

Физика плазмы и плазменные методы

УДК 537.924

Диагностика возбужденных частиц в водородной плазме (обзор) Часть I. Спектральный состав излучения, электронные состояния и излучательные характеристики частиц плазмы

В. А. Шахатов, Ю. А. Лебедев

Выполнена первая часть обзора спектральных исследований возбужденных частиц в водородной плазме. Рассмотрены электронные конфигурации молекулы и атомов водорода, атомарные и молекулярные спектры излучения и поглощения. Обсуждаются механизмы фотораспада молекулы водорода и трехчастичной рекомбинации атомов водорода. Приведены излучательные характеристики молекулы водорода. На основе обзора сформирована база данных для обработки спектров водородной низкотемпературной плазмы.

PACS: 52.70.Kz; 52.25.Os; 52.55.Dy; 52.70.-m

Ключевые слова: электронные состояния, излучательные характеристики, молекула, атом, водород, спектр, водородная плазма, фотодиссоциация, базы данных.

Введение

Молекулы водорода, возбужденные на колебательно-вращательные уровни основного $X^1\Sigma_g^+$ и электронных состояний играют важную роль в образовании отрицательного атомарного иона, положительно заряженных атомарных и молекулярных ионов и атомов водорода в водородной низкотемпературной плазме (НТП). Химическая активность водородной НТП повышается с увеличением концентраций и энергии, запасенной во внутренних степенях свободы, возбужденных частиц плазмы. Поступательная температура является важным параметром водородной плазмы. Уровневые коэффициенты скорости подавляющего числа физико-химических процессов с участием возбужденных молекул водорода зависят от поступательной температуры.

Для измерений поступательной температуры, концентраций возбужденных частиц и распре-

ления энергии по внутренним степеням свободы молекулы водорода развиваются контактные и невозмущающие методы диагностики плазмы [1—16]. В исследованиях плазмы предпочитают использовать бесконтактные методы лазерной, эмиссионной и абсорбционной спектроскопии. В спектральных исследованиях водородной НТП основное внимание уделяется:

систематизации электронных конфигураций возбужденных частиц водородной НТП [6, 7, 16, 17—39];

исследованиям спектрального состава излучения [6, 7, 16, 17—23, 25, 27—29, 32, 33, 35, 38] и поглощения излучения [31, 34, 39];

развитию спектральных методов диагностики параметров водородной НТП, определению компонентного состава и распределения энергии по внешним и внутренним степеням свободы частиц, нахождению столкновительно-излучательных характеристик возбужденных частиц [6—8, 10—12, 15, 16, 41—116].

Данная работа представляет собой краткий обзор спектральных исследований возбужденных частиц в водородной плазме. Он состоит из двух частей.

В первой части обзора приведено соответствие различных обозначений синглетных и триплетных состояний молекулы водорода, излучение которых формирует спектр испускания водород-

Шахатов Вячеслав Анатольевич, вед. научный сотрудник.
Лебедев Юрий Анатольевич, заведующий лабораторией.
Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева
Российской академии наук (ИНХС РАН).
Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 29.
Тел. 8 (495) 955-43-24. E-mail: shakhatov@ips.ac.ru

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2014 г.

© Шахатов В. А., Лебедев Ю. А., 2014

ной НТП. Рассмотрены электронные состояния молекулы и атома водорода, необходимые для обработки спектров излучения водородной НТП. Обсуждаются процессы испускания и поглощения излучения в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн колебательно-возбужденными молекулами водорода $H_2(X^1\Sigma_g^+, \nu)$, преддиссоциации молекулы водорода в возбужденных синглетных состояниях $H_2(N^1\Lambda_\sigma, \nu_\Lambda)$ и объемной трехчастичной рекомбинации атомов водорода, которые необходимо привлекать для интерпретации спектров водородной НТП. На основе первой части обзора создана база данных для обработки спектров водородной НТП: электронных состояний молекулы и атома водорода с соответствующими спектроскопическими данными и потенциальными кривыми; измеренных спектров испускания водородной НТП, которые можно использовать при определении спектрального состава водородной плазмы; значений полного сечения и парциальных сечений поглощения. Она содержит подробную кинетическую схему излучательных переходов между синглетными и триплетными состояниями молекулы водорода, а также электронными состояниями атома водорода с соответствующими коэффициентами скоростей столкновительно-излучательных процессов.

Электронные состояния молекулы и атома водорода

На основе теории квантовой механики (правило Вигнера—Витмера) [18, 21] для молекулы водорода допускается существование синглетных и триплетных электронно-возбужденных состояний, сходящихся к границе ионизации 15,38 эВ. При идентификации спектров испускания плазмы используются различные обозначения электронно-возбужденных состояний молекул водорода [6, 7, 16—39]. В настоящей работе приведено соответствие различных обозначений синглетных и триплетных, соответственно, состояний H_2 , излучение которых формирует молекулярный спектр испускания водородной НТП. Результаты представлены в табл. 1 и 2. Для описания молекулярных состояний водорода широкое распространение получили обозначения, приведенные в [6, 7, 16, 18, 21, 25, 27—29, 30, 32—34, 36, 37] в виде $N^{1,3}\Lambda_\sigma, \nu_\Lambda$, где N — эффективное главное квантовое число, Λ — квантовое число проекции электронного орбитального момента в направлении линии, соединяющей ядра молекулы водорода; σ обозначает четные g и нечетные u электронные состояния; ν_Λ — квантовое колебательное число электронно-

возбужденного состояния; верхние индексы 1 и 3 — мультиплетность $2S+1$ электронного состояния (S — квантовое число полного спина молекулы водорода). В исследованиях водородной НТП рассматриваются следующие состояния молекулы водорода H_2 с соответствующими порогами возбуждения $\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow Y}$ (Y — возбужденное электронное состояние) из основного электронного состояния $X^1\Sigma_g^+$: 15 колебательных уровней $\nu = 0$ —14 основного электронного состояния $X^1\Sigma_g^+$; 15 синглетных электронно-возбужденных состояний:

$$\begin{aligned}
 &2B^1\Sigma_u^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^1\Sigma_u^+} = 11,37 \text{ эВ}), \\
 &2C^1\Pi_u (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow C^1\Pi_u} = 12,41 \text{ эВ}), \\
 &3B'^1\Sigma_u^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow B'^1\Sigma_u^+} = 13,84 \text{ эВ}), \\
 &3D^1\Pi_u (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow D^1\Pi_u} = 14,13 \text{ эВ}), \\
 &4B''^1\Sigma_u^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow B''^1\Sigma_u^+} = 14,62 \text{ эВ}), \\
 &4D^1\Pi_u (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow D^1\Pi_u} = 14,74 \text{ эВ}), \\
 &2EF^1\Sigma_g^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow EF^1\Sigma_g^+} = 12,42 \text{ эВ}), \\
 &3I^1\Pi_g (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow I^1\Pi_g} = 14,01 \text{ эВ}), \\
 &3H\bar{H}^1\Sigma_g^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow H\bar{H}^1\Sigma_g^+} = 14,14 \text{ эВ}), \\
 &3GK^1\Sigma_g^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow GK^1\Sigma_g^+} = 13,91 \text{ эВ}), \\
 &3J^1\Delta_g (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow J^1\Delta_g} = 14,10 \text{ эВ}), \\
 &4P^1\Sigma_g^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow P^1\Sigma_g^+} = 14,68 \text{ эВ}), \\
 &4O^1\Sigma_g^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow O^1\Sigma_g^+} = 14,75 \text{ эВ}), \\
 &4R^1\Pi_g (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow R^1\Pi_g} = 14,69 \text{ эВ}), \\
 &4S^1\Delta_g (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow S^1\Delta_g} = 14,72 \text{ эВ});
 \end{aligned}$$

а также 12 триплетных электронно-возбужденных состояний:

$$\begin{aligned}
 &2b^3\Sigma_u^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow b^3\Sigma_u^+} = 7,93 \text{ эВ}), \\
 &2c^3\Pi_u (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow c^3\Pi_u} = 11,89 \text{ эВ}), \\
 &2a^3\Sigma_g^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow a^3\Sigma_g^+} = 11,90 \text{ эВ}), \\
 &3e^3\Sigma_u^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow e^3\Sigma_u^+} = 13,36 \text{ эВ}), \\
 &3d^3\Pi_u (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow d^3\Pi_u} = 13,979 \text{ эВ}), \\
 &3h^3\Sigma_g^+ (\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow h^3\Sigma_g^+} = 13,983 \text{ эВ}),
 \end{aligned}$$

- $3g^3\Sigma_g^+$ ($\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow g^3\Sigma_g^+} = 14,00$ эВ),
- $3i^3\Pi_g$ ($\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow i^3\Pi_g} = 14,01$ эВ),
- $4f^3\Sigma_u^+$ ($\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow f^3\Sigma_u^+} = 14,46$ эВ),
- $4k^3\Pi_u$ ($\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow k^3\Pi_u} = 14,68$ эВ),
- $4r^3\Pi_g$ ($\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow r^3\Pi_g} = 14,69$ эВ),
- $4s^3\Delta_g$ ($\Delta\varepsilon_{X^1\Sigma_g^+ \rightarrow s^3\Delta_g} = 14,70$ эВ).

Степень вырождения g_e электронного состояния ($e = N^{1,3}\Lambda_\sigma$) равна $(2-\delta_{0,\Lambda}) \cdot (2 \cdot S + 1)$. Стабильное

синглетное состояние $B^1\Sigma_u^+$ обладает наименьшим порогом возбуждения. Состояние $b^3\Sigma_u^+$ является нестабильным. Состояние $c^3\Pi_u$ лежит по энергии ниже, чем состояние $a^3\Sigma_g^+$. Отсутствуют триплетные состояния с четной симметрией g , расположенные ниже него по энергии возбуждения и на которые правилами отбора разрешен излучательный переход из состояния $c^3\Pi_u$. Это состояние является метастабильным состоянием [37].

Таблица 1

Излучающие синглетные состояния молекулы водорода по данным из [16—18, 23, 28, 30, 33, 34]

Обозн. [17]	Орбиталь	Обозн. [28, 33, 34]			Обозн. [16, 18, 30]		Обозн. [23]	
		Терм	ν'	Прим.	Терм	ν	Терм	ν
							<i>T</i>	
							<i>U</i>	
							<i>X</i>	
							<i>Y</i>	
							<i>V</i>	
	$1s5p\pi$				$D''^1\Pi_u$		$5C$	
	$1s4p\pi$				$D^1\Pi_u$		$4C$	
$4K$	$1s4d\delta$				$S^1\Delta_g$	0	$4F$	
4^1O	$1s4s\sigma$				$O^1\Sigma_g^+$	0	$4A$	
N	$1s4d\pi$				$R^1\Pi_g$		$4E$	
4^1E	$1s4d\sigma$				$P^1\Sigma_g^+$	0	$4D$	
4^1K					$T^1\Sigma_g^+$	0		
	$1s4p\sigma$				$B''^1\Sigma_u^+$		$4B$	
			4		$N^1\Sigma_g^+$		W	1
			6			2		2
					$U^1\Sigma_g^+$	0		
					$M^1\Sigma_g^+$			
					$L^1\Sigma_g^+$			
3^1O	$1s3s\sigma$				$H^1\Sigma_g^+$		$3A$	0,1,2
	$1s3p\pi$				$D^1\Pi_u$		$3C$	0,1,2
M	$1s3d\delta$				$J^1\Delta_g$		$3F$	0,1,2,3
L	$1s3d\pi$	$I^1\Pi_g$	0,1	<i>Q</i> -ветвь, $J = 1$	$I^1\Pi_g$	2	$3E$	0,1
				$J = 1$	$I^1\Pi_g$	3		2
					$I^1\Pi_g$	2		3
					$I^1\Pi_g$	3		2
					$I^1\Pi_g$	3		3
3^1C	$1s3d\sigma$		1,2,3	<i>P</i> - и <i>R</i> -ветви, $J = 1$	$G^1\Sigma_g^+$	0,1	$3D$	0,1,2
			5	$J = 0$		2		2
			7	$J = 0$		3		3
3^1K		$GK^1\Sigma_g^+$	0		$K^1\Sigma_g^+$	0	Z	0
			22			1		1
			26			2		2
					$Q^1\Pi_g$			
	$1s3p\sigma$				$B^1\Sigma_u^+$		$3B$	0,1,2,3,4
	$(2p\sigma)^2$				$F^1\Sigma_g^+$		$2K$	2,3,4,5,6
Q	$1s2s\sigma$	$E, F^1\Sigma_g^+$			$E^1\Sigma_g^+$	2	$2A$	0,1,4
				6		3		2
				9				3
	$1s2p\pi$				$C^1\Pi_u$		$2C$	
B	$1s2p\sigma$	$B^1\Sigma_u^+$			$B^1\Sigma_u^+$		$2B$	0,1,2,3,4, 5,6,7,8,9
A	$1s1s\sigma$				$X^1\Sigma_g^+$		$1A$	

Таблица 2

Излучающие триплетные состояния молекулы водорода по данным из [16, 18, 23, 30]

Обозн.	Орбиталь	Обозн. [16, 18, 30]	Обозн. [23]
	1s7pπ		7c
u	1s6pπ	$u^3\Pi_u$	
t	1s5fσ	$t^3\Sigma_u^+$	
q	1s5dσ	$q^3\Sigma_g^+$	
u	1s6pπ	$u^3\Pi_u$	6c
n	1s5pπ	$n^3\Pi_u$	5c
m	1s4fσ	$m^3\Sigma_u^+$	
s	1s4dδ	$s^3\Delta_g$	4f
r	1s4dπ	$r^3\Pi_g$	4e
p	1s4dσ	$p^3\Sigma_g^+$	4d
v		$v^3\Pi_g$	
k	1s4pπ	$k^3\Pi_u$	4c
f	1s4pσ	$f^3\Sigma_u^+$	4b
o		$o^3\Sigma_u^+$	
l		$l^3\Pi_u$	
j	1s3dδ	$j^3\Delta_g$	3f
i	1s3dπ	$i^3\Pi_g$	3e
h	1s3sσ	$h^3\Sigma_g^+$	3a
g	1s3dσ	$g^3\Sigma_g^+$	3d
d	1s3pπ	$d^3\Pi_u$	3c
e	1s3pσ	$e^3\Sigma_u^+$	3b
a	1s2sσ	$a^3\Sigma_g^+$	2a
c	1s2pπ	$c^3\Pi_u$	2c
b	1s2pσ	$b^3\Sigma_u^+$	
g	2Lnλ		g
w	2Lnλ		w
u	2Lnλ		u

Для описания стационарных (связанных) состояний $nl - {}^{2S+1}L_J$ атома водорода используется следующий набор квантовых чисел (см. [21, 22, 26, 27, 31, 37, 39]): главное квантовое число n ; квантовое число момента количества движения электрона L (без учета спина электрона); квантовое число полного момента количества движения электрона J ; квантовое число проекции полного момента количества движения электрона M_{Jz} . Символ l идентифицирует состояние электрона. Верхний индекс $2S + 1$ является мультиплетностью электронного состояния атома водорода (для рассматриваемых состояний $2S + 1 = 2$).

