

Л. М. ВОЛКОВА, К. В. ВАВИЛИН, А. М. ДЕВЯТОВ, М. А. ШЕРИФ

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ОТНОШЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Из анализа метода измерений было сделано заключение, что для однозначного определения электронной температуры в низкотермической плазме при низких давлениях по измеренным отношениям интенсивностей спектральных линий необходимо выполнение условия $|E_{k1} - E_{k2}| \geq kT_e$, где E_k — потенциал возбуждения, T_e — электронная температура.

Измерение электронной температуры T_e по отношению интенсивностей спектральных линий обычно применяется в тех случаях, когда уравнение баланса частиц на верхних уровнях может быть записано в виде

$$n_0 n_e \langle q_{ki}(v) v \rangle = n_k A_{ki}, \quad (1)$$

где n_e , n_0 , n_k — концентрация электронов и атомов в основном и в возбужденном состояниях, $q_{ki}(v)$ — оптическая функция возбуждения данной линии, A_{ki} — вероятность перехода, v — скорость электронов.

В работах [1, 2] показано, что уравнение (1) имеет место для плазмы с $n_e < 10^{11} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и $n_0 < 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В этих случаях интенсивность спектральной линии, соответствующей переходу $k \rightarrow i$, имеет вид

$$I_{ki} = n_0 n_e h \nu_{ki} \int_{E_k}^{\infty} q_{ki}(E) f(E) \sqrt{E} dE, \quad (2)$$

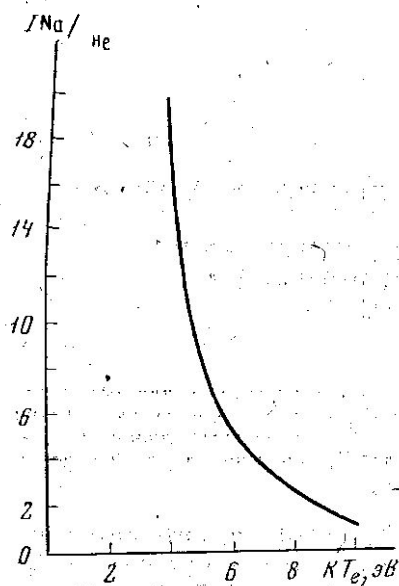
где E_k — пороговая энергия возбуждения данной линии, $f(E)$ — максвелловская функция распределения электронов по энергиям.

Отношение интенсивностей двух линий

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\nu_1 n_{01} \int_{E_{k1}}^{\infty} q_1(E) f(E) \sqrt{E} dE}{\nu_2 n_{02} \int_{E_{k2}}^{\infty} q_2(E) f(E) \sqrt{E} dE} \quad (3)$$

зависит от электронной температуры. Эта зависимость тем сильнее, чем больше различие в форме кривых функций возбуждения $q_1(E)$ и $q_2(E)$ и чем больше величина $|E_{k1} - E_{k2}|$.

В газоразрядной плазме в зависимости от рода и давления газа, размеров трубки и величины разрядного тока устанавливается такое распределение электронов по энергиям, что всегда $|E_{k1} - E_{k2}| < kT_e$. Поэтому отношение интенсивностей двух линий одного и того же



Градуировочная кривая отношения интенсивностей линий натрия ($\lambda = 5885 \text{ \AA}$) и гелия ($\lambda = 6678 \text{ \AA}$), рассчитанная по формуле (5).

возбуждения и ионизации. Так, для линий гелия и натрия отношение (3) при изменении kT_e от 4 до 10 эВ меняется примерно на порядок. На рис. 1 показана одна из кривых такой зависимости для отношения интенсивностей линий $NaI \lambda = 5885 \text{ \AA}$ и $HeI \lambda = 6678 \text{ \AA}$.

Следует отметить, что выгоднее выбирать линии гелия, у которых сечения возбуждения медленно убывают после максимума с увеличением энергии электронов, а линии легкоионизируемой примеси должны иметь функции возбуждения с узким максимумом. Из формулы (3) видно, что погрешности в определении электронной температуры в основном определяются погрешностями в измерениях интенсивностей спектральных линий и их эффективных сечений возбуждения. Для того чтобы уменьшить погрешности эксперимента нами измерялись как интенсивности линий, излучаемых плазмой, так и оптические функции возбуждения этих линий при одних и тех же условиях опыта. Для измерений оптических функций возбуждения спектральных линий к разрядной трубке был припаян отросток с электронной пушкой типа Ханле [6]. При таких измерениях в отношении (3) значения интенсивностей и сечений можно заменить показаниями измерительного прибора, не учитывая спектральной чувствительности ФЭУ.

