

- [1] С о б о л е в Г.А. - Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 12, с. 723-726.
- [2] С о б о л е в Г.А., С е р о в О.Б., С м о л о в и ч А.М. - Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, в. 15, с. 708-710.
- [3] С е р о в О.Б., С м о л о в и ч А.М., С о б о л е в Г.А. - ЖТФ, 1977, т. 47, в. 11, с. 2405-2409.
- [4] К о м а р В.Г., С о б о л е в Г.А. В кн.: Современное состояние и перспективы развития голографии, Л.: Наука, 1974, с. 120-141.
- [5] С о б о л е в Г.А., Б е т е х т и н В.И., Д е м и р - ч а н К.К., К а д о м ц е в А.Г., П е т р о в А.И., Ш е в ч е н к о С.Б. - В кн.: Тезисы докладов У Всесоюзной конференции по голографии, Рига, 1985, 360 с.
- [6] Д е н и с ю к Ю.Н., З а г о р с к а я З.А., Н и ж и н А.М., Ш е в ч е н к о С.Б. - Оптико-механическая промышленность, 1983, № 9, с. 58-59.
- [7] И з м а й л о в а В.Н., С о б о л е в Г.А., С о б о л е в а С.Б., Я м п о л ь с к а я Г.П., Т у л о в с к а я З.Д. - В сб.: Материалы и устройства для регистрации голограмм, Л.: ЛФТИ, 1986, с. 47-67.
- [8] A e r o g e l s Ed., F r i c k e J. Berlin; Heidelberg; New York: Springer Verlag, 1986.

Поступило в Редакцию
18 марта 1988 г.

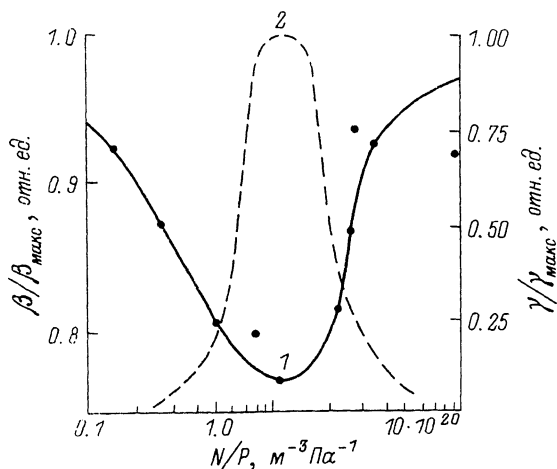
Письма в ЖТФ, том 14, вып. 15

12 августа 1988 г.

РАСТВОРЕНИЕ ЛИНИЙ ВОДОРОДА
В ХОЛОДНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

Е.Т. П р о т а с е в и ч

Известно, что при добавлении в ВЧ-разряд паров воды существует область параметров разряда и среды, при реализации которых получается холодная неравновесная плазма [1-3]. Время распада такой плазмы τ в $\sim 10^4$ - 10^6 раз повышает время распада плазмы в сухом воздухе [4, 5]. В настоящее время этот экспериментальный результат находится в противоречии с известным фактом, что при добавлении в разряд молекул воды резко возрастает процесс трехтельного прилипания электронов к молекулам кислорода, что инициирует более быстрый распад плазмы [6]. Однако замедление скорости рекомбинации плазмы можно объяснить с помощью



Коэффициенты растворения (кривая 1) и неидеальности (кривая 2) для холодной неравновесной плазмы газового разряда ($n_e \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim (1-2) \cdot 10^3 \text{ К}$, $T \sim 300-400 \text{ К}$), полученной при полном давлении влажного воздуха $p \sim 0.1-1.0 \text{ кПа}$.

ее неидеальности, как это сделано в [7, 8] для водородной плазмы с $T \sim 10^4 \text{ К}$ и $n_i, e \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В настоящее время нет никаких экспериментальных данных, подтверждающих, что холодная неравновесная плазма ВЧ-разряда является неидеальной.

Цель данной работы – анализ спектров излучения водорода серии Бальмера в зависимости от характеристик холодной неравновесной плазмы или состава неионизованной смеси (воздух + H_2O) и поиск доказательств, что такая плазма является неидеальной.²

Формирование долгоживущих плазмоидов, имеющих резкую границу раздела, и их перемещение в пространстве вместе с потоками воздуха [4, 5] в какой-то мере косвенно подтверждают такое предположение. Однако существуют еще прямые доказательства неидеальности плазмы. Остановимся на их рассмотрении, для чего воспользуемся анализом спектров водорода во влажном воздухе.

Схема эксперимента ($f = 37 \text{ МГц}$, $P = 150 \text{ Вт}$, $p = 0.1-4.0 \text{ кПа}$) подробно изложена в [2, 3]. Перепад температур у стенки разрядной трубки ($d \sim 1$ или 2.4 см) по сравнению с центром зависел от температуры плазмы и достигал $\sim 25-30\%$. Однако в области более низких температур (при $T \rightarrow T_{\text{мин}}$) [3, 4] не превышал 10% . Специальные измерения для линии водорода H_{β} подтвердили отсутствие реабсорбции при понижении температуры плазмы.