При интерпретации спектрального состава излучения водородной НТП рассматриваются 32 электронные состояния: основное электронное состояние $1s - {}^2S_{1/2}$, электронно-возбужденное метастабильное состояние $2s - {}^2S_{1/2}$ и электронно-возбужденные состояния $2p - {}^2P_{1/2}$, $2p - {}^2P_{3/2}$, $3s - {}^2S_{1/2}$, $3p - {}^2P_{1/2}$, $3p - {}^2P_{3/2}$, $3d - {}^2D_{3/2}$,

$3d - {}^2D_{5/2}$, $4s - {}^2S_{1/2}$, $4p - {}^2P_{1/2}$, $4p - {}^2P_{3/2}$, $4d - {}^2D_{3/2}$, $4d - {}^2D_{5/2}$, $4f - {}^2F_{5/2}$, $4f - {}^2F_{7/2}$, $5s - {}^2S_{1/2}$, $5p - {}^2P_{1/2}$, $5p - {}^2P_{3/2}$, $5d - {}^2D_{3/2}$, $5d - {}^2D_{5/2}$, $5f - {}^2F_{5/2}$, $5f - {}^2F_{7/2}$, $5g - {}^2G_{7/2}$, $6s - {}^2S_{1/2}$, $6p - {}^2P_{1/2}$, $6p - {}^2P_{3/2}$, $6d - {}^2D_{3/2}$, $6d - {}^2D_{5/2}$, $6f - {}^2F_{5/2}$, $6f - {}^2F_{7/2}$.

Степень вырождения g_J электронного состояния с заданным квантовым числом J равна $2J + 1$.

На основании систематизации электронных конфигураций молекулы и атома водорода в базу данных для обработки спектров водородной НТП включены:

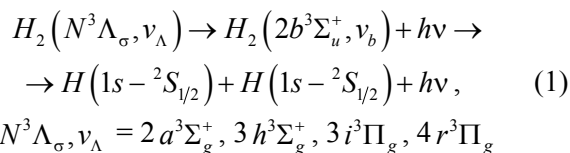
перечисленные выше электронные конфигурации возбужденных состояний молекул и атомов водорода [6, 7, 16, 18, 21, 25, 27—30, 32—34, 36, 37]; спектроскопические константы электронно-возбужденных состояний молекулы [30, 36] и атома [39] водорода;

потенциальные кривые возбужденных состояний молекул водорода [25, 27, 36, 37].

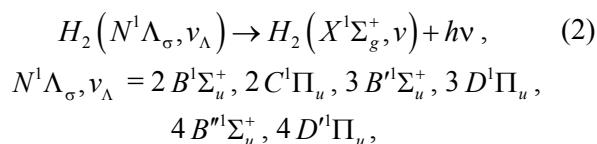
Спектры водородной НТП.

Фотодиссоциация молекулы водорода

Дискретный спектр испускания молекулы водорода наблюдается в широком спектральном диапазоне от 50 нм до 2870 нм [23]: в межзвездном газе [18, 21, 117]; в газовых разрядах в водороде [6—8, 10, 16, 20, 41, 42, 44, 46—49, 51—61, 63—65, 67, 69, 71—75, 77—116], в водородосодержащих смесях (например, в [118]) и в водяном паре [6, 7, 16, 18, 20, 21]; в разрядных камерах с металлическими электродами, которые поглощают водород [20] и т. д. Электрические дипольные переходы из связанных триплетных высокорасположенных состояний в неустойчивое нижнее состояние $b^3\Sigma_u^+$ молекулы водорода



приводят к возникновению сплошного спектра испускания в диапазоне длин волн от 165 нм до 500 нм. Согласно правилам отбора [16, 18, 20, 21], дискретный спектр излучения молекулы водорода представлен переходами между синглетными



$$H_2(N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(2B^1\Sigma_u^+, \nu_B) + h\nu, \quad (3)$$

$$N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 2EF^1\Sigma_g^+, 3I^1\Pi_g, 3H\bar{H}^1\Sigma_g^+, 3GK^1\Sigma_g^+, \\ 4P^1\Sigma_g^+, 4O^1\Sigma_g^+,$$

$$H_2(N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(2C^1\Pi_u, \nu_C) + h\nu, \quad (4)$$

$$N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 2EF^1\Sigma_g^+, 3I^1\Pi_g, 3H\bar{H}^1\Sigma_g^+, 3GK^1\Sigma_g^+, \\ 3J^1\Delta_g, 4P^1\Sigma_g^+, 4O^1\Sigma_g^+, 4R^1\Pi_g, 4S^1\Delta_g,$$

$$H_2(N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(3B'^1\Sigma_u^+, \nu_{B'}) + h\nu, \quad (5)$$

$$N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 3I^1\Pi_g, 3H\bar{H}^1\Sigma_g^+, 3GK^1\Sigma_g^+, \\ 4P^1\Sigma_g^+, 4O^1\Sigma_g^+,$$

$$H_2(N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(3D^1\Pi_u, \nu_D) + h\nu, \quad (6)$$

$$N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 3H\bar{H}^1\Sigma_g^+, 4P^1\Sigma_g^+, 4O^1\Sigma_g^+, \\ 4R^1\Pi_g, 4S^1\Delta_g,$$

$$H_2(N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(4B''^1\Sigma_u^+, \nu_{B''}) + h\nu, \quad (7)$$

$$N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 4P^1\Sigma_g^+, 4O^1\Sigma_g^+,$$

$$H_2(N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(2EF^1\Sigma_g^+, \nu_{EF}) + h\nu, \quad (8)$$

$$N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 3B'^1\Sigma_u^+, 3D^1\Pi_u, 4B''^1\Sigma_u^+,$$

$$H_2(N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(3GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK}) + h\nu, \quad (9)$$

$$N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 3D^1\Pi_u, 4B''^1\Sigma_u^+,$$

$$H_2(N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(4I^1\Pi_g, \nu_I) + h\nu, \quad (10)$$

$$H_2(N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(3J^1\Delta_g, \nu_J) + h\nu, \quad (11)$$

$$N^1\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 3D^1\Pi_u,$$

и триплетными

$$H_2(N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(2c^3\Pi_u, \nu_c) + h\nu, \quad (12)$$

$$N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 2a^3\Sigma_g^+, 3h^3\Sigma_g^+, 3g^3\Sigma_g^+, 3i^3\Pi_g, 4r^3\Pi_g,$$

$$H_2(N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(2a^3\Sigma_g^+, \nu_a) + h\nu, \quad (13)$$

$$N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 3e^3\Sigma_u^+, 3d^3\Pi_u, 4f^3\Sigma_u^+, 4k^3\Pi_u,$$

$$H_2(N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(3e^3\Sigma_u^+, \nu_e) + h\nu, \quad (14)$$

$$N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 3h^3\Sigma_g^+, 3g^3\Sigma_g^+, 3i^3\Pi_g, 4r^3\Pi_g,$$

$$H_2(N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(3d^3\Pi_u, \nu_d) + h\nu, \quad (15)$$

$$N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 3h^3\Sigma_g^+, 3g^3\Sigma_g^+, 3i^3\Pi_g, 4r^3\Pi_g,$$

$$H_2(N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(3h^3\Sigma_g^+, \nu_h) + h\nu, \quad (16)$$

$$H_2(N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(3g^3\Sigma_g^+, \nu_g) + h\nu, \quad (17)$$

$$H_2(N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(3i^3\Pi_g, \nu_i) + h\nu, \quad (18)$$

$$N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 4f^3\Sigma_u^+, 4k^3\Pi_u,$$

$$H_2(N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(4f^3\Sigma_u^+, \nu_f) + h\nu, \quad (19)$$

$$H_2(N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda}) \rightarrow H_2(4k^3\Pi_u, \nu_k) + h\nu, \quad (20)$$

$$N^3\Lambda_{\sigma}, \nu_{\Lambda} = 4r^3\Pi_g,$$

состояниями молекулы водорода [36]. База данных для обработки спектров испускания водородной плазмы включает подробную кинетическую схему из перечисленных выше излучательных переходов (2)—(20).

Особый интерес для оптической диагностики водородной НТП представляет видимая область длин волн. В плазме, в видимой области длин волн, наиболее интенсивный молекулярный спектр излучения наблюдается в интервале $\lambda = 601\text{—}627$ нм. На рис. 1—4 приведены интегральные вдоль оси наблюдения спектры испускания из водородной НТП [7, 16, 103, 111, 116, 118]. Особенность дискретных спектров водородной НТП состоит в том, что из-за большой величины вращательной постоянной отсутствует характерная для спектров «тяжелых» (относительно массы молекулы водорода) двухатомных молекул, полосатая структура: он состоит из большого числа отдельных и спектрально-перекрывающихся электронно-колебательно-вращательных (ЭКВ) линий; ЭКВ-линии обладают малой спектральной шириной. Это создает трудности при записи и идентификации спектров водородной НТП.

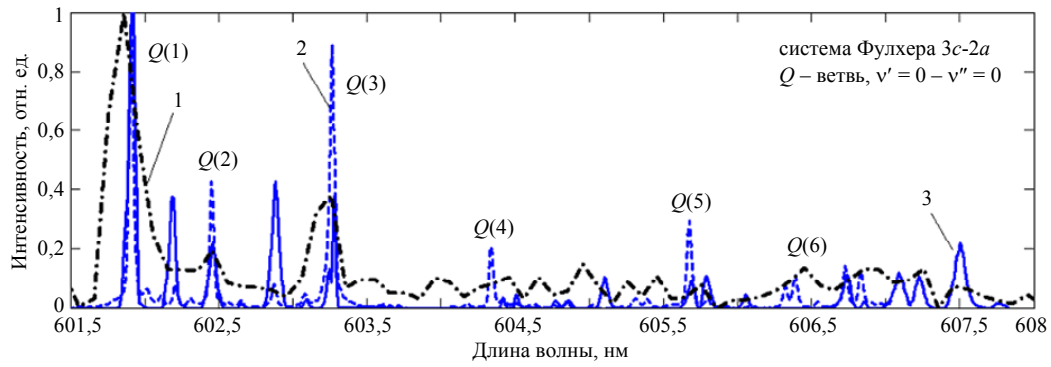


Рис. 1. Спектры излучения водородной НТП в диапазоне длин волн 601—608 нм:

1 — ВЧ-разряд [118], 2 — тлеющий разряд постоянного тока [7, 16], 3 — ВЧ-разряд [111].

Линии Q — ветви системы Фулхера молекулы водорода маркируются в соответствии с вращательными квантовыми числами

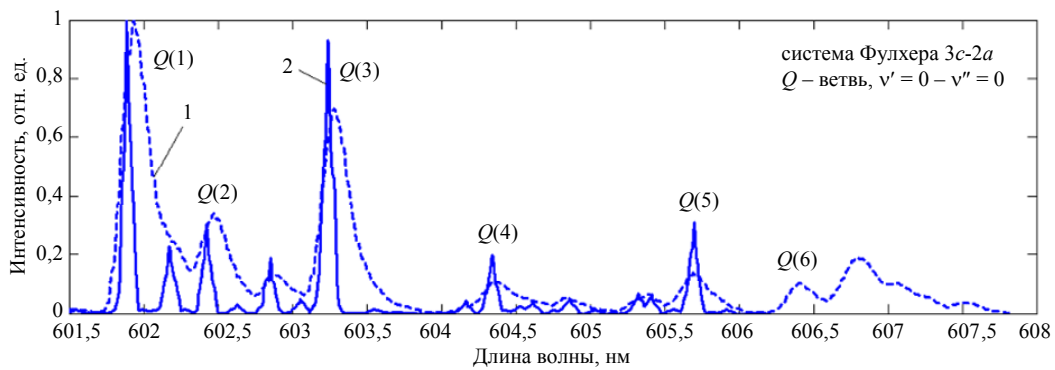


Рис. 2. Спектры излучения водородной НТП в диапазоне длин волн 601—608 нм:

1 и 2 — ВЧ-разряд [116] и [103], соответственно. Линии Q — ветви системы Фулхера молекулы водорода маркируются в соответствии с вращательными квантовыми числами

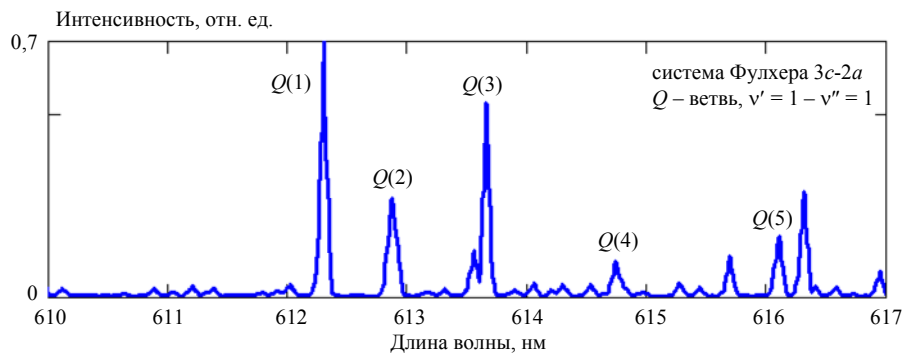


Рис. 3. Спектры излучения ВЧ-разряда в водороде [103] в диапазоне длин волн 610—617 нм.

Линии Q — ветви системы Фулхера молекулы водорода маркируются в соответствии с вращательными квантовыми числами

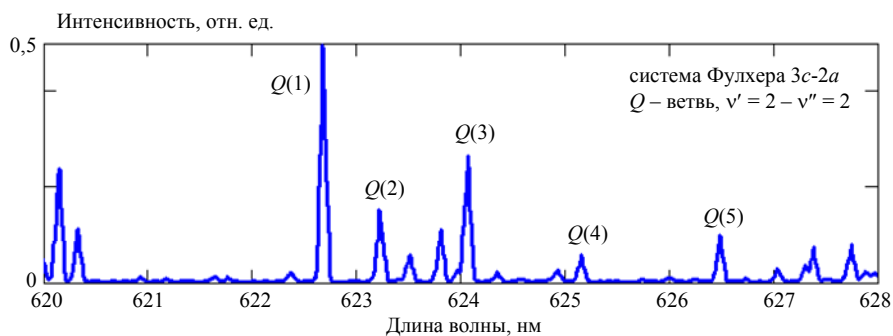


Рис. 4. Спектры излучения ВЧ-разряда в водороде [103] в диапазоне длин волн 620—627 нм.

