

О ДОПЛЕРОВСКОМ УШИРЕНИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ ИХ ВОЗБУЖДЕНИИ ПРЯМЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

С. Ю. Савинов, С. Н. Цхай

УДК 527.525

Оценивается влияние возбуждения молекул и атомов электронным ударом на уширение спектральных линий. Результаты измерений ширины линий H_2 , D_2 и He удовлетворительно согласуются с расчетами.

Важный канал возбуждения электронных состояний молекул и атомов — электронный удар. При столкновении электрона и атома происходит изменение их скоростей, что может сказаться на форме спектральных линий, излучаемых короткоживущими состояниями, для которых столкновительная релаксация неэффективна. Из закона сохранения импульса скорость атома после столкновения с электроном $v' = v - (m_e/M)(v'_e - v_e)$, где v — скорость атома до столкновения, M и m_e — массы атома и электрона, v_e и v'_e — скорости электрона до и после столкновения с атомом. Наиболее интересны случаи $v'_e \ll v_e$ и $v'_e \approx v_e$. Первый реализуется в газоразрядной плазме, где обычно средняя энергия электронов меньше порога возбуждения излучающих электронных состояний, и потому основную роль играют электроны с энергией лишь немного превышающей пороговую. Второй случай ($v'_e \approx v_e$) реализуется при возбуждении пучком электронов со скоростями, значительно превышающими скорость v_a атомных электронов, например, при зондировании потоков газа.

В первом случае в качестве v возьмем наиболее вероятную тепловую скорость $v_H = \sqrt{2kT/M}$ (T — температура газа, k — постоянная Больцмана), а v_e примем соответствующей порогу воз-

возбуждения v_e^{th} . Тогда относительное изменение скорости $\Delta\omega$ атома при столкновении с электроном дается выражением

$$\Delta\omega = \Delta v/v_H = n_e v_e^{th} / \sqrt{2kT_H}. \quad (I)$$

Таблица I.

Атом, молекула	Порог возбуждения, эВ	$v_e^{th}, 10^{-8}$ см/с	$\Delta\omega$	
			T = 100 K	T = 300 K
H (n = 4)	12,75	2,12	90	52
H ₂ (d ³ Π)	13,87	2,21	66	38
D ₂ (d ³ Π)	13,88	2,21	47	27
He(3d ¹ D)	23,07	2,85	60	35
N ₂ (c ³ Π)	11,03	1,97	16	9
Oo(v ¹ Σ)	10,77	1,88	15	99

В табл. I даны значения $\Delta\omega$ (в %) для некоторых атомов и молекул.

Видно, что, несмотря на разницу в массах между тяжелыми частицами и электронами, при возбуждении атомов и молекул возможно ощутимое изменение скорости их поступательного движения.

Возбуждение атомных частиц быстрыми электронами (второй случай) хорошо изучено. Основную роль здесь играют столкновения с рассеянием электронов на малые углы, когда максимальный передаваемый импульс $p_{max} \approx m_e v_a / 1/$. Поскольку $v_a \sim v_e^{th}$, то и здесь для оценки $\Delta\omega$ пригодна формула (I).

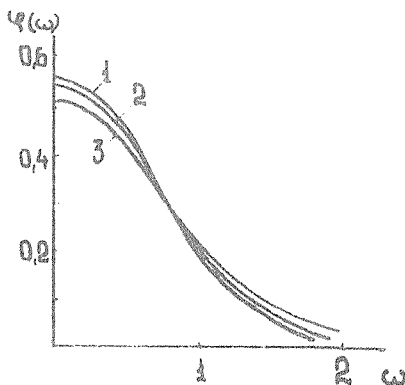
Рассмотрим уширение линий, связанное с изменением скорости атома при возбуждении. Если до возбуждения распределение атомов по скоростям максвелловское, а распределение электронов по скоростям изотропно, что типично для плазмы, то контур линии описывается формулой $\varphi(\omega)$

$$\varphi(\omega) = (1/4\Delta\omega) [\text{erf}(\omega + \Delta\omega) - \text{erf}(\omega - \Delta\omega)], \quad (2)$$

