

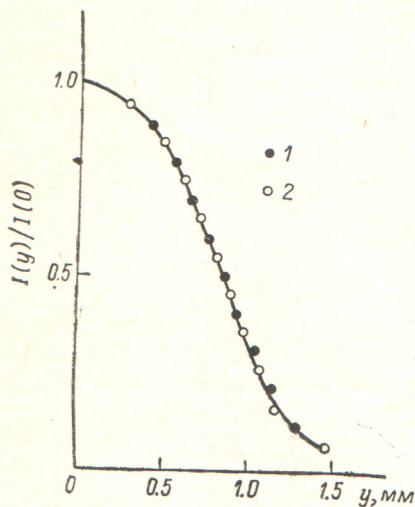


Рис. 3. Поперечный профиль интенсивности линий.

1 — 6224.815 Å [2—2] Q (1) и 2 — 6362.479 Å [2—2] P (5). $P=0.06$ тор; $i=0.5$ А.

Поэтому для определения вращательной температуры в приосевой области прианодной плазмы достаточно измерять относительные световые потоки, испускаемые в поперечном направлении. В настоящей статье в дальнейшем под термином «относительная интенсивность линии» подразумевается относительная величина испускаемого в поперечном направлении светового потока, заключенного в спектральном интервале, соответствующем ширине выбранной линии.

Результаты и обсуждение

Основные измерения проведены при давлении водорода в прианодной области $P=(0.06 \pm 0.01)$ тор; разрядных токах $i=0.25 \div 2.65$ А; продольной составляющей магнитной индукции в середине зазора $B=3.2$ кГс и плавающем потенциале промежуточного электрода. В этих условиях были измерены относительные интенсивности первых трех—шести линий, принадлежащих P -, Q - и R -ветвям диагональных [0—0], [1—1] и [2—2] полос системы Фулхера. Типичные результаты представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 показаны в полулогарифмическом масштабе зависимости приведенных интенсивностей линий от F_{ν} для всех изученных ветвей полос системы Фулхера. Видно, что в пределах ошибок измерений эти зависимости можно считать прямолинейными с примерно одним и тем же углом наклона. С другой стороны, из рис. 4 следует, что распределение

¹ Это связано с тем, что в результате наложения на прианодную плазму магнитного поля светящаяся зона локализуется на расстояниях порядка 1 мм от оси дуги, в то время как расстояние от оси до охлаждаемых медных стенок разрядной камеры составляет 12 мм.

Таблица 2
 Результаты измерений «вращательной температуры» по отдельным ветвям диагональных ($v' = v''$) полос системы Фулхера

Ветвь	$i, \text{Å}$				
	0,25	0,5	0,9	1,5	2,65
	$T_{\text{от}}^*, \text{K}$				
[0—0] P	—	—	550 ± 180	530 ± 180	480 ± 180
[0—0] Q	370 ± 40	430 ± 40	480 ± 50	560 ± 80	560 ± 80
[0—0] R	410 ± 40	460 ± 60	550 ± 70	570 ± 80	620 ± 90
[1—1] P	280 ± 80	340 ± 100	340 ± 100	500 ± 200	500 ± 200
[1—1] Q	280 ± 30	310 ± 30	370 ± 40	400 ± 50	440 ± 60
[1—1] R	310 ± 50	360 ± 50	420 ± 70	450 ± 90	530 ± 150
[2—2] P	280 ± 40	320 ± 40	400 ± 100	410 ± 100	460 ± 100
[2—2] Q	280 ± 20	290 ± 20	350 ± 40	390 ± 40	400 ± 40
[2—2] R	380 ± 30	380 ± 30	450 ± 40	450 ± 40	510 ± 50

молекул по вращательным подуровням в нашем случае близко к больцмановскому.

На рис. 5 показаны аналогичные зависимости для одной ветви, измеренные при разных токах. Видно, что с ростом тока вращательная тем-