Линии Q — ветви системы Фулхера молекулы водорода маркируются в соответствии с вращательными квантовыми числами

Для идентификации спектрального состава излучения применяется метод сравнения спектров. Он иллюстрируется на рис. 1 и 2 в диапазоне длин волн 601,5—610 нм. Для применения этого метода созданная база данных содержит эмиссионные спектры водородной НТП. В базу данных водородной НТП включены спектры испускания ВЧ-разряда [103, 111, 116, 118] и положительного столба (ПС) тлеющего разряда постоянного тока (ТРПТ) [7, 16]. Спектральный состав ВЧ-разряда [103, 111, 116, 118] насыщен ЭКВ-линиями синглетных и триплетных переходов молекулы водорода по сравнению со спектрами испускания ПС ТРПТ [7, 16]. Это обусловлено различием значением концентраций электронов и ФРЭЭ в газовых разрядах. ФРЭЭ в ВЧ-разряде [103, 111, 116, 118] и в водородной НТП в условиях электронно-циклотронного резонанса [119—122] при низких давлениях водорода являются бимаксвелловскими. ФРЭЭ в ВЧ-разряде, в отличие от ФРЭЭ в ПС ТРПТ, в диапазоне энергии электронов, в котором расположены пороги возбуждения электронным ударом

синглетных ($N^1\Lambda_{\sigma, v_{\Lambda}}$, 11,4—14,8 эВ) и триплетных ($N^3\Lambda_{\sigma, v_{\Lambda}}$, 6—11 эВ) состояний молекулы водорода, обогащена «горячими» электронами. Процессы ступенчатого возбуждения колебательных уровней основного состояния

$$H_2(X^1\Sigma_g^+, v) + e \rightarrow H_2(X^1\Sigma_g^+, w) + e, \quad (21)$$

электронных состояний

$$H_2(X^1\Sigma_g^+, v) + e \rightarrow H_2(N^{1,3}\Lambda_{\sigma, v_{\Lambda}}) + e, \quad (22)$$

$$H_2(N^{n1,3}\Lambda_{\sigma', v_{\Lambda}'}^n) + e \rightarrow H_2(N^{n1,3}\Lambda_{\sigma', v_{\Lambda}'}^n) + e, \quad (23)$$

молекулы водорода эффективны в разрядах [103, 111, 116, 118, 119—122], поддерживаемых в переменном электромагнитном поле, чем ПС ТРПТ [7, 16] при низких давлениях.

В табл. 3 приведены результаты отождествления зарегистрированных спектров испускания в диапазоне длин 601—627 нм.

Таблица 3

Результаты определения спектрального состава излучения водородной НТП, возбуждаемой в ВЧ-разряде [7, 16, 103, 111, 116, 118—122]

λ , нм	$v^2-v'^2$	Ветвь	Электронный переход	
601,9966	0-0	$Q(1)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
602,0807	1-6	$Q(3) R(2)$	$3E-2B$	$I^1\Pi_g^+-B^1\Sigma_u^+$
602,1024	6-1		$2K-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
602,1963	1-1	$P(1)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
602,2921	1-1	$Q(1)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
602,3900				
602,3966	6-1	$R(0)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
602,5425	0-0	$Q(2)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
602,7390	1-7	$R(0)$	$3A-2B$	$HH^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
602,9647	1-1	$R(2)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
	7-6	$Q(3)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
603,1738	3-3	$R(2)$	$3e-2c$	$i^3\Pi_g-c^3\Pi_u$
	1-1	$P(6)$	$3a-2c$	$h^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
603,3579	0-0	$Q(3)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
604,2716	0-4	$R(3)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
	2-2	$P(3)$	$3e-2c$	$i^3\Pi_g-c^3\Pi_u$
604,4389	0-0	$Q(4)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
604,5028	0-9	$R(0)$	$T-2B$	
604,6030	6-1	$P(1)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
604,9329	0-9	$R(2)$	$4D-2B$	$P^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
	5-0	$R(0)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
605,4038				
605,4925	1-1	$Q(2)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
605,7768	0-0	$Q(5)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
	3-1	$R(1)$	$3E-2C$	$I^1\Pi_g^+-C^1\Sigma_u^+$
606,4303	1-1	$R(4)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
	6-1	$P(2)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
	5-0	$R(3)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
606,4962	1-1	$P(2)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
	1-1	$R(3)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
606,8311	0-0	$P(2)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$

Продолжение табл. 3

λ , нм	$\nu''-\nu'''$	Ветвь	Электронный переход	
606,9353	3-3	$R(3)$	$3e-2c$	$i^3\Pi_g-c^3\Pi_u$
606,9416	1-1	$R(2)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
607,1387	5-0	$P(1)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
607,1649	1-1	$R(4)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
607,3249	3-3	$R(2)$	$3e-2c$	$i^3\Pi_g-c^3\Pi_u$
607,6058	2-2	$P(3)$	$3e-2c$	$i^3\Pi_g-c^3\Pi_u$
	3-1	$R(5)$	$3E-2C$	$I^1\Pi_g^+-C^1\Sigma_u^+$
608,0572	3-3	$R(1)$	$3e-2c$	$i^3\Pi_g-c^3\Pi_u$
608,2466	1-1	$R(1)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
	4-1	$P(1)$	$3b-2a$	$e^3\Sigma_u^+-a^3\Sigma_g^+$
	1-6	$R(0)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
608,6238				
608,7220	6-1	$P(3)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
609,1239	3-0	$P(3)$	$4e-3b$	$r^3\Pi_g-e^3\Sigma_u^+$
609,1499	0-0	$P(4)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
609,1499	0-0	$Q(5)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
609,1499	3-1	$R(1)$	$Z-2C$	$GK^1\Sigma_g^+-C^1\Sigma_u^+$
609,1674				
609,2060	0-0	$Q(7)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
609,7643	0-4	$R(2)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
609,7643	0-0	$P(3)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
609,9923	1-1	$R(0)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
611,0721	0-0	$Q(8)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
611,4476	6-1	$P(4)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
611,4476	0-0	$R(9)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
611,8146	3-1	$R(2)$	$Z-2C$	$GK^1\Sigma_g^+-C^1\Sigma_u^+$
611,8412	1-7	$P(2)$	$W-2B$	$N^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
611,8521	1-1	$P(3)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
611,9944	2-8	$R(2)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
612,3241	0-5	$P(6)$	$3F-2B$	$J^1\Delta_g-B^1\Sigma_u^+$
612,3481	1-1	$Q(1)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
612,8942	1-7	$P(5)$	$W-2B$	$N^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
	1-1	$Q(2)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
612,9344	0-0	$P(4)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
613,2054	8-7	$Q(1)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
613,2346	1-6	$R(2)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
613,5775	0-0	$Q(9)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
613,5982	0-3	$P(5)$	$4f-2c$	$s^3\Delta_g-c^3\Pi_u$
613,5982	2-2	$Q(1)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+-c^3\Pi_u$
613,7093	1-1	$Q(3)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
614,2653	2-2	$R(6)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
614,3487	2-2	$R(5)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
614,7887	0-5	$Q(4)$	$3F-2B$	$J^1\Delta_g-B^1\Sigma_u^+$
	1-1	$Q(4)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
614,8602	2-2	$R(4)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
615,3149	4-1	$P(3)$	$3b-2a$	$e^3\Sigma_u^+-a^3\Sigma_g^+$
615,3206	3-3	$P(3)$	$3e-2c$	$i^3\Pi_g-c^3\Pi_u$
615,3327	0-4	$R(1)$	$V-2B$	
615,7332	2-2	$R(3)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
615,7332	1-1	$P(1)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
615,7332	0-4	$P(6)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
616,0974	0-0	$Q(10)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
616,1270	1-1	$Q(5)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
	2-8	$P(2)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+-B^1\Sigma_u^+$
616,3070	0-1	$P(4)$	$4F-2C$	$S^1\Delta_g-C^1\Sigma_u^+$
616,3309	0-0	$P(5)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
616,9439	2-2	$R(2)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
617,1346	1-1	$P(2)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$
617,1415	3-0	$P(5)$	$4e-3b$	$r^3\Pi_g-e^3\Sigma_u^+$
617,7171	1-1	$Q(6)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u-a^3\Sigma_g^+$

Окончание табл. 3

λ , нм	$\nu-\nu''$	Ветвь	Электронный переход	
617,7618 617,7644	2-2	$P(2)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+ - c^3\Pi_u$
617,7774	0-1	$P(3)$	$4F-2C$	$S^1\Delta_g - C^1\Sigma_u^+$
617,7923	3-3	$P(3)$	$3e-2c$	$i^3\Pi_g - c^3\Pi_u$
617,7973	1-1	$P(4)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+ - c^3\Pi_u$
617,8224	1-4	$Q(1)$	$4e-2c$	$r^3\Pi_g - c^3\Pi_u$
617,8423	4-0	$P(3)$	$3B-2A$	$B^1\Sigma_u^+ - EF^1\Sigma_g^+$
618,4701	2-2	$R(1)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
618,8241	0-0	$Q(11)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
619,5526	1-1	$Q(7)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
619,8629	3-10	$R(1)$	$3E-2B$	$I^1\Pi_g - B^1\Sigma_u^+$
619,8809	2-2	$Q(3)$	$3d-2c$	$g^3\Sigma_g^+ - c^3\Pi_u$
619,8875	1-2	$R(3)$	$4E-2C$	$R^1\Pi_g - C^1\Sigma_u^+$
619,9086	0-1	$Q(1)$	$4E-2C$	$R^1\Pi_g - C^1\Sigma_u^+$
619,9267	1-7	$R(2)$	$3F-2B$	$J^1\Delta_g - B^1\Sigma_u^+$
619,9436	4-1	$P(4)$	$3b-2a$	$e^3\Sigma_u^+ - a^3\Sigma_g^+$
619,9436	0-0	$P(6)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
619,9436	0-3	$Q(2)$	$4f-2c$	$s^3\Delta_g - c^3\Pi_u$
620,1112	1-1	$P(3)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
620,1354	2-9	$P(4)$	$W-2B$	$N^1\Sigma_g^+ - B^1\Sigma_u^+$
620,2901	2-2	$R(0)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
620,2901	1-0	$Q(2)$	$3A-2C$	$HH^1\Sigma_g^+ - C^1\Sigma_u^+$
621,6226	1-1	$Q(8)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
621,7510	0-0	$Q(12)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
622,6466	2-2	$Q(1)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
622,6763	3-10	$Q(3)$	$3E-2B$	$I^1\Pi_g^+ - B^1\Sigma_u^+$
623,1916	2-2	$Q(2)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
623,4729	5-0	$P(6)$	$Z-2B$	$GK^1\Sigma_g^+ - B^1\Sigma_u^+$
623,4729	1-1	$P(4)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
623,7459	2-2	$Q(4)$		
623,7646	0-0	$P(7)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
623,9183	1-1	$Q(9)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
623,9852	2-1	$Q(3)$	$X-2C$	
624,0117	2-2	$Q(3)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
624,2653	1-5	$R(3)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
624,3222	9-8	$Q(1)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
624,7606	9-8	$Q(1)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
624,8278	4-1		$3b-2a$	$e^3\Sigma_u^+ - a^3\Sigma_g^+$
624,8422	0-3		$4e-2c$	$r^3\Pi_g - c^3\Pi_u$
624,8629	3-1		$3E-2C$	$I^1\Pi_g - C^1\Sigma_u^+$
624,8680	0-0		$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
625,0887	2-2	$Q(4)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
626,0185	3-3	$R(3)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
626,4228	1-1	$Q(10)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$
626,4228	2-2	$Q(5)$	$3c-2a$	$d^3\Pi_u - a^3\Sigma_g^+$

В диапазоне длин волн $\lambda = 601-606$ нм в спектре излучения водородной НТП (рис. 1 и 2) наблюдаются: Q -, P - и R -ветви триплетных $H_2(d^3\Pi_u, \nu_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, \nu_a)$, $H_2(g^3\Sigma_g^+, \nu_g \rightarrow c^3\Pi_u, \nu_c)$, $H_2(i^3\Pi_g, \nu_i \rightarrow c^3\Pi_u, \nu_c)$, $H_2(h^3\Sigma_g^+, \nu_h \rightarrow c^3\Pi_u, \nu_c)$ и синглетных $H_2(I^1\Pi_g, \nu_I \rightarrow B^1\Sigma_u^+, \nu_B)$, $H_2(HH^1\Sigma_g^+, \nu_{HH} \rightarrow B^1\Sigma_u^+, \nu_B)$, $H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK} \rightarrow B^1\Sigma_u^+, \nu_B)$, $H_2(T \rightarrow 2B)$, $H_2(P^1\Sigma_g^+, \nu_P \rightarrow B^1\Sigma_u^+, \nu_B)$ систем молекулы водорода. В спектрах наиболее интенсивные ЭКВ-линии соответствуют Q -ветви ($Q(1)$,

$Q(2)$, $Q(3)$, $Q(4)$ и $Q(5)$) секвенции $\Delta\nu = 0$ α — системы Фулхера молекулы водорода $H_2(d^3\Pi_u, \nu_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, \nu_a)$. Линии $Q(5)$ и $R(1)$, относящиеся переходам (0-0) системы $H_2(d^3\Pi_u, \nu_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, \nu_a)$ и (3-1) системы $H_2(I^1\Pi_g, \nu_I \rightarrow B^1\Sigma_u^+, \nu_B)$, соответственно, спектрально переналагаются. Интенсивность линии $Q(5)$ больше, чем интенсивность линии $R(1)$. Спектральное переналажение линий не приводит к заметному искажению интенсивности линии $Q(5)$.

В диапазоне длин волн $\lambda = 606\text{--}617$ нм спектральный состав излучения водородной НТП (рис. 3) состоит из: Q -, P - и R -ветвей триплетных $H_2(d^3\Pi_u, v_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, v_a)$, $H_2(g^3\Sigma_g^+, v_g \rightarrow c^3\Pi_u, v_c)$, $H_2(i^3\Pi_g, v_i \rightarrow c^3\Pi_u, v_c)$, $H_2(e^3\Sigma_u^+, v_e \rightarrow a^3\Sigma_g^+, v_a)$, $H_2(r^3\Pi_g, v_r \rightarrow e^3\Sigma_u^+, v_e)$, $H_2(s^3\Delta_g, v_g \rightarrow c^3\Pi_u, v_c)$ и синглетных $H_2(I^1\Pi_g, v_I \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$, $H_2(GK^1\Sigma_g^+, v_{GK} \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$, $H_2(GK^1\Sigma_g^+, v_{GK} \rightarrow C^1\Pi_u, v_C)$, $H_2(N^1\Sigma_g^+, v_N \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$, $H_2(J^1\Delta_g, v_J \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$, $H_2(V \rightarrow 2B)$, $H_2(S^1\Delta_g, v_S \rightarrow C^1\Pi_u, v_C)$ систем молекулы водорода. В данном диапазоне длин волн интенсивные ЭКВ линии соответствуют Q -ветви ($Q(1)$, $Q(2)$, $Q(3)$, $Q(4)$ и $Q(5)$) секвенции $\Delta v = 1$ α — системы Фулхера $H_2(d^3\Pi_u, v_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, v_a)$. Интенсивности линий $Q(2)$, $Q(4)$ и $Q(5)$ перехода (1-1) системы $H_2(d^3\Pi_u, v_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, v_a)$ могут искажаться вследствие их спектрального переналожения с линиями $P(5)$, $Q(4)$ и $P(2)$ переходов (1-7) системы $H_2(N^1\Sigma_g^+, v_N \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$, (0-5) системы $H_2(J^1\Delta_g, v_J \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$ и (2-8) системы $H_2(GK^1\Sigma_g^+, v_{GK} \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$, соответственно. В чередовании интенсивностей, наблюдаемых в спектре излучения плазмы на длинах волн 612,8942 нм $Q(2)$, 614,7887 нм $Q(4)$ и 616,1270 нм $Q(5)$ (табл. 3), наибольший вклад дают переходы системы $H_2(d^3\Pi_u, v_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, v_a)$.