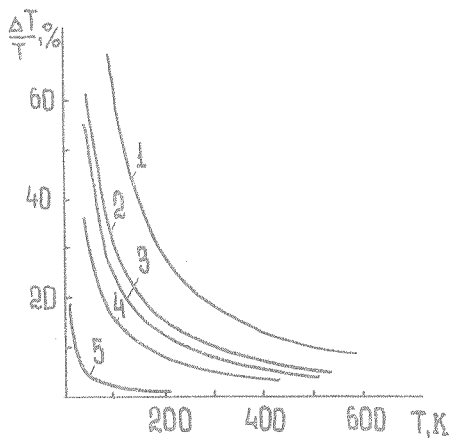
где $\omega = v/v_H$. При возбуждении не электронным пучком распределение скоростей молекул в направлении наблюдения (обычно по нормали к оси пучка /2/) не меняется и контур линии - обычный доплеровский (гауссовский) /3/

$$\varphi_D(\omega) = \pi^{-1/2} e^{-\omega^2}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлены контуры линий, нормированные на единичную площадь. Контур (2) шире гауссовского, и их ширина возрастает с $\Delta\omega$. Для $\Delta\omega = 0,3$ отличие от гауссовского контура по ширине около 3%, а при $\Delta\omega = 0,6$ - 1%. На рис. 2 представлены зависимости погрешности $\Delta T/T$ при определении температуры по ширинам спектральных линий некоторых атомов и молекул от истинной температуры газа из-за неучета этого фактора. Если для измерений используются линии сравнительно тяжелых молекул (N_2 , CO), то при типичных для газоразрядной плазмы температурах погрешность пренебрежимо мала. Для легких частиц ситуация иная. Так, $\Delta T/T > 10\%$ для атома H при $T < 550$ К, для N_2 - при $T < 300$ К, для He - при $T < 250$ К и D_2 - при $T < 150$ К.



Р и с. 1. Контур спектральных линий: 1 - гауссовский контур (3); 2 и 3 - контуры, описываемые формулой (2) при $\Delta\omega = 0,3$ (2), $\Delta\omega = 0,6$ (3)



Р и с. 2. Температурная зависимость систематической погрешности $\Delta T/T$ при определении температуры по ширинам спектральных линий H (1), N_2 (2), He (3), D_2 (4) и N_2 , CO (5)

Были проведены измерения температуры нейтрального газа тлеющего разряда в смесях CO-He (1:3), N_2 - D_2 -He (1:1:6), D_2 -He (1:3) при давлении 0,2 торр, плотности тока 10 мА/см² и охлаждения разрядной трубки жидким азотом. Экспериментальная установка описана в /4/. Температура определялась по относительным интенсивностям вращательных линий (0,1) полосы системы Ангстрема CO и по ширинам линий He ($\lambda = 6678,15 \text{ \AA}$), $N_2(Q(1)$ — линия (0,0) полосы α -системы Фулжера) и $D_2(R(0)$ — линия (0,0) полосы α -системы Фулжера). Получены значения $T_{CO} = (120 \pm 10) \text{ K}$, $T_{He} = (165 \pm 10) \text{ K}$, $T_{N_2} = (170 \pm 10) \text{ K}$, $T_{D_2} = (130 \pm 10) \text{ K}$.

В исследуемых условиях величина вращательного кванта CO много меньше средней энергии поступательного движения и вращательная температура T_{CO} равна газовой /5/. Температуры, определенные по ширинам линий легких частиц, как и ожидалось, выше температуры газа. Заметим, что измеренная величина $\Delta T/T$ несколько больше, чем это следует из рис. 2. Это объясняется тем, что в (1) и на рис. 2 не учтен вклад электронов со скоростями $v_e > v_e^{th}$. Анализ, проведенный для N_2 с использованием сечений

/6/, показал, что основную роль в возбуждении $H_2(d^3\Pi)$ электронами с температурами $T_e = (3 - 6)$ эВ играют электроны с энергиями (17 - 18) эВ, что превышает порог на (3 - 4) эВ. Расчет для соответствующей энергии (17 - 18) эВ дает значение $\Delta T = 40$ К и истинная температура газа, определяемая по линии Q(1), $T_{H_2} = T_{H_2} - \Delta T = (130 \pm 10)$ К, хорошо согласуется с измерениями по относительным интенсивностям вращательных линий O0.

Таким образом, оценки и измерения говорят о практической необходимости учета влияния возбуждающих электронов на контуры спектральных линий.

Авторы благодарны Н. Н. Соболеву и В. Н. Очкину за обсуждения.

Поступила в редакцию
4 февраля 1983 г.

Л и т е р а т у р а

1. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Квантовая механика. Нерелятивистская теория, "Наука", М., 1974 г., с. 752.
2. E. P. Muntz, Phys. Fluids, 11, 64 (1968).
3. Л. А. Вайнштейн, И. И. Соболев, Е. А. Югов, Возбуждение атомов и уширение спектральных линий, "Наука", М., 1979 г., с. 319.
4. Д. К. Оторбаев и др., Препринт ФИАН № 39, М., 1981 г.
5. Д. К. Оторбаев и др., Письма в ЖЭТФ, 28, 424 (1978).
6. G. R. Möhlmann, F. J. De Heer, Chem. Phys. Lett., 43, 240 (1976).