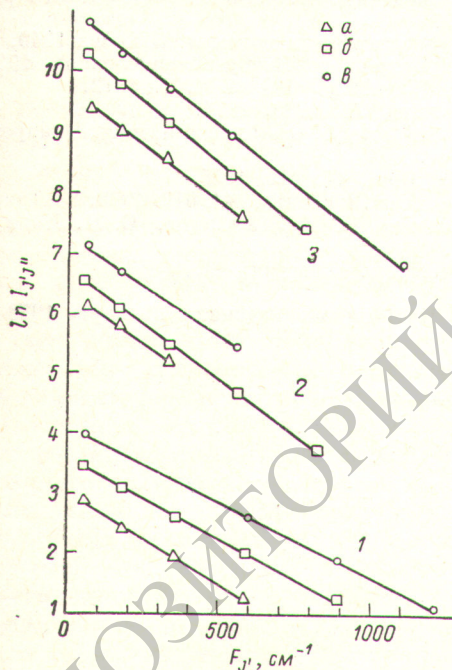


Рис. 4. Зависимость логарифма приведенной интенсивности $I_{J,J''}$ от энергии верхнего уровня для P-(a), Q-(б) и R-ветвей (в) диагональных [0—0] (1), [1—1] (2) и [2—2] (3) электронно-колебательных полос системы Фулхера при $i=1.5 \text{ Å}$.

Для наглядности данные, относящиеся к различным ветвям, смещены по оси ординат.

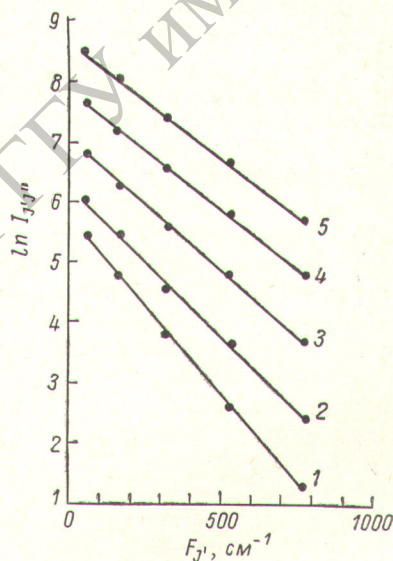


Рис. 5. Зависимость логарифма приведенных интенсивностей линий Q ветви [2—2] полосы от $F_{J'}$ при различных разрядных токах.

$i=0.25, 0.5, 0.9, 1.5$ и 2.65 Å (прямые 1—5 соответственно).

пература монотонно возрастает. При изменении тока более чем на порядок величины распределение остается близким к больцмановскому.

Результаты измерений вращательной температуры сведены в табл. 2. Видно, что в пределах ошибок измерений вращательные температуры, найденные по разным ветвям, совпадают. Погрешность здесь связана

с разбросом экспериментальных данных, полученных в разных сериях измерений, и определяется довольно плохой воспроизводимостью условий работы плазматрона в разные дни вследствие неточной установки давления и расхода газа. В каждом отдельном опыте T_{rot}^* , определенная по линиям различных электронно-колебательных полос, несколько убывает с ростом колебательного квантового числа перехода, однако рассмотрение этого обстоятельства выходит за рамки настоящей работы.

Наблюдаемые на опыте распределения интенсивности в P -, Q - и R -ветвях полос системы Фулхера молекулы H_2 и совпадение «вращательных температур», определенных по разным ветвям, показывают, что распределение молекул по вращательным подуровням нижних ($v'=0, 1, 2$) колебательных уровней $3p^3\Pi_u$ -состояния в наших условиях близко к больцмановскому. Полученные результаты подтверждают внутреннюю согласованность данных табл. 1 и возможность их использования для измерения «вращательной температуры» $3p^3\Pi_u$ -состояния молекулярного водорода.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность С. Э. Фришу за полезные советы и внимание к работе, а также М. П. Грязневичу, И. Г. Копытко и Э. И. Спирину за помощь в создании экспериментальной установки.

Литература

- [1] Сб. «Методы исследования плазмы» (под ред. В. Лохте—Хольтгревена). «Мир», М., 1971.
- [2] Г. Герцберг. Спектры и строение двухатомных молекул. ИЛ, М., 1949.
- [3] O. W. Richardson. Molecular Hydrogen and Its Spectrum. London, 1934.
- [4] G. H. Dieke. The Hydrogen Molecular Wavelength Tables. N. Y., 1972.
- [5] Л. А. Кузнецова. Усп. физич. наук, 113, 285, 1974.
- [6] I. Sova. Rotational Structure in the Spectra of Diatomic Molecules. Budapest, 1969.
- [7] G. H. Dieke, R. W. Blue. Phys. Rev., 47, 261, 1935.
- [8] Б. П. Лавров, Д. К. Оторбаев. Опт. и спектр., 44, 617, 1978.
- [9] М. А. Аброян, Н. Б. Колоколов, Б. П. Лавров, С. И. Лозовой. Вестн. ЛГУ, № 22, 28, 1974.
- [10] М. М. Гуревич. Введение в фотометрию. «Энергия», М., 1968.

Поступило в Редакцию 20 марта 1978 г.