В диапазоне длин волн $\lambda = 617\text{--}627$ нм спектр испускания водородной НТП (рис. 4) включает: Q -, P - и R -ветвей триплетных $H_2(d^3\Pi_u, v_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, v_a)$, $H_2(r^3\Pi_g, v_r \rightarrow e^3\Sigma_u^+, v_e)$, $H_2(g^3\Sigma_g^+, v_g \rightarrow c^3\Pi_u, v_c)$, $H_2(r^3\Pi_g, v_r \rightarrow c^3\Pi_u, v_c)$, $H_2(e^3\Sigma_u^+, v_e \rightarrow a^3\Sigma_g^+, v_a)$, $H_2(s^3\Delta_g, v_g \rightarrow c^3\Pi_u, v_c)$, и синглетных $H_2(B^1\Sigma_u^+, v_B \rightarrow EF^1\Sigma_g^+, v_{EF})$, $H_2(I^1\Pi_g, v_I \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$, $H_2(R^1\Pi_g, v_R \rightarrow C^1\Pi_u, v_C)$, $H_2(J^1\Delta_g, v_J \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$, $H_2(W, v_W \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$, $H_2(H\bar{H}^1\Sigma_g^+, v_H \rightarrow C^1\Pi_u, v_C)$, $H_2(GK^1\Sigma_g^+, v_{GK} \rightarrow B^1\Sigma_u^+, v_B)$, $H_2(I^1\Pi_g, v_H \rightarrow C^1\Pi_u, v_C)$ систем молекулы водорода. В данном диапазоне длин волн интенсивными ЭКВ линиями являются линии Q -ветви ($Q(1)$, $Q(2)$, $Q(3)$, $Q(4)$ и $Q(5)$) секвенции $\Delta v = 2$ системы α — системы Фулхера $H_2(d^3\Pi_u, v_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, v_a)$. Линии $Q(5)$ и $Q(10)$, относящиеся переходам (2-2) и (0-0) системы

$H_2(d^3\Pi_u, v_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, v_a)$, соответственно, спектрально переналагаются. Поскольку, в разряде наблюдаются линии, у которых квантовое число углового момента J' не превышает 5, то спектральное переналожение этих линий не приводит к заметному искажению интенсивности линии $Q(5)$.

ЭКВ-линии Q -ветвей ($Q(1)$, $Q(2)$, $Q(3)$, $Q(4)$ и $Q(5)$) секвенции $\Delta v = 0$, 1 и 2 α — системы Фулхера $H_2(d^3\Pi_u, v_d \rightarrow a^3\Sigma_g^+, v_a)$ следует использовать для исследования функций распределения по вращательным (ФРВУ) и колебательным (ФРКУ) уровням молекулы водорода в возбужденном состоянии $d^3\Pi_u$ методом относительных интенсивностей. Использование других систем молекулы водорода, наблюдаемых в видимой области длин волн, затруднено из-за недостаточности данных о зависимостях излучательных характеристик переходов от квантовых чисел [71, 86, 92—94, 98, 106].

В спектре водородной НТП также присутствуют интенсивные атомные линии водорода. Спектр атомного водорода формируется в результате электрических дипольных переходов между верхними состояниями Y' и нижними состояниями Y''

$$H(Y') \rightarrow H(Y'') + h\nu, \quad (24)$$

которые образуют серии [39]:

1. Бальмера на длине волны 656,28 нм (H_α): излучательные переходы $Y'' = 2l'' - 2L''_j \rightarrow Y' = 3l' - 2L'_j$ ($l'' = s, p - l' = s, p, d, L'' = S, P - L' = S, P, D$).

2. Бальмера на длине волны 486,13 нм (H_β): излучательные переходы $Y'' = 2l'' - 2L''_j \rightarrow Y' = 4l' - 2L'_j$ ($l'' = s, p - l' = s, p, d, L'' = S, P - L' = S, P, D$).

3. Пашена на длине волны 187,51 нм: излучательные переходы $Y'' = 3l'' - 2L''_j \rightarrow Y' = 4l' - 2L'_j$ ($l'' = s, p - l' = s, p, d, f, L'' = S, P, D - L' = S, P, D, F$).

4. Бальмера на длине волны 434,05 нм (H_γ): излучательные переходы $Y'' = 2l'' - 2L''_j \rightarrow Y' = 5l' - 2L'_j$ ($l'' = s, p - l' = s, p, d, L'' = S, P - L' = S, P, D$).

5. Пашена на длине волны 128,18 нм: излучательные переходы $Y'' = 3l'' - 2L''_j \rightarrow Y' = 5l' - 2L'_j$ ($l'' = s, p, d - l' = s, p, d, f, L'' = S, P, D - L' = S, P, D, F$).

6. Брекета на длине волны 405,11 нм: излучательные переходы $Y'' = 4l'' - 2L''_j \rightarrow Y' = 5l' - 2L'_j$

($l'' = s, p, d, f - l' = s, p, d, f, g, L'' = S, P, D, F - L' = S, P, D, F, G$).

7. Бальмера на длине волны 410,17 нм (H_{σ}):

излучательные переходы $Y'' = 2l'' - {}^2L''_{j''} \rightarrow Y' = 6l' - {}^2L'_{j'}$ ($l'' = s, p - l' = s, p, d, L'' = S, P - L' = S, P, D$).

8. Пашена на длине волны 109,38 нм: излучательные переходы $Y'' = 3l'' - {}^2L''_{j''} \rightarrow Y' = 6l' - {}^2L'_{j'}$ ($l'' = s, p, d - l' = s, p, d, f, L'' = S, P, D - L' = S, P, D, F$).

9. Брекета на длине волны 265,21 нм: излучательные переходы $Y'' = 4l'' - {}^2L''_{j''} \rightarrow Y' = 6l' - {}^2L'_{j'}$ ($l'' = s, p, d, f - l' = s, p, d, f, g, L'' = S, P, D, F - L' = S, P, D, F, G$).

10. Пфунда на длине волны 745,78 нм: излучательные переходы $Y'' = 5l'' - {}^2L''_{j''} \rightarrow Y' = 6l' - {}^2L'_{j'}$ ($l'' = s, p, d, f, g - l' = s, p, d, f, g, L'' = S, P, D, F, G - L' = S, P, D, F, G$).

База данных обработки атомных спектров водородной плазмы включает подробную кинетическую схему из перечисленных выше серий атома водорода. Она содержит также переходы между электронно-возбужденными и основным состояниями атомного водорода

$$H(Y') \rightarrow H(1s - {}^2S_{1/2}) + h\nu, \quad (25)$$

$$Y' = n'l' - {}^2L'_{j'}, \quad n' = 2, 3, 4, 5, 6, \\ l' = p, L' = P,$$

которые формируют серии Лаймана на длинах волн 121,57, 102,58, 97,25, 94,97 и 93,78 нм [39].

Интенсивные ЭКВ-линии спектров поглощения H_2 наблюдаются в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн ($\lambda < 110$ нм) [31, 34, 40]. Линии поглощения H_2 , как и линии испускания, характеризуются малой спектральной шириной $\Delta\lambda_{1/2}$ (например, на $\lambda = 100$ нм $\Delta\lambda_{1/2} < 5 \cdot 10^{-3}$ нм). Значения сечения поглощения излучения молекулой водорода можно найти в [123]. С ростом давления газа спектральная ширина линий поглощения увеличивается в результате преддиссоциации возбужденных состояний $2C^1\Pi_u$, $3D^1\Pi_u$ и $4D^1\Pi_u$ молекулы водорода [124]. Поглощение излучения невозбужденной молекулой водорода $H_2(X^1\Sigma_g^+, v=0, J=0)$ приводит к образованию молекулы водорода в синглетных состояниях $2C^1\Pi_u$, $3D^1\Pi_u$ и $4D^1\Pi_u$ с последующим их распадом на атомы водорода в основном $1s - 2S_{1/2}$ и возбужденных $2s - 2S_{1/2}$, $2p - 2P_{1/2}$, $2p - 2P_{3/2}$

состояниях [125]. Кинетика продуктов фотораспада (фотодиссоциации) молекулы водорода через синглетные состояния [126]

$$H_2(X^1\Sigma_g^+, v=0, J=0) + h\nu \rightarrow H(1s - 2S_{1/2}) + H(2s - 2S_{1/2}), \quad (26)$$

$$H_2(X^1\Sigma_g^+, v=0, J=0) + h\nu \rightarrow H(1s - 2S_{1/2}) + H(2p - 2P_{1/2}), \quad (27)$$

$$H_2(X^1\Sigma_g^+, v=0, J=0) + h\nu \rightarrow H(1s - 2S_{1/2}) + H(2p - 2P_{3/2}), \quad (28)$$

определяется столкновительно-излучательными процессами

$$H(2s - 2S_{1/2}) + H_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow H(2p - 2P_{1/2}) + H_2(X^1\Sigma_g^+), \quad (29)$$

$$K = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{сек} [123],$$

$$H(2s - 2S_{1/2}) + H_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow H(2p - 2P_{3/2}) + H_2(X^1\Sigma_g^+), \quad (30)$$

$$K = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{сек} [123],$$

$$H(2p - 2P_{3/2}) \rightarrow H(1s - 2S_{1/2}) + h\nu, \quad (31)$$

$$H(2p - 2P_{1/2}) \rightarrow H(1s - 2S_{1/2}) + h\nu, \quad (32)$$

$$H(2s - 2S_{1/2}) + H_2(X^1\Sigma_g^+) \rightarrow H(1s - 2S_{1/2}) + H_2(X^1\Sigma_g^+), \quad (33)$$

$$K = 0,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3/\text{сек} [123],$$

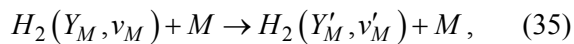
а также реакцией трехчастичной рекомбинации. Механизм реакции рекомбинации $H(1s - 2S_{1/2})$ и $H(2s - 2S_{1/2})$, $H(2p - 2P_{1/2})$ и $H(2p - 2P_{3/2})$ предложен в [31]. Он включает:

стадию присоединения (ассоциации) атомов

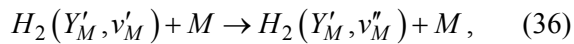
$$H(1s - 2S_{1/2}) + H(Y_{at}) \rightarrow H_2(Y_M, v_M), \quad (34)$$

$$Y_{at} = 2s - 2S_{1/2}, 2p - 2P_{1/2}, 2p - 2P_{3/2}, \\ Y_M = B^1\Sigma_u^+, C^1\Pi_u, B^1\Sigma_u^+,$$

процессы тушения

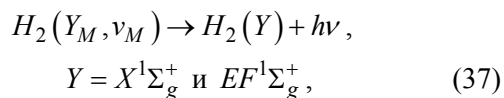


и колебательной релаксации

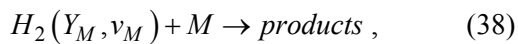


синглетных состояний $Y'_M = B^1\Sigma_u^+$, $C^1\Pi_u$ и $B^1\Sigma_u^+$,

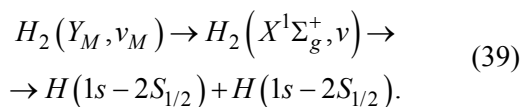
процессы радиационного



и столкновительного распада



процессы диссоциации через колебательный континуум



Здесь M обозначает частицу плазмообразующего газа. Вероятности излучательных переходов можно найти в [36, 39]. Значения коэффициентов скоростей столкновительных процессов можно оценить на основе моделей и выражений, приведенных в [67, 127].

Процесс поглощения излучения молекулой водорода приводит к возникновению в вакуумном и ближнем ультрафиолетовом, а также в видимом диапазонах длин волн спектров испускания молекулы водорода [128, 129]. В ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах длин волн спектр обусловлен электрическими дипольными переходами из синглетных состояний $^1\Pi_u$ и $^1\Sigma_u^+$ молекулы водорода в состояния $EF^1\Sigma_g^+$, $GK^1\Sigma_g^+$ и $HH^1\Sigma_g^+$ [36]. Синглетные состояния $^1\Pi_u$ и $^1\Sigma_u^+$ заселяются в результате поглощения излучения молекулой водорода в основном состоянии $X^1\Sigma_g^+$.

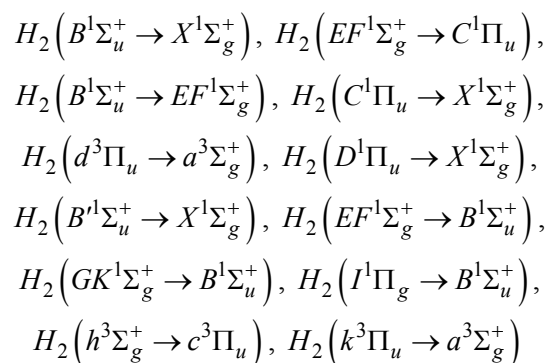
В вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн спектр излучения представлен электрическими дипольными переходами из состояний $^1\Pi_u$ и $^1\Sigma_u^+$ в основное состояние $X^1\Sigma_g^+$ [36]. Процессы поглощения излучения в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн $H_2(X^1\Sigma_g^+, v)$,

преддиссоциации $H_2(N^1\Lambda_{\sigma}, v_{\Lambda})$ и объемной трехчастичной рекомбинации атомов водорода играют важную роль в кинетике синглетных состояний $N^1\Lambda_{\sigma}, v_{\Lambda}$. В базу данных для обработки спектров излучения водородной НТП включены механизмы фотораспада молекулы водорода и объемной трехчастичной рекомбинации атомов водорода с соответствующими полным сечением [123] и парциальным сечением поглощения [126], коэффициентами скоростей столкновительно-излучательных процессов [67, 127].

Излучательные характеристики возбужденных атомов и молекул водорода

Излучательные характеристики (излучательные вероятности, сила осцилляторов в поглощении переходов и т. д.) электрических дипольных переходов между электронными состояниями атома водорода приведены в работах [16, 19, 21, 22, 24, 25, 27, 31, 37, 39]. В базе данных для обработки атомарных спектров водородной НТП используются наиболее подробные данные из [39].

Важными излучательными характеристиками электрических дипольных переходов между электронными состояниями молекулы водорода являются излучательные вероятности и моменты электронных переходов, факторы Франко-Кондона и т. д. Обзор данных по измерениям и расчетам факторов Франка—Кондона, центроид, моментов электронных и вероятностей излучательных переходов систем



приведены в [16, 66, 70]. В [71, 86, 92—94, 98, 106] приведены результаты систематических исследований излучательных характеристик триплетных $e^3\Sigma_u^+$ ($v_e = 1—3$), $d^3\Pi_u^-$ ($v_d = 0, 2, 3$), $d^3\Pi_u^+$ ($v_d = 0$ и 2), $k^3\Pi_u^-$ ($v_k = 0$ и 1), $i^3\Pi_g$, $j^3\Delta_g$ и синглетных $D^1\Pi_u^-$ ($v_D = 0$ и 1), $J^1\Delta_g^-$, $I^1\Pi_g$, $GK^1\Sigma_g^+$ состояний молекулы водорода для получения излучательных характеристик, необходимых для диагностики водородной НТП [64, 75]: исследована

возможность диагностики поступательной температуры в водородной НТП низкого давления по интенсивностям полос систем

$$H_2(i^3\Pi_g^- \rightarrow c^3\Pi_u^\pm), H_2(j^3\Delta_g^- \rightarrow c^3\Pi_u^\pm),$$

$$H_2(I^1\Pi_g^- \rightarrow C^1\Pi_u^\pm), H_2(J^1\Delta_g^- \rightarrow C^1\Pi_u^\pm);$$

определены абсолютные значения вероятностей ЭКВ-переходов системы $H_2(I^1\Pi_g^- \rightarrow B^1\Sigma_u^+)$, а также значения вращательных коэффициентов ветвления [92, 94, 106]; исследованы возмущения в вероятностях спонтанных переходов системы $H_2(GK^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^1\Sigma_u^+)$ и определены значения вращательных коэффициентов ветвления, относительных вероятностей спонтанных переходов системы $H_2(GK^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^1\Sigma_u^+)$ [98, 106]. Подробные данные о значениях факторов Франка—Кондона для молекулярного водорода, полученных в результате расчетов, приведены в [36]. Они включены в базу данных для обработки молекулярных спектров испускания плазмы, а также определения уровневых сечений и коэффициентов скоростей возбуждения электронных триплетных и синглетных состояний молекулы водорода электронным ударом.