элемента даже разных мультиплетностей очень слабо зависит от изменения электронной температуры. В гелиевой плазме, например, при изменении kT_e от 4 до 10 эВ отношение интенсивностей пар спектральных линий, вычисленное по формуле (3), изменяется в лучшем случае не больше, чем в 1,5 раза [3, 4, 5]. И если учесть большие погрешности определения интенсивности спектральных линий и эффективных сечений возбуждения, то станут понятными большие различия значений электронной температуры, получаемые по разным парам линий, которые наблюдаются в большинстве вышеуказанных работ.

Чтобы пользоваться описанным методом для определения электронной температуры, необходимо подобрать пары спектральных линий так, чтобы выполнялось условие

$$|E_{k1} - E_{k2}| \geq kT_e. \quad (4)$$

Это условие может быть выполнено, если выбрать такие пары спектральных линий, чтобы каждая из них принадлежала разным атомам или ионам с сильно отличающимися энергиями

При этом отпадает необходимость определения концентрации атомов n_{01}, n_{02} .

Таким образом, соотношение (3) примет вид

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\int_{E_{k1}}^{\infty} \gamma_1(E) f(E) \sqrt{E} dE}{\int_{E_{k2}}^{\infty} \gamma_2(E) f(E) \sqrt{E} dE} \quad (5)$$

где α_1, α_2 — показания прибора при измерении интенсивностей линий, излучаемых плазмой. $\gamma_1(E), \gamma_2(E)$ — показания прибора при измерении интенсивностей линий от электронного пучка. Погрешность определения электронной температуры T_e будет определяться только погрешностью измерения относительных интенсивностей.

По описанной схеме нами проводились измерения T_e в плазме постоянного тока для смеси гелия и натрия. Давление гелия было около 10^{-1} мм рт. ст., а давление паров натрия порядка 10^{-3} мм рт. ст., концентрация электронов $n_e \sim 10^{10}$ см $^{-3}$. Диаметр трубки равнялся 3 см. Для выбранных пар линий экспериментально проверялась применимость уравнения (1). Были измерены отношения интенсивностей четырех пар линий натрия и гелия и их оптические функции возбуждения, по которым рассчитывалась правая часть уравнения (5) в зависимости от электронной температуры. Затем по этим зависимостям определялась электронная температура. Относительный ход оптических функций возбуждения спектральных линий натрия и гелия, измеренный нами, совпадал с кривыми, приведенными в [6, 7]. Одновременно измерялось распределение электронов по энергиям методом второй производной тока на зонд, чтобы убедиться в существовании в данных условиях максвелловского распределения электронов по энергиям, а также для сравнения с электронной температурой, определенной зондовым методом, с данными, полученными по отношению интенсивностей спектральных линий.

Результаты измерения kT_e (эВ) приведены в таблице.

$\lambda_{Na}/\lambda_{He}$	раз, мА			
	25	35	50	100
8190/7281	6,5	6,7	5,6	6,5
6160/7065	8,2	6,2	5,9	6
5685/6678	8	5	6,1	6,3
4982/4922	7,2	6,2	6	5,9
kT_e ср	7,5	6	5,9	6,2
kT_e зонд	6,8	8,6	7,6	6,4

Из таблицы видно, что электронная температура, определенная по разным парам линий, хорошо согласуется между собой. Ее среднее значение в пределах погрешностей измерений (около 35%) совпадает с электронной температурой, определенной зондовым методом. На основании результатов наших измерений можно сделать заключение, что для однозначного определения электронной температуры в неизотермической плазме при низких давлениях по измеренным отношениям спектральных линий необходимо выполнение условия $|E_{h1} - E_{h2}| \geq kT_e$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Струнников В. М. «Оптика и спектроскопия», 20, 3, 1966.
2. Подгорный И. М., Шолин Г. В. ДАН СССР, 160, 575, 1965.
3. Sovie R. J. J. QSRT, 8, 833, 1968.
4. Latimer J. D., Mills J. I., Day R. A. JQSRT, 10, 629, 1970.
5. Schieber D., Gavril S., Erlicki. Plasma Physics, 12, 897, 1970.
6. Залесочный И. П., Фельцан П. В. «Украинский физический журнал», 10, 1197, 1965.
7. Залесочный И. П. «Теплофизика высоких температур», 5, 7, 1967.

Поступила в редакцию
28.6 1972 г.

Кафедра
электроники