Основные измерения спектра проведены на монохроматоре МДР-4. В качестве дополнения к ним служила информация о форме спектральной линии H_{β} , полученная на интерферометре Чабри-Перо [2]. В последнем случае наряду с непосредственно измеренным контуром

| $N/\rho, \text{ м}^{-3} \text{ Па}^{-1}$ | $0.483 \cdot 10^{20}$ | $0.82 \cdot 10^{20}$ | $1.45 \cdot 10^{20}$ |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Линии водорода серии Бальмера | Наличие линий водорода в измеряемом спектре | | |
| H_{α} | есть | есть | есть |
| H_{β} | есть | есть | есть |
| H_{γ} | есть | есть | есть |
| H_{δ} | есть | есть | есть |
| H_{ϵ} | есть | есть | нет |
| H_{ζ} | есть | есть | нет |

линии $\varphi(\nu)$ рассматривался также ее истинный контур. Поскольку качественная картина растворения линий водорода при обеих методиках оказалась одинаковой, то предпочтение было отдано первому случаю измерений. Интенсивность линии определялась путем интегрирования контура линии H_{β}

$$J(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\nu) d\nu. \quad (1)$$

Пределы интегрирования определялись только той частью контура спектральной линии, которая выступала над фоном. Непосредственное интегрирование осуществлялось по формуле Симпсона. Погрешность измерения и аппроксимации не превышала $\sim 10\%$. При вычислении коэффициента растворения измеренная интенсивность $\varphi(\nu)$ нормировалась не по расчетной, а по интенсивности, которая соответствовала максвелловскому распределению возбужденных атомов водорода по скоростям. На практике это наблюдалось, когда параметр $N/\rho < 10^{18} \text{ м}^{-3} \text{ Па}^{-1}$, где N - концентрация молекул H_2O в единице объема, а ρ - полное давление неионизованной смеси (воздух + H_2O). Такая нормировка позволяла исключить погрешность расчетов, связанную с применением формулы Грима [9, 10].

На рисунке в относительных единицах представлены коэффициенты растворения спектральной линии H_{β} и неидеальности плазмы \mathcal{J} в зависимости от параметра N/ρ . (При нахождении \mathcal{J} использовались значения температур и концентраций электронов, приведенные в предыдущих работах [1-5]). Из рисунка видно, что при $\mathcal{J} = \mathcal{J}_{\text{макс}} \sim e^2(n_e)^{1/3}/kT \sim 0.2$ коэффициент растворения спектральной линии H_{β} равен ~ 0.8 .

В [8] обращено внимание и на другое проявление неидеальности плазмы: на нереализацию части верхних уровней атомов и ионов в результате действия в плазме микрополей. В нашем случае наряду с растворением линий H_{β} наблюдалось также частичное „просветление“ спектра водорода при увеличении \mathcal{J} или N/ρ : последовательное исчезновение линий серии Бальмера более высоких порядков, как это приведено в таблице.

Необходимо отметить, что по мере превращения холодной неравновесной плазмы в неидеальную происходит слабый сдвиг линии

H_{β} в ультрафиолетовую область. Величина сдвига $\Delta\nu$ оказывается порядка полуширины линии H_{β} , т.е. составляет $\sim (1-2) \cdot 10^{-2}$ нм (при $n_e \sim 10^{14}$ см $^{-3}$, $T_e \sim (1-2) \cdot 10^3$ К, $T \sim 300-400$ К).

Таким образом, в результате анализа спектров излучения атомов водорода, образующихся при диссоциации воды в ВЧ-разряде, установлено, что холодная неравновесная плазма является слабо неидеальной ($\mathcal{N} < 1$) и для обеспечения ее формирования наряду с понижением температуры необходима высокая концентрация заряженных частиц. Другими словами, работа при давлении, близком к атмосферному, с большим энерговкладом в единицу объема.

Л и т е р а т у р а

- [1] Протасевич Е.Т. - Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 16, с. 1006-1009.
- [2] Протасевич Е.Т., Капичка В., Браблец А. - ЖТФ, 1985, т. 55, в. 4, с. 743-745.
- [3] Протасевич Е.Т. - ХВЭ, 1985, т. 19, в. 6, с. 535-540.
- [4] Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Протасевич Е.Т., Хан В.А. - Докл. АН СССР, 1987, т. 296, № 2, с. 337-340.
- [5] Григорьев В.П., Протасевич Е.Т., Толмачев В.И. - ХВЭ, 1988, т. 22, в. 1, с. 78-81.
- [6] Месси Г. Отрицательные ионы, М.: Мир, 1979. 754 с.
- [7] Кобзев Г.А., Куриленков Ю.К., Норман Г.Э. - ТВТ, 1977, т. 15, в. 1, с. 173-196.
- [8] Куриленков Ю.К., - ТВТ, 1980, т. 18, в. 6, с. 1312-1314.
- [9] Гаврилов В.Е., Гаврилова Т.В., Федорова Т.Н. - Оптика и спектроскопия, 1985, т. 59, в. 3, с. 518-522.
- [10] Грим Г. Уширение спектральной линии в плазме, М.: Мир, 1978. 492 с.

Поступило в Редакцию
27 апреля 1988 г.