Особый интерес для диагностики и теоретических исследований кинетики возбужденных молекул водорода представляют данные об излучательных вероятностях переходов и времени жизни синглетных состояний молекулы водорода. В исследованиях предпочтение отдается экспериментальным значениям времени жизни электронных состояний молекулы водорода, излучательных вероятностей переходов. В таблицах 4 и 5 приведены экспериментальные значения излучательных

вероятностей переходов $A_{e' \rightarrow e''}$ и $A_{e' \rightarrow e''}(v)$ между ЭКВ-состояниями и времена жизни $\tau_{e'}$ возбужденных состояний молекулы водорода по данным [7, 16, 28, 33, 34, 36, 56, 57, 59, 61, 66, 74, 77, 78, 84, 130—133]. В таблице 4 указаны диапазоны длин волн, в пределах которых наблюдаются системы $H_2(N^1\Lambda_u \rightarrow X^1\Sigma_g^+)$ ($N^1\Lambda_u = 2B^1\Sigma_u^+, 2C^1\Pi_u, 3B^1\Sigma_u^+, 3D^1\Pi_u$ и $4B^1\Sigma_u^+$). Значения излучательных вероятностей заметно различаются с изменением колебательного и вращательного номера [28, 33, 34]. Различие в значениях может превышать коэффициент 2. Данные таблиц 4 и 5 ставят под сомнение справедливость использования адиабатического приближения в расчетах излучательных характеристик электронных состояний $EF^1\Sigma_g^+, GK^1\Sigma_g^+$ и $I^1\Pi_g$: значения излучательных вероятностей и времена жизни зависят от номера колебательного и вращательного уровня. Это необходимо учитывать при спектральной диагностике водородной НТП по системам $H_2(EF^1\Sigma_g^+ \rightarrow N^1\Lambda_u), H_2(GK^1\Sigma_g^+ \rightarrow N^1\Lambda_u)$ и $H_2(I^1\Pi_g \rightarrow N^1\Lambda_u)$. Эти данные составляют базу данных излучательных характеристик возбужденных молекул водорода полуэмпирической столкновительно-излучательной модели атомно-молекулярной водородной НТП. При обработке спектров водородной НТП используются данные, полученные в [36]. Они по порядку величины согласуются с данными [28, 33, 34] и являются наиболее полными, чтобы определить значения интегральных $A_{e' \rightarrow e''}$ и уровневых $A_{e' \rightarrow e''}(v)$ излучательных вероятностей переходов, которые можно использовать при моделировании кинетических процессов в водородной НТП.

Таблица 4

Излучательные характеристики молекулы водорода (синглетные состояния)

№	Процесс	Диапазон длин волн λ (нм) и вероятность A (сек ⁻¹) излучения, ссылки
1	$H_2(B^1\Sigma_u^+, v_B) \rightarrow H_2(X^1\Sigma_g^+, v) + h\nu$	$A_{B \rightarrow X} = 1,87 \times 10^9, \lambda = 92—182$ $A_{B \rightarrow X}(v=0) = 6,26 \times 10^7,$ $A_{B \rightarrow X}(v=1) = 1,21 \times 10^8,$ $A_{B \rightarrow X}(v=2) = 1,59 \times 10^8,$ $A_{B \rightarrow X}(v=3) = 1,76 \times 10^8,$ $A_{B \rightarrow X}(v=4) = 1,75 \times 10^8,$ $A_{B \rightarrow X}(v=5) = 1,63 \times 10^8,$ $A_{B \rightarrow X}(v=6) = 1,45 \times 10^8,$ $A_{B \rightarrow X}(v=7) = 1,23 \times 10^8,$

Продолжение табл. 4

№	Процесс	Диапазон длин волн λ (нм) и вероятность A (сек ⁻¹) излучения, ссылки
2	$H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B) \rightarrow H_2(X^1\Sigma_g^+, \nu) + h\nu$ $H_2(C^1\Pi_u, \nu_C) \rightarrow H_2(X^1\Sigma_g^+, \nu) + h\nu$	$A_{B \rightarrow X}(\nu = 8) = 1,02 \times 10^8,$ $A_{B \rightarrow X}(\nu = 9) = 8,13 \times 10^7,$ $A_{B \rightarrow X}(\nu = 10) = 6,25 \times 10^7,$ $A_{B \rightarrow X}(\nu = 11) = 4,59 \times 10^7,$ $A_{B \rightarrow X}(\nu = 12) = 3,13 \times 10^7,$ $A_{B \rightarrow X}(\nu = 13) = 1,88 \times 10^7,$ $A_{B \rightarrow X}(\nu = 14) = 7,81 \times 10^6,$ $A_{C \rightarrow X} = 1,08 \times 10^9, \lambda = 84\text{—}156,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 0) = 1,76 \times 10^8,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 1) = 2,26 \times 10^8,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 2) = 2,02 \times 10^8,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 3) = 1,55 \times 10^8,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 4) = 1,10 \times 10^8,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 5) = 7,44 \times 10^7,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 6) = 4,91 \times 10^7,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 7) = 3,21 \times 10^7,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 8) = 2,09 \times 10^7,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 9) = 1,37 \times 10^7,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 10) = 9,04 \times 10^6,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 11) = 6,08 \times 10^6,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 12) = 4,15 \times 10^6,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 13) = 2,86 \times 10^6,$ $A_{C \rightarrow X}(\nu = 14) = 1,92 \times 10^6,$
3	$H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_{B'}) \rightarrow H_2(X^1\Sigma_g^+, \nu) + h\nu$	$A_{B' \rightarrow X} = 2,77 \times 10^8, \lambda = 83\text{—}133,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 0) = 3,67 \times 10^7,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 1) = 5,85 \times 10^7,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 2) = 5,64 \times 10^7,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 3) = 4,51 \times 10^7,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 4) = 3,14 \times 10^7,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 5) = 2,02 \times 10^7,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 6) = 1,16 \times 10^7,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 7) = 6,30 \times 10^6,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 8) = 2,69 \times 10^6,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 9) = 1,01 \times 10^6,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 10) = 1,11 \times 10^5,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 11) = 1,28 \times 10^5,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 12) = 6,78 \times 10^5,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 13) = 1,47 \times 10^6,$ $A_{B' \rightarrow X}(\nu = 14) = 4,49 \times 10^6,$

Продолжение табл. 4

№	Процесс	Диапазон длин волн λ (нм) и вероятность A (сек ⁻¹) излучения, ссылки
4	$H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) \rightarrow H_2(X^1\Sigma_g^+, \nu) + h\nu$	$A_{D \rightarrow X} = 3,24 \times 10^8, \lambda = 76-128,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 0) = 4,70 \times 10^7,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 1) = 6,34 \times 10^7,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 2) = 5,91 \times 10^7,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 3) = 4,71 \times 10^7,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 4) = 3,46 \times 10^7,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 5) = 2,42 \times 10^7,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 6) = 1,64 \times 10^7,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 7) = 1,10 \times 10^7,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 8) = 7,36 \times 10^6,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 9) = 4,92 \times 10^6,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 10) = 3,32 \times 10^6,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 11) = 2,26 \times 10^6,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 12) = 1,56 \times 10^6,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 13) = 1,07 \times 10^6,$ $A_{D \rightarrow X}(\nu = 14) = 6,79 \times 10^5,$
5	$H_2(B^{\nu 1}\Sigma_u^+, \nu_{B^*}) \rightarrow H_2(X^1\Sigma_g^+, \nu) + h\nu$	$A_{B^* \rightarrow X} = 3,17 \times 10^6, \lambda = 76-122,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 0) = 2,92 \times 10^5,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 1) = 7,38 \times 10^5,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 2) = 3,74 \times 10^5,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 3) = 1,51 \times 10^4,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 4) = 4,51 \times 10^5,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 5) = 2,24 \times 10^5,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 6) = 4,98 \times 10^4,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 7) = 3,79 \times 10^5,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 8) = 9,66 \times 10^4,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 9) = 7,23 \times 10^4,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 10) = 2,46 \times 10^5,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 11) = 6,58 \times 10^4,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 12) = 1,11 \times 10^4,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 13) = 7,67 \times 10^4,$ $A_{B^* \rightarrow X}(\nu = 14) = 8,26 \times 10^4,$
6	$H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) \rightarrow H_2(X^1\Sigma_g^+, \nu) + h\nu$	$A_{D^* \rightarrow X} = 1,38 \times 10^8, \lambda = 74-121,$ $A_{D^* \rightarrow X}(\nu = 0) = 1,95 \times 10^7,$ $A_{D^* \rightarrow X}(\nu = 1) = 2,67 \times 10^7,$ $A_{D^* \rightarrow X}(\nu = 2) = 2,51 \times 10^7,$ $A_{D^* \rightarrow X}(\nu = 3) = 2,02 \times 10^7,$ $A_{D^* \rightarrow X}(\nu = 4) = 1,50 \times 10^7,$ $A_{D^* \rightarrow X}(\nu = 5) = 1,06 \times 10^7,$ $A_{D^* \rightarrow X}(\nu = 6) = 7,22 \times 10^6,$

Продолжение табл. 4

№	Процесс	Диапазон длин волн λ (нм) и вероятность A (сек ⁻¹) излучения, ссылки
	$H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) \rightarrow H_2(X^1\Sigma_g^+, \nu) + h\nu$	$A_{D \rightarrow X}(\nu = 7) = 4,86 \times 10^6$, $A_{D \rightarrow X}(\nu = 8) = 3,25 \times 10^6$, $A_{D \rightarrow X}(\nu = 9) = 2,17 \times 10^6$, $A_{D \rightarrow X}(\nu = 10) = 1,45 \times 10^6$, $A_{D \rightarrow X}(\nu = 11) = 9,78 \times 10^5$, $A_{D \rightarrow X}(\nu = 12) = 6,60 \times 10^5$, $A_{D \rightarrow X}(\nu = 13) = 4,37 \times 10^5$, $A_{D \rightarrow X}(\nu = 14) = 2,51 \times 10^5$, [36]
7	$H_2(EF^1\Sigma_g^+, \nu_{EF}) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B) + h\nu$	$A_{EF \rightarrow B} = 4,2 \times 10^6$, [36]
7.1	$H_2(EF^1\Sigma_g^+, \nu_{EF} = 9) \rightarrow$ $\rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B = 1) + h\nu$	$1,0 \times 10^6, R(0)$ $2,0 \times 10^6, P(2)$ [28, 33, 34]
7.2	$H_2(EF^1\Sigma_g^+, \nu_{EF} = 26) \rightarrow$ $\rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B = 1) + h\nu$	$5,5 \times 10^6, R(0)$ [28, 33, 34]
8	$H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK}) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B) + h\nu$	$A_{GK \rightarrow B} = 1,87 \times 10^7$, [36]
8.1	$H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK} = 1) \rightarrow$ $\rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B = 0) + h\nu$	$1,1 \times 10^7, R(0)$ $4,4 \times 10^6, P(2)$
8.2	$H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK} = 3) \rightarrow$ $\rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B = 0) + h\nu$	$5,7 \times 10^6, R(0)$
8.3	$H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK} = 3) \rightarrow$ $\rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B = 2) + h\nu$	$4,7 \times 10^6, R(0)$
8.4	$H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK} = 3) \rightarrow$ $\rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B = 3) + h\nu$	$5,6 \times 10^6, R(0)$
8.5	$H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK} = 4) \rightarrow$ $\rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B = 4) + h\nu$	$(3-4,5) \times 10^6, P(2)$
8.6	$H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK} = 5) \rightarrow$ $\rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B = 5) + h\nu$	$6,8 \times 10^6, P(2)$ [28, 33, 34]
9	$H_2(I^1\Pi_g, \nu_I) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B) + h\nu$	$A_{I \rightarrow B} = 3,83 \times 10^7$, [36]
9.1	$H_2(I^1\Pi_g, \nu_I = 0) \rightarrow$ $\rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B = 0) + h\nu$	$2,0 \times 10^7, P(2)$
9.2	$H_2(I^1\Pi_g, \nu_I = 0) \rightarrow$ $\rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B = 1) + h\nu$	$1,2 \times 10^7, P(2)$ [28, 33, 34]
10	$H_2(H\bar{H}^1\Sigma_g^+, \nu_{HH}) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B) + h\nu$	$A_{HH \rightarrow B} = 6,02 \times 10^6$
11	$H_2(P^1\Sigma_g^+, \nu_P) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B) + h\nu$	$A_{P \rightarrow B} = 1,43 \times 10^7$
12	$H_2(O^1\Sigma_g^+, \nu_O) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_B) + h\nu$	$A_{O \rightarrow B} = 6,68 \times 10^5$

Окончание табл. 4

№	Процесс	Диапазон длин волн λ (нм) и вероятность A (сек ⁻¹) излучения, ссылки
13	$H_2(EF^1\Sigma_g^+, \nu_{EF}) \rightarrow H_2(C^1\Pi_u, \nu_C) + h\nu$	$A_{EF \rightarrow C} = 4,26 \times 10^5$
14	$H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK}) \rightarrow H_2(C^1\Pi_u, \nu_C) + h\nu$	$A_{GK \rightarrow C} = 2,58 \times 10^6$
15	$H_2(I^1\Pi_g, \nu_I) \rightarrow H_2(C^1\Pi_u, \nu_C) + h\nu$	$A_{I \rightarrow C} = 2,35 \times 10^7$
16	$H_2(J^1\Delta_g, \nu_J) \rightarrow H_2(C^1\Pi_u, \nu_C) + h\nu$	$A_{J \rightarrow C} = 4,96 \times 10^7$
17	$H_2(H\bar{H}^1\Sigma_g^+, \nu_{HH}) \rightarrow H_2(C^1\Pi_u, \nu_C) + h\nu$	$A_{HH \rightarrow C} = 9,08 \times 10^3$
18	$H_2(P^1\Sigma_g^+, \nu_P) \rightarrow H_2(C^1\Pi_u, \nu_C) + h\nu$	$A_{P \rightarrow C} = 1,33 \times 10^6$
19	$H_2(R^1\Pi_g, \nu_R) \rightarrow H_2(C^1\Pi_u, \nu_C) + h\nu$	$A_{R \rightarrow C} = 5,58 \times 10^6$
20	$H_2(S^1\Delta_g, \nu_S) \rightarrow H_2(C^1\Pi_u, \nu_C) + h\nu$	$A_{S \rightarrow C} = 1,42 \times 10^7$
21	$H_2(O^1\Sigma_g^+, \nu_O) \rightarrow H_2(C^1\Pi_u, \nu_C) + h\nu$	$A_{O \rightarrow C} = 8,81 \times 10^5$
22	$H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_{B'}) \rightarrow H_2(EF^1\Sigma_g^+, \nu_{EF}) + h\nu$	$A_{B' \rightarrow EF} = 2,05 \times 10^7$,
23	$H_2(B''^1\Sigma_u^+, \nu_{B''}) \rightarrow H_2(EF^1\Sigma_g^+, \nu_{EF}) + h\nu$	$A_{B'' \rightarrow EF} = 3,26 \times 10^6$
24	$H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) \rightarrow H_2(EF^1\Sigma_g^+, \nu_{EF}) + h\nu$	$A_{D \rightarrow EF} = 1,67 \times 10^7$
25	$H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK}) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_{B'}) + h\nu$	$A_{GK \rightarrow B'} = 3,20 \times 10^4$
26	$H_2(I^1\Pi_g, \nu_I) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_{B'}) + h\nu$	$A_{I \rightarrow B'} = 1,82 \times 10^5$
27	$H_2(H\bar{H}^1\Sigma_g^+, \nu_{HH}) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_{B'}) + h\nu$	$A_{HH \rightarrow B'} = 1,68 \times 10^2$
28	$H_2(P^1\Sigma_g^+, \nu_P) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_{B'}) + h\nu$	$A_{P \rightarrow B'} = 4,53 \times 10^6$
29	$H_2(O^1\Sigma_g^+, \nu_O) \rightarrow H_2(B^1\Sigma_u^+, \nu_{B'}) + h\nu$	$A_{O \rightarrow B'} = 1,46 \times 10^5$
30	$H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) \rightarrow H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK}) + h\nu$	$A_{D \rightarrow GK} = 6,66 \times 10^5$
31	$H_2(B''^1\Sigma_u^+, \nu_{B''}) \rightarrow H_2(GK^1\Sigma_g^+, \nu_{GK}) + h\nu$	$A_{B'' \rightarrow GK} = 5,93 \times 10^4$
32	$H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) \rightarrow H_2(I^1\Pi_g, \nu_I) + h\nu$	$A_{D \rightarrow I} = 3,95 \times 10^4$
33	$H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) \rightarrow H_2(J^1\Delta_g, \nu_J) + h\nu$	$A_{D \rightarrow J} = 1,04 \times 10^4$
34	$H_2(H\bar{H}^1\Sigma_g^+, \nu_{HH}) \rightarrow H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) + h\nu$	$A_{HH \rightarrow D} = 1,47 \times 10^2$
35	$H_2(P^1\Sigma_g^+, \nu_P) \rightarrow H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) + h\nu$	$A_{P \rightarrow D} = 9,49 \times 10^5$
36	$H_2(R^1\Pi_g, \nu_R) \rightarrow H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) + h\nu$	$A_{R \rightarrow D} = 3,45 \times 10^6$
37	$H_2(S^1\Delta_g, \nu_S) \rightarrow H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) + h\nu$	$A_{S \rightarrow D} = 6,51 \times 10^6$
38	$H_2(O^1\Sigma_g^+, \nu_O) \rightarrow H_2(D^1\Pi_u, \nu_D) + h\nu$	$A_{O \rightarrow D} = 5,45 \times 10^5$
39	$H_2(B''^1\Sigma_u^+, \nu_{B''}) \rightarrow H_2(H\bar{H}^1\Sigma_g^+, \nu_{HH}) + h\nu$	$A_{B'' \rightarrow HH} = 1,27 \times 10^6$
40	$H_2(P^1\Sigma_g^+, \nu_P) \rightarrow H_2(B''^1\Sigma_u^+, \nu_{B''}) + h\nu$	$A_{P \rightarrow B''} = 2,02 \times 10^4$
41	$H_2(O^1\Sigma_g^+, \nu_O) \rightarrow H_2(B''^1\Sigma_u^+, \nu_{B''}) + h\nu$	$A_{O \rightarrow B''} = 2,36 \times 10^5$, [36]

Таблица 5

Времена жизни $\tau_{e'}$ электронно-возбужденных состояний e' молекулы водорода

Электронное состояние, e' (переход)	Колебательное число, $v_{e'}$	Вращательное число, J'	Время жизни, $\tau_{e'}$, сек.
$GK^1\Sigma_g^+$	0	1—4	$(56-76) \times 10^{-9}$ [61, 77, 84]
	1	0—5	$(24-40) \times 10^{-9}$ [59, 61, 77]
	3	0—5	$(25-46) \times 10^{-9}$ [59, 61, 77]
	4	1—2	$(40-56) \times 10^{-9}$ [61, 77]
	5	1—3	33×10^{-9} [77]
	6	1—4	$(52-64) \times 10^{-9}$ [61]
	7	1	38×10^{-9} [28, 33, 34]
$B^1\Sigma_u^+$ $(B^1\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+)$	3—7		$(0,8 \pm 0,2) \times 10^{-9}$ [130]
	7		$0,81 \times 10^{-9}$ [131]
	0		$0,53 \times 10^{-9}$ [132]
	8—11		$1,0 \times 10^{-9}$ [133]
$I^1\Pi_g$	0	1—4	21×10^{-9} [61, 84, 77]
	1	1,4	21×10^{-9} [77]
$I^1\Pi_g^-$	2	1—3	48×10^{-9} [59, 61]
	2	1	15×10^{-9} [28, 33, 34]
$I^1\Pi_g^+$	3	1	38×10^{-9} [28, 33, 34]
	3	1	16×10^{-9} [28, 33, 34]
$I^1\Pi_g^-$		1	$(36 \pm 6) \times 10^{-9}$ [7, 16]
		2	$(34 \pm 6) \times 10^{-9}$ [7, 16]
		3	$(85 \pm 6) \times 10^{-9}$ [7, 16]
		4	$(74 \pm 6) \times 10^{-9}$ [7, 16]
		5	120×10^{-9} [7, 16]
		6	$(100 \pm 30) \times 10^{-9}$ [7, 16]
$C^1\Pi_u$ $(C^1\Pi_u \rightarrow X^1\Sigma_g^+)$	0		$0,83 \times 10^{-9}$ [132]
	0—3		$(0,6 \pm 0,2) \times 10^{-9}$ [130]
	0—2		$0,88 \times 10^{-9}$ [131]
$EF^1\Sigma_g^+$	6	1,2	100×10^{-9} [56, 74]
	9	0,1	130×10^{-9} [78]
	22	1—3	66×10^{-9} [77]
	26	1—3	$35-44 \times 10^{-9}$ [77]

Величина $A_{e' \rightarrow e''}$, соответствующая переходу между электронными состояниями e' и e'' молекулы водорода, определяется выражением:

$$A_{e' \rightarrow e''} = \sum_{v_{e'} v_{e''}} A_{e'' v_{e''}}^{e' v_{e'}} \cdot N_{e' v_{e'}} / N_{e'}. \quad (40)$$

Здесь, $N_{e' v_{e'}}$ концентрация молекул водорода на колебательном уровне $v_{e'}$ электронно-возбужденного состояния e' , а $N_{e'}$ суммарная концентрация молекул водорода в состоянии e' . $A_{e'' v_{e''}}^{e' v_{e'}}$ обозначает излучательную вероятность перехода между электронно-колебательными состояниями $e', v_{e'}$ и $e'', v_{e''}$.

Уровневые излучательные вероятности $A_{e' \rightarrow e''}(v)$, где $e'' = X^1\Sigma_g^+$, определяются на основе соотношения:

$$A_{e' \rightarrow e''}(v) = \sum_{v_{e'}} A_{e'' v_{e''}}^{e' v_{e'}} \cdot N_{e' v_{e'}} / N_{e'}. \quad (41)$$

Здесь, v является номером колебательного уровня основного электронного состояния $X^1\Sigma_g^+$. Литературные сведения о ФРКУ молекулы водорода в электронно-возбужденных состояниях малочисленны [90]. В настоящей работе значения относительных концентраций $N_{e' v_{e'}} / N_{e'}$ в выражениях (40 и 41) аппроксимируются распределением Больцмана в интервале колебательных тем-

ператур $T_v(e') = 1000\text{—}5000$ К. Установлено, что изменение $T_v(e')$ в заданном интервале не влияет на результаты определения $A_{e' \rightarrow e''}$ и $A_{e' \rightarrow e''}(v)$.

Заключение

В первой части данного обзора рассмотрены: электронные конфигурации молекулы и атомов водорода; атомарные и молекулярные спектры излучения и поглощения; механизмы фотораспада молекулы водорода и трехчастичной рекомбинации атомов водорода; излучательные характеристики молекулы водорода. На основе обзора сформирована база данных для обработки спектров водородной НТП. Она включает: спектроскопические константы электронно-возбужденных состояний молекулы водорода, представляющих интерес для эмиссионной спектроскопии газовых разрядов; потенциальные кривые электронных состояний молекулы водорода; спектры испускания молекулы водорода; полное и парциальные сечения поглощения излучения молекулой водорода; коэффициенты скоростей столкновительных и излучательных процессов; электронные моменты переходов; времена жизни возбужденных состояний молекулы водорода.

Вторая часть обзора будет посвящена результатам определения функций распределения по колебательным и вращательным уровням молекулы водорода в основном и возбужденных электронных состояниях методами лазерной, эмиссионной и абсорбционной спектроскопии в газовых разрядах в водороде. На основе второй части обзора будет создана база данных результатов измерений поступательной температуры, функций распределения по колебательным и вращательным уровням молекулы водорода в основном и возбужденных электронных состояниях в плазме, которая служит основой для развития полуэмпирической столкновительно-излучательной модели водородной НТП.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (№12-08-91052)

Литература

1. Оптическая пирометрия плазмы. Сб. статей. Под ред. Соболева Н. Н. — М.: Издательство иностранной литературы, 1960.
2. Пеннер С. С. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов. — М.: Издательство иностранной литературы, 1963.
3. Диагностика плазмы / Под ред. Хаддлстоуна Р. и Леонарда С. — М.: Мир, 1967.
4. Методы исследования плазмы / Под ред. Лохте-Хольтгрена В. — М.: Мир, 1971.

5. Пластилин Ю. А. В сб.: Свойства газов при высоких температурах. — М.: Наука, 1967.
6. Лавров Б. П. Электронно-вращательные спектры двухатомных молекул и диагностика неравновесной плазмы / Химия плазмы. Сб. статей. Под ред. Б. М. Смирнова. Вып. 11. — М.: Атомиздат, 1984.
7. Электронно-возбужденные молекулы в неравновесной плазме, Труды Физического Института им. П. Н. Лебедева. Т. 157. Под ред. акад. Н. Г. Басов. — М.: Наука, 1985.
8. Лелевкин В. М., Оторбаев Д. К. Экспериментальные методы и теоретические модели в физике неравновесной плазмы. АН Кирг. ССР. — Фрунзе: ИЛИМ, 1988.
9. Fauchais P., Coudert J. F., Vardelle M. Diagnostics in Thermal Plasma Processing in Book: Plasma Diagnostics. Discharge Parameters and Chemistry Edited by N. Hershkowitz, Academic Press., Inc. 1989.
10. Lelevkin V. M., Otorbaev D. K., Schram D. C. Physics of Non-Equilibrium Plasmas, Elsevier, Amsterdam, 1992.
11. Овсянников А. А., Энгельшт В. С., Лебедев Ю. А. и др. Диагностика низкотемпературной плазмы, (Низкотемпературная плазма, Т. 9) — Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1994.
12. Зарин А. С., Кузовников А. А., Шибков В. М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. — М.: Нефть и Газ, 1996.
13. Суржиков С. Т. Оптические свойства газов и плазмы. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана Н. Э. Баумана, 2004.
14. Суржиков С. Т. Тепловое излучение газов и плазмы. — М.: Изд-во МГТУ им. Баумана Н. Э. Баумана, 2004.
15. Энциклопедия Низкотемпературной Плазмы, Серия Б, Справочные приложения, Базы и Банки Данных, Т. V-1, Диагностика низкотемпературной плазмы, Часть II, Под ред. Колесникова. — М.: Янус-К, 2005.
16. Очкин В. Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. — М.: Физматлит, 2006.
17. Richardson O. W. Molecular Hydrogen and its Spectrum. — Yale University, New Haven, Connecticut, 1934.
18. Герцберг Г. Спектры и строение двухатомных молекул. — М.: Издательство Иностранной литературы, 1949.
19. Moore C. E. United States Department of Commerce, National Bureau of Standards, Atomic Energy Levels, Vol. I—III, 1949.
20. Пирс Р. и Гейдон А. Отождествление молекулярных спектров. — М.: Изд-во Иностранной литературы. 1949.
21. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия. — М.: Изд-во Физико-математической литературы, 1962.
22. Фриш С. Э. Оптические спектры атомов. — М.-Л.: Физ.-мат. лит. 1963.
23. Dieker G. H. The Hydrogen Molecule Wavelength Tables — N. Y. Wiley, 1972.
24. Касабов Г. А., Елисеев В. В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы. Справочник. — М.: Атомиздат. 1973.
25. Радциг А. А. Двухатомные молекулы и молекулярные ионы / Химия плазмы. Сб. статей. Под ред. Б. М. Смирнова. Вып. 2. — М.: Атомиздат, 1975.
26. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. и др. Таблицы спектральных линий. Справочник. — М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977.
27. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Справочник по атомной и молекулярной физике. — М.: Атомиздат, 1980.
28. Glass-Maujean M., Quadrelli P., Dressler K., et al. // Phys. Rev. 1983 A. V. 28. P. 2868.
29. Glass-Maujean M., Quadrelli P., Dressler K. // Atomic Data and Nuclear Data Tables 1984. V. 30. P. 273.
30. Хьюбер Т., Герцберг Г. Константы двухатомных молекул. В 2-х ч. Ч. 1. Молекулы N₂-ZrO / Под ред. Соболева Н. Н. — М.: Мир, 1984.

31. Радциг А. А., Смирнов Б. М. Параметры атомов и атомных ионов: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
32. Правител А. М. Процессы фотораспада и рекомбинации с излучением двухатомных молекул, входящих в состав атмосферы / Химия плазмы. Сб. статей. Под ред. Б. М. Смирнова. Вып. 14. — М.: Атомиздат, 1987.
33. Quadrelli P., Dressler K., Wolniewicz L. // J. Chem. Phys. 1990. V. 92. P. 7461.
34. Quadrelli P., Dressler K., Wolniewicz L. // J. Chem. Phys. 1990. V. 93. P. 4958.
35. Правител А. М. Фотопроцессы в молекулярных газах. — М.: Энергоатомиздат, 1992.
36. Fantz U., Wunderlich D. Franck – Condon Factors, Transition Probabilities and Radiative Lifetimes for Hydrogen Molecules and their Isotopomers. INDC (NDS)-457 report, 2004. (<http://www-amdis.iaea.org>)
37. Janev R. K., Reiter D., Samm U. Столкновительные процессы в низкотемпературной водородной плазме. В кн.: Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Тематический Том V-1. Диагностика низкотемпературной плазмы. Часть II. Под ред. Колесникова В. Н. — М.: Янус-К 2007 С. 110.
38. Шахатов В. А., Лебедев Ю. А. // ТВТ. 2011. Т. 49. С. 265.
39. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. NIST ASD Team (2013). NIST Atomic Spectra Database (ver.5.1), (<http://physics.nist.gov/asd>, 2014, August 13). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
40. Okabe H. Photochemistry of small molecules — A Wiley Interscience publication, John Wiley and Sons, New-York, Chichester, Brisbane, Toronto, 1976.
41. Lindh A. E. // Zeitschrift für Physik. 1931. V. 67. P. 67.
42. Beutler H. // Zeitschrift für Physik. 1933. V. 86. P. 710.
43. Oldenberg O. // Phys. Rev. 1934. V. 46. P. 210.
44. Ginsburg N., Dieke G. H. // Phys. Rev. 1941. V. 59. P. 632.
45. Сахаров А. Д. // Изв. АН СССР, Сер. физ., 1948. Т. 12. С. 372.
46. Muntz E. P. // Phys. Fluids. 1962. V. 5. P. 325.
47. Takezawa S., Innes F. R., Tanaka Y. // J. Chem. Phys. 1966. V. 45. P. 2000.
48. Heidner III R. F., Kasper J. V. V. // J. Chem. Phys. 1969. V. 51. P. 4163.
49. Heidner III R. F., Kasper J. V. V. // Chem. Phys. Lett. 1972. V. 15. P. 179.
50. Рубин П. Л. // ЖЭТФ. 1973. Т. 65. С. 1375.
51. Dyke J., Jonathan N., Morris A., Sears T. // J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1976. V. 72. P. 597.
52. Nibler J. W., McDonald J. R., Harvey A. B. // Optics Communications. 1976. V. 18. P. 371.
53. Shirley J. A., Hall R. J. // J. Chem. Phys. 1977. V. 67. P. 2419.
54. Урбас А. Д. Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук. — М.: ИИХС АН СССР, 1978.
55. Лавров Б. П., Оторбаев Д. К. // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 42. С. 617.
56. Kligler D. J., Rhodes C. K. // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 40. P. 309.
57. Day R. L., Anderson R. J., Sharpton F. A. // J. Chem. Phys. 1978. V. 69. P. 5518.
58. Лавров Б. П., Оторбаев Д. К. // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 45. С. 1074.
59. Chien C. W. T., Dalby F. W., Van Der Linde J. // Canadian Journal of Physics. 1978. V. 56. P. 827.
60. Оторбаев Д. К., Очкин В. Н., Савинов С. Ю. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 28. С. 424.
61. Day R. L., Anderson R. J., Sharpton F. A. // J. Chem. Phys. 1979. V. 71. P. 3683.
62. Беликов А. Е., Карелов Н. В., Ребров А. К. и др. В сб. научных трудов «Диагностика потоков разреженного газа». — Новосибирск: Институт теплофизики АН СССР, 1979.
63. Лавров Б. П. // Оптика и спектроскопия, 1980. Т. 48. С. 680.
64. Лавров Б. П., Островский В. Н., Устимов В. И. // ЖТФ. 1980. Т. 50. С. 2072.
65. Кузнецова Л. А., Кузьменко Н. Е., Кузяков Ю. А. и др. Вероятности оптических переходов двухатомных молекул. Под ред. Хохлова Р. В. — М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980.
66. Брюховецкий А. П., Котликов Е. Н., Оторбаев Д. К. и др. // ЖЭТФ. 1980. Т. 79. С. 1678.
67. Словецкий Д. И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. — М.: Наука, 1980.
68. Сухинин Г. И., Шарафутдинов Р. Г. // ЖТФ. 1982. Т. 53. С. 13.
69. Pealat M., Taran J. P., Bacal M. // XVIth International Conference on Phenomena in Ionized Gases (29th August — 2nd September, 1983, Düsseldorf, Germany). V. 2. Contributed papers. P. 297.
70. Кузьменко Н. Е., Кузнецова Л. А., Кузяков Ю. А. Факторы Франка—Кондона двухатомных молекул. — М.: Издательство Моск. ун-та, 1984.
71. Lavrov B. P., Tyuchev M. V. // Acta Physica Hungaria. 1984. V. 55. P. 411.
72. Pealat M., Taran J.-P. E., Bacal M., Hillion F. // J. Chem. Phys. 1985. V. 82. P. 4943.
73. Асанов Б. У., Очкин В. Н., Савинов С. Ю. и др. // Краткие сообщения по физике. 1986. С. 26.
74. Chandler D. W., Thorne L. R. // J. Chem. Phys. 1986. V. 85. P. 1733.
75. Драчев А. И., Лавров Б. П. // ТВТ. 1988. Т. 26. С. 147.
76. Беликов А. Е., Седельников А. И., Сухинин Г. И. и др. // ПИМТФ. 1988. № 3. С. 3.
77. Sánchez J. A., Campos J. // J. Phys. France 1988. V. 49. P. 445.
78. Лавров Б. П., Тютчев М. В., Устимов В. И. // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64. С. 1251.
79. Очкин В. Н., Савинов С. Ю., Соболев Н. Н. и др. // ЖТФ. 1988. Т. 58. С. 1283.
80. Stutzin G. C., Young A. T., Schlachter A. S., et al. // Chem. Phys. Lett. 1989. V. 155. P. 475.
81. Stutzin G. C., Young A. T., Döbele H. F., et al. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. P. 619.
82. John D. H., King J. E. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1990. V. 44. P. 433.
83. Barbeau C., Baravian G., Jolly J. / Symposium Proceedings, 10th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC10, Bochum, Germany, August 4—9, 1991). V. 1. Ed. by Ehlemann U, Lergon H. G., Wiesemann K., International Union of Pure and Applied Chemistry. P. 2.1-39 1-6.
84. Tsukiyama K., Ishii J., Kasuya T. // J. Chem. Phys. 1992. V. 97. P. 875.
85. Lefebvre M., Pealat M., Taran J. P. // Pure and Appl. Chem. 1992. V. 64. P. 685.
86. Асташкевич С. А., Кокина Н. В., Лавров Б. П. // Оптика и спектроскопия. 1996. Т. 80. С. 389.
87. Carl D. S., Farhat S., Gicquel A., et al. // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 1996. V. 10. P. 426.
88. Amorin J., Loureiro J., Baravian G., et al. // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. P. 2795.
89. Gritsinin S. I., Kossyi I. A., Malykh N. I., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. V. 31. P. 2942.
90. Fantz U., Heger B. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1998. V. 40. P. 2023.
91. Wagner D., Dikmen B., Döbele H. F. // Plasma Sources Sci. Technol. 1998. V. 7. P. 462.
92. Асташкевич С. А., Лавров Б. П. // Оптика и спектро-

- скопия. 1998. Т. 85. С. 379.
93. Асташкевич С. А., Лавров Б. П. // Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 85. С. 554.
94. Асташкевич С. А., Калачев М. В., Лавров Б. П. // Оптика и спектроскопия. 1999. Т. 87. С. 229.
95. Асташкевич С. А., Калачев М. В., Лавров Б. П. и др. // Оптика и спектроскопия. 1999. Т. 87. С. 219.
96. Mosbach T., Katsch H.-M., Döbele H. F. // Physical Review Letters. 2000. V. 85. P. 3420.
97. Лебедев Ю. А., Мокеев М. В., Татаринов А. В. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. С. 293.
98. Асташкевич С. А., Калачев М. В., Лавров Б. П. // Оптика и спектроскопия. 2000. Т. 88. С. 920.
99. Лебедев Ю. А., Мокеев М. В. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. С. 443.
100. Лебедев Ю. А., Мокеев М. В. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. С. 251.
101. Лебедев Ю. А., Мокеев М. В. // Теплофизика высоких температур. 2003. № 6. С. 821.
102. Лебедев Ю. А., Мокеев М. В. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. С. 1059.
103. Xiao B., Kado S., Kajita S., Yamasaki D. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. V. 46. P. 653.
104. Лебедев Ю. А., Мокеев М. В., Татаринов А. В. и др. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. С. 96.
105. Shakhmatov V. A., De Pascale O., Capitelli M. // Eur. Phys. J. D: The Atoms, Molecules, Clusters and Optical Physics. 2004. V. 29. P. 230.
106. Асташкевич С. А. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2004.
107. Hassouni K., Lombardi G., Gicquel A., et al. // Physics of plasmas. 2005. V. 12. P. 073301.
108. Mosbach T. // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. V. 14. P. 610.
109. Umemoto H., Ansari S. G., Matsumura H. // J. Appl. Physics. 2006. V. 99. P. 043510.
110. Шахатов В. А., Гордеев О. А. // Оптика и спектроскопия. 2007. Т. 103. С. 483.
111. Shikama T., Kado S., Kuwahara Y., et al. // Plasma and Fusion Research. 2007. V. 2. P. S1045.
112. Umemoto H. // Chem. Vap. Deposition. 2010. V. 16. P. 275.
113. Tsankov T. V., Toko K., Czarnetzki U. // Physics of Plasmas. 2012. V. 19. P. 123503.
114. Fujii K., Shikama T., Goto M., et al. // Phys. Plasmas. 2013. V. 20. P. 012514.
115. Akatsuka H, Shimizu Y., Nezu A, et al./ Proceedings of 8th International Conference on Reactive Plasma / 31th Symposium Plasma Processing (ICRP-8/SPP-31, February 4—7, 2014, Fukuoka, Japan), Edited by Masaharu Shiratani M., Kaneko T. — Tokyo: Japan Society of Applied Physics, 2014. P. 5P-AM-S02-P01.
116. Jordanova S. // Journal of Physics: Conference Series. 2008. V. 113. P. 012005.
117. Леонас В. Б. // Химия плазмы. Сб. статей. Под ред. Б. М. Смирнова. Вып. 3. — М.: Атомиздат, 1976. С. 3.
118. Автаева С. В. Барьерный разряд. Исследование и применение. — Бишкек: Издательство КРСУ, 2009.
119. Bechu S., Soum-Glaude A., Bes A., et al. // Physics of Plasmas. 2013. V. 20. P. 101601.
120. Svarnas P, Annaratone B. M., Bechu S., et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2009. V. 18. P. 045010-8.
121. Lacoste A., Lagarde T., Bechu S., et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2002. V. 11. P. 1.
122. Lacoste A., Bechu S., Maulat O., et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2009. V. 18. P. 015017-8.
123. Mentall J. E., Gentieu E. P. // J. Chem. Phys. 1970. V. 52. P. 5641.
124. Гейдон А. Энергии диссоциации и спектры двухатомных молекул. — М.: Издательство Иностранной литературы, 1949.
125. Гуревич Л. В., Караченцев Г. В., Лебедев Ю. А. и др. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. — М.: Наука, 1974.
126. Glass-Maujean M., Guyon P. M., Breton J. // Phys. Rev. 1986 A. V. 33. P. 346.
127. Физико-химические процессы в газовой динамике. Компьютеризованный справочник в 3-х томах. Том 1: Динамика физико-химических процессов в газе и плазме / Под ред. Г. Г. Черного и С. А. Лосева. — М.: Изд. Моск. ун-та, 1995.
128. Guyon P. M., Breton J., Glass-Maujean M. // Chem. Phys. Letters. 1979. V. 68. P. 314.
129. Borrell P., Paul Marie Guyon P. M., Glass-Maujean M. // J. Chem. Phys. 1977. V. 66. P. 818.
130. Hesser J. E. // J. Chem. Phys. 1968. V. 48. P. 2518.
131. Stephens T. L., Dalgarno A. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 1972. V. 12. P. 569.
132. Allison A. C., Dalgarno A. / Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1969. V. 1. P. 289.
133. Smith W. H., Chevalier R. // Astrophys. J. 1972. V. 177. P. 835.

Diagnosics of excited particle in hydrogen plasma (a review)

Part I. Spectral composition, excited states and radiative characteristics of plasma particles

V. A. Shakhmatov and Yu. A. Lebedev

Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, RAS
29 Leninsky prospect, Moscow, 119991, Russia
E-mail: shakhmatov@ips.ac.ru

Received November 2, 2014

The first part of review of the spectral studies of excited particles in hydrogen plasma is presented. Electronic configurations of the hydrogen molecules and atoms, emission and absorption

spectra of the hydrogen atoms and molecules are reviewed. Mechanisms of hydrogen molecule photodecomposition and three-particle recombination of hydrogen atoms are considered. Radiative characteristics of the hydrogen molecule are given. Database for emission spectra processing of low-temperature hydrogen plasma is formed based on the review.

PACS: 52.70.Kz; 52.25.Os; 52.55.Dy; 52.70.-m

Keywords: electronic states, radiative characteristics, hydrogen, molecules, atoms, spectrum, hydrogen plasma, photodecomposition, database.

References

1. *Optical Pyrometry of Plasma. Coll. Articl.* Ed. by N. N. Sobolev (Izdat. Inostr. Lit., Moscow, 1960) [in Russian].
2. S. S. Penner, *Quantitative Molecular Spectroscopy* (Izdat. Inostr. Lit., Moscow, 1963) [in Russian].
3. *Plasma Diagnostics.* Ed. by R. Haddlstone and S. Leonard (Mir, Moscow, 1967) [in Russian].
4. *Methods of Plasma Investigation.* Ed. by Lohte-Holtgreven (mir, Moscow, 1971) [in Russian].
5. Yu. A. Plastinin, in *Book: High-Temperature Gas Features* (Nauka, Moscow, 1967) [in Russian].
6. B. P. Lavrov, in *Book: Chemistry of Plasma.* Ed. by B. M. Smirnov (Atomizdat, Moscow, 1984) [in Russian].
7. *Molecules Excited by Electrons in Plasma.* Proc. Lebedev Physical Institute. (Nauka, 1985).
8. V. M. Lelevkin and D. K. Otorbaev, *Experimental Methods and Theoretical Models in Plasma Physics* (ILIM, Frunze, 1988) [in Russian].
9. P. Fauchais, J. F. Coudert, M. Vardelle, *Diagnostics in Thermal Plasma Processing, in Book: Plasma Diagnostics. Discharge Parameters and Chemistry.* Edited by N. Hershkowitz, Academic Press., Inc. 1989.
10. V. M. Lelevkin, D. K. Otorbaev, and D. C. Schram, *Physics of Non-Equilibrium Plasmas*, (Elsevier, Amsterdam, 1992).
11. A. A. Ovsyannilov, V. S. Engel'sht, Yu. A. Lebedev, et al., *Diagnostics of Low-Temperature Plasma* (Nauka, Novosibirsk, 1994) [in Russian].
12. A. S. Zorin, A. A. Kuzovnikov, and V. M. Shibkov, *Free Localized Microwave Discharge in Air* (Neft i Gaz, Moscow, 1996) [in Russian].
13. S. T. Surzhikov, *Optical Features of Gases and Plasmas* (Bauman MGTU, Moscow, 2004) [in Russian].
14. S. T. Surzhikov, *Thermal Radiation of Gases and Plasmas* (Bauman MGTU, Moscow, 2004) [in Russian].
15. *Encyclopaedia of Low-Temperature Plasma. Handbook. Vol. V.* (Yanus, Moscow, 2005) [in Russian].
16. V. N. Ochkin, *Spectroscopy of Low-Temperature Plasma* (Fizmatlit, Moscow, 2006) [in Russian].
17. O. W. Richardson, *Molecular Hydrogen and its Spectrum.* (Yale University, New Haven, Connecticut, 1934).
18. G. Gertsberg, *Spectra and Structure of Diatomic Molecules.* (Izdat. Inostr. Lit., Moscow, 1949) [in Russian].
19. C. E. Moore, United States Department of Commerce, National Bureau of Standards, *Atomic Energy Levels, Vol. I—III*, 1949.
20. R. Pirs and A. Gadon, *Identification of Molecular Spectra* (Izdat. Inostr. Lit., Moscow, 1949) [in Russian].
21. M. A. El'yzhevich, *Atomic and Molecular Spectroscopy.* (Fizmatlit, Moscow, 1962) [in Russian].
22. S. E. Frish, *Optical Spectra of Atoms* (Fizmatlit, Moscow, 1963) [in Russian].
23. G. H. Dieker, *The Hydrogen Molecule Wavelength Tables* (N. Y. Wiley, 1972).
24. G. A. Kasabov and V. V. Eliseev, *Spectroscopic Tables for Low-Temperature Plasma. Handbook.* (Atomizdat, Mopscow, 1973) [in Russian].
25. A. A. Radtsig, *Diatomic Molecules and Molecular Ions.* In *Call. Articl.: Chemistry of Plasma* (Atomizdat, Moscow, 1975) [in Russian].
26. A. N. Zaidel, V. K. Prokof'ev, S. M. Raisky, et al. *Tabled of Spectral Lines. Handbook.* (Nauka, Moscow, 1977) [in Russian].
27. A. A. Radtsig and B. M. Smirnov, *Handbook on atomic and Molecular Physics* (Atomizdat, Moscow, 1980) [in Russian].
28. M. Glass-Maujean, P. Quadrelli, K. Dressler, et al., *Phys. Rev.* **28**, 2868 (1983).
29. M. Glass-Maujean, P. Quadrelli, K. Dressler, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **30**, 273 (1984).
30. T. Hyuber and G. Gerzberg, *Constants of Diatomic Molecules.* (Mir, Moscow, 1984) [in Russian].
31. A. A. Radtsig and B. M. Smirnov, *Parameters of Atoms and Atomic Ions. Handbook.* (Energoatomizdat, Moscow 1986) [in Russian].
32. A. M. Pravilov, in *Coll. Articl. Plasma Chemistry. Issue 14.* (Atomizdat, Moscopw, 1987) [in Russian].
33. P. Quadrelli, K. Dressler, and L. Wolniewicz, *J. Chem. Phys.* **92**, 7461 (1990).
34. P. Quadrelli, K. Dressler, and L. Wolniewicz, *J. Chem. Phys.* **93**, 4958 (1990).
35. A. M. Pravilov, *Photoprocesses in Molecular Gases.* (Energoatomizdat, Moscow, 1992) [in Russian].
36. U. Fantz and D. Wunderlich, *Franck-Condon Factors, Transition Probabilities and Radiative Lifetimes for Hydrogen Molecules and their Isotopomers.* INDC (NDS)-457 report, 2004. (<http://www-amdis.iaea.org>)
37. R. K. Janev, D. Reiter, and U. Samm, *Encyclopaedia of Low-Temperature Plasma.* Vol. V-1 (Yanus, Moscow, 2007). P. 110.
38. V. A. Shakhatov and Yu. A. Lebedev, *High. Temp.* **49**, 265 (2011).
39. A. Kramida, Yu. Ralchenko, and J. Reader, NIST ASD Team (2013). NIST Atomic Spectra Database (ver.5.1), (<http://physics.nist.gov/asd>, 2014, August 13). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
40. H. Okabe, *Photochemistry of small molecules* (A Wiley Interscience publication, John Wiley and Sons, New-York, Chichester, Brisbane, Toronto, 1976).
41. A. E. Lindh, *Zeitschrift für Physik.* **67**, 67 (1931).
42. H. Beutler, *Zeitschrift für Physik.* **86**, 710 (1933).
43. O. Oldenberg, *Phys. Rev.* **46**, 210 (1934).
44. N. Ginsburg and G. H. Dieke, *Phys. Rev.* **59**, 632 (1941).
45. A. D. Sakharov, *Izv. Akad. Nauk SSSR* **12**, 372 (1948).

46. E. P. Muntz, *Phys. Fluids* **5**, 325 (1962).
47. S. Takezawa, F. R. Innes, and Y. Tanaka, *J. Chem. Phys.* **45**, 2000 (1966).
48. R. F. Heidner III and J. V. V. Kasper, *J. Chem. Phys.* **51**, 4163 (1969).
49. R. F. Heidner III and J. V. V. Kasper, *Chem. Phys. Lett.* **15**, 179 (1972).
50. P. L. Rubin, *J. Exp. Thor. Phys.* **65**, 1375 (1973).
51. J. Dyke, N. Jonathan, A. Morris, and T. Sears, *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* **72**, 597 (1976).
52. J. W. Nibler, J. R. McDonald, and A. B. Harvey, *Optics Communications* **18**, 371 (1976).
53. J. A. Shirley and R. J. Hall, *J. Chem. Phys.* **67**, 2419 (1977).
54. A. D. Urbas, Candidate's Dissertation on Chemistry. (INKhS, Moscow, 1978).
55. B. P. Lavrov and D. K. Otorbaev, *Opt. Spectrosc.* **42**, 617 (1978).
56. D. J. Kligler and C. K. Rhodes, *Phys. Rev. Lett.* **40**, 309 (1978).
57. R. L. Day, R. J. Anderson, and F. A. Sharpton, *J. Chem. Phys.* **69**, 5518 (1978).
58. B. P. Lavrov and D. K. Otorbaev, *Opt. Spectrosc.* **45**, 1074 (1978).
59. C. W. T. Chien, F. W. Dalby, and J. Van Der Linde, *Canadian Journal of Physics* **56**, 827 (1978).
60. D. K. Otorbaev, V. N. Ochkin, and S. Yu. Savinov, *JETP Lett.* **28**, 424 (1978).
61. R. L. Day, R. J. Anderson, and F. A. Sharpton, *J. Chem. Phys.* **71**, 3683 (1979).
62. A. E. Belikov, N. V. Karel'ov, A. K. Rebrov, et al., in *Call. Articl.: Diagnostics of Rare Gas Fluids* (Novosibirsk, 1979) [in Russian].
63. B. P. Lavrov, *Opt. Spectrosc.* **48**, 680 (1980).
64. B. P. Lavrov, V. N. Ostrovsky, and V. I. Ustimov, *Tech. Phys.* **50**, 2072 (1980).
65. L. A. Kuznetsova, N. E. Kuz'menko, Yu. A. Kuzyakov, et al., *Probabilities of Optical Transitions for Diatomic Molecules*. (Nauka, Moscow, 1980) [in Russian].
66. A. P. Bryukhovetsky, E. N. Kotlikov, D. K. Otorbaev, et al., *J. Exp. Theor. Phys.* **79**, 1678 (1980).
67. D. I. Slovetsky, *Mechanisms of Chemical Reaction in Plasma* (Nauka, Moscow, 1980) [in Russian].
68. G. I. Sukhinin and R. G. Sharafutdinov, *Tech. Phys.* **53**, 13 (1982).
69. M. Pealat, J. P. Taran, and M. Bacal, in *Proc. XVIIth International Conference on Phenomena in Ionized Gases* (29th August — 2nd September, 1983, Düsseldorf, Germany). V. 2. Contributed papers. P. 297.
70. N. E. Kuz'menko, L. A. Kuznetsova, and Yu. A. Kuzyakov, *Franck-Condon Factors of Diatomic Molecules*. (MGU, Moscow, 1984) [in Russian].
71. B. P., Lavrov and M. V. Tyuchev, *Acta Physica Hungaria* **55**, 411 (1984).
72. M. Pealat, J.-P. E. Taran, M., Bacal, et al., *J. Chem. Phys.* **82**, 4943 (1985).
73. B. U. Asanov, V. N. Ochkin, S. Yu. Savinov, et al., *Bull. Lebedev Phys. Institute*, 26 (1986).
74. D. W. Chandler, and L. R. Thorne, *J. Chem. Phys.* **85**, 1733 (1986).
75. A. I. Drachev and B. P. Lavrov, *High Temp.* **26**, 147 (1988).
76. A. E. Belikov, A. I. Sidel'nikov, G. I. Sukhinin, et al., *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, No. 3, 3 (1988).
77. J. A. Sánchez and J. Campos, *J. Phys. France* **49**, 445 (1988).
78. B. P. Lavrov, M. V. Tyutchev, and V. I. Ustimov, *Opt. Spectrosc.* **64**, 1251 (1988).
79. V. N. Ochkin, S. Yu. Savinov, N. N. Sobolev, et al., *Tech. Phys.* **58**, 1283 (1988).
80. G. C. Stutzin, A. T. Young, A. S. Schlachter, et al., *Chem. Phys. Lett.* **155**, 475 (1989).
81. G. C. Stutzin, A. T. Young, H. F. Döbele, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 619 (1990).
82. D. H. John and J. E. King, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **44**, 433 (1990).
83. C. Barbeau, G. Baravian, and J. Jolly, in *Proc. Symposium Proceedings, 10th International Symposium on Plasma Chemistry* (ISPC10, Bochum, Germany, August 4—9, 1991). V. 1. Ed. by Ehlemann U, Lergon H. G., Wiesemann K., International Union of Pyre and Applied Chemistry. P. 2. 1-39 1-6.
84. K. Tsukiyama, J. Ishii, and T. Kasuya, *J. Chem. Phys.* **97**, 875 (1992).
85. M. Lefebvre, M. Pealat, and J. P. Taran, *Pure and Appl. Chem.* **64**, 685 (1992).
86. S. A. Astashkevich, N. V. Kokina, and B. P. Lavrov, *Opt. Spectrosc.* **80**, 389 (1996).
87. D. S. Carl, S. Farhat, A. Gicquel, et al., *Journal of Thermophysics and Heat Transfer.* **10**, 426 (1996).
88. J. Amorin, J. Loureiro, G. Baravian, et al., *J. Appl. Phys.* **82**, 2795 (1997).
89. S. I. Gritsinin, I. A. Kosygi, N. I. Malykh, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **31**, 2942 (1998).
90. U. Fantz and B. Heger, *Plasma Phys. Control. Fusion.* **40**, 2023 (1998).
91. D. Wagner, B. Dikmen, and H. F. Döbele, *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 462 (1998).
92. S. A. Astashkevich and B. P. Lavrov, *Opt. Spectrosc.* **85**, 379 (1998).
93. S. A. Astashkevich and B. P. Lavrov, *Opt. Spectrosc.* **85**, 554 (1998).
94. S. A. Astashkevich, M. V. Kalachev, and B. P. Lavrov, *Opt. Spectrosc.* **87**, 229 (1999).
95. S. A. Astashkevich, M. V. Kalachev, B. P. Lavrov, et al., *Opt. Spectrosc.* **87**, 219 (1999).
96. T. Mosbach, H.-M. Katsch, and H. F. Döbele, *Physical Review Letters.* **85**, 3420 (2000).
97. Yu. A. Lebedev, M. V. Mokeev, and A. V. Tatarinov, *Plasma Physics Reports* **26**, 293 (2000).
98. S. A. Astashkevich, M. V. Kalachev, and B. P. Lavrov, *Opt. Spectrosc.* **88**, 920 (2000).
99. Yu. A. Lebedev and M. V. Mokeev, *Plasma Physics Reports* **27**, 443 (2001).
100. Yu. A. Lebedev and M. V. Mokeev, *Plasma Physics Reports* **29**, 251 (2003).
101. Yu. A. Lebedev and M. V. Mokeev, *High Temp.*, No. 6, 821 (2003).
102. Yu. A. Lebedev and M. V. Mokeev, // *Plasma Physics Reports* **29**, 1059 (2003).
103. B. Xiao, S. Kado, S. Kajita, et al., *Plasma Phys. Control. Fusion.* **46**, 653 (2004).
104. Yu. A. Lebedev, M. V. Mokeev, A. V. Tatarinov, et al., *Plasma Physics Reports* **30**, 96 (2004).
105. V. A. Shakhmatov, O. De Pascale, and M. Capitelli, *Eur. Phys. J. D: The Atoms, Molecules, Clusters and Optical Physics* **29**, 230 (2004).
106. S. A. Astashkevich, Doctor Dissertation on Physics and Mathematics (St. Petersburg University, 2004).
107. K. Hassouni, G. Lombardi, A. Gicquel, et al., *Physics of Plasmas* **12**, 073301 (2005).
108. T. Mosbach, *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 610 (2005).

109. H. Umemoto, S. G. Ansari, and H. Matsumura, *J. Appl. Physics* **99**, 043510 (2006).
110. V. A. Shakhmatov and O. A. Gordeev, *Opt. Spectrosc.* **103**, 483 (2007).
111. T. Shikama, S. Kado, Y. Kuwahara, et al., *Plasma and Fusion Research*. **2**, S1045 (2007).
112. H. Umemoto, *Chem. Vap. Deposition*. **16**, 275 (2010).
113. T. V. Tsankov, K. Toko, and U. Czarnetzki, *Physics of Plasmas*. **19**, 123503 (2012).
114. K. Fujii, T. Shikama, M. Goto, et al., *Phys. Plasmas*. **20**, 012514 (2013).
115. H. Akatsuka, Y. Shimizu, A. Nezu, et al., in *Proc. 8th International Conference on Reactive Plasma / 31th Symposium Plasma Processing (ICRP-8/SPP-31, February 4—7, 2014, Fukuoka, Japan)*, Edited by Masaharu Shiratani M., Kaneko T., — Tokyo: Japan Society of Applied Physics, 2014. P. 5P-AM-S02-P01.
116. S. Iordanova, *Journal of Physics: Conference Series*. **113**, 012005 (2008).
117. V. B. Leonas, in *Coll. Articl.: Chemistry of Plasma* (Atomizdat, Moscow, 1976), p. 3 [in Russian].
118. S. V. Avtaeva, *Barrier Discharge (KRSU, Bishkek, 2009)* [in Russian].
119. S. Bechu, A. Soum-Glaude, A. Bes, et al., *Physics of Plasmas* **20**, 101601 (2013).
120. P. Svarnas, B. M. Annaratone, S. Bechu, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **18**, 045010-8 (2009).
121. A. Lacoste, T. Lagarde, S. Bechu, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **11**, 1 (2002).
122. A. Lacoste, S. Bechu, O. Maulat, et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **18**, 015017-8 (2009).
123. J. E. Mentall and E. P. Gentieu, *J. Chem. Phys.* **52**, 5641 (1970).
124. A. Gadon, *Energy of Dissociation and Spectra of Diatomic Molecules* (Izd. Inostr. Lit., Moscow, 1949) [in Russian].
125. L. V. Gurevich, G. V. Karachentsev, Yu. A. Lebedev, et al., *Energy of Bond Breakage* (Nauka, Moscow, 1974) [in Russian].
126. M. Glass-Maujean, P. M. Guyon, and J. Breton, *Phys. Rev.* **33**, 346 (1986).
127. *Physical-Chemical Processes in Gas Dynamics* (Nauka, Moscow, MGU, 1995) [in Russian].
128. P. M. Guyon, J. Breton, and M. Glass-Maujean, *Chem. Phys. Letters*. **68**, 314 (1979).
129. P. Borrell, P. M. Paul Marie Guyon, and M. Glass-Maujean, *J. Chem. Phys.* **66**, 818 (1977).
130. J. E. Hesser, *J. Chem. Phys.* **48**, 2518 (1968).
131. T. L. Stephens and A. Dalgarno, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **12**, 569 (1972).
132. A. C. Allison and A. Dalgarno, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **1**, 289 (1969).
133. W. H. Smith and R. Chevalier, *Astrophys. J.* **177**, 835 (1972).