

Измерение температуры электронов по относительной интенсивности спектральных линий

Составитель и ведущий преподаватель:
Лившиц Александр Маркович

1. Измерение температуры электронов по относительной интенсивности спектральных линий

При спектроскопическом исследовании плазма рассматривается как система частиц, взаимодействие между которыми определяет основные характеристики плазмы и, в частности, создает поле излучения.

Возникает излучение в результате изменения энергетического состояния электронов в поле атома или иона. Свободные электроны излучают в поле атома или иона непрерывный спектр; связанные электроны, переходя с одного уровня на другой, создают линейчатый спектр плазмы. Для теоретического описания излучения плазмы строятся различные модели плазмы, которые учитывают наиболее важные для данного типа плазмы процессы. Измеренные в эксперименте потоки излучения интерпретируются на базе таких моделей и дают возможность судить о процессах, происходящих в плазме.

Такой подход широко используется в астрофизике, где излучение, как правило, является единственным доступным измерению носителем информации об излучаемом объекте.

Спектроскопические методы позволяют измерять такие важные параметры плазмы, как температура и плотность электронов, определять химический состав плазмы.

В настоящей работе показывается, как измерять температуру электронов в плазме, если плазма находится в состоянии так называемого локального термодинамического равновесия (ЛТР).

В модели ЛТР предполагается, что главную роль в процессах в плазме играют столкновения частиц между собой. В результате многократных столкновений и обмена энергией между частицами устанавливается некоторое статическое распределение всех частиц

плазмы по энергиям. Причем столкновения происходят настолько часто, что при любом изменении условий в плазме практически мгновенно восстанавливается соответствующее распределение.

Легче всего обмениваются друг с другом энергией электроны. Поэтому для свободных электронов раньше всего устанавливается распределение скоростей, описываемое известной формулой Максвелла:

$$dN_e^{(v)} = N_e 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k T_e} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT_e} \right) v^2 dv. \quad (1)$$

Таково количество электронов, имеющих скорость в пределах от v до $v + dv$ при полной плотности электронов N_e . Параметр этого распределения – величину T_e – и называют температурой электронов.

Возбуждение связанных электронов в атомах или ионах также происходит в результате столкновений. Следует отметить, что каждому процессу в плазме можно сопоставить обратный ему процесс: возбуждение – девозбуждение, ионизация – рекомбинация и т.д. Согласно принципу детального равновесия скорости прямых и обратных процессов равны. Поэтому в результате устанавливается такое распределение электронов по энергетическим уровням, которое было бы при полном термодинамическом равновесии.

В этом случае количество возбужденных атомов, в которых внешний электрон находится на уровне с энергией E (отсчитанной от основного состояния), определяется законом Больцмана:

$$N^* \sim N_o \exp \left(-\frac{E}{kT_e} \right). \quad (2)$$

Параметром опять является температура электронов, а в коэффициент пропорциональности входят только атомные константы.

Отсюда появляется возможность определить температуру электронов путем измерения количества возбужденных атомов. О количестве возбужденных атомов можно судить по количеству испускаемых ими фотонов (правда, бывают такие возбужденные состояния, переход с которых с излучением невозможен).

На практике обычно измеряют пропорциональную числу испускаемых фотонов интенсивность спектральной линии, под которой понимается мощность излучения данной частоты, испускаемой плазмой в некоторый телесный угол, задаваемый условиями эксперимента.

Единичный объем плазмы испускает в единичный телесный угол интенсивность линии, равную

$$I_{ki} = \frac{1}{4\pi} n_k A_{ki} \hbar \omega_{ki} = \frac{1}{4\pi} n_o \frac{g_k}{g_o} A_{ki} \hbar \omega_{ki} \exp\left(-\frac{E_k}{kT_e}\right). \quad (3)$$

Здесь индекс k соответствует рассматриваемому уровню (см. рис. 1), n_k и n_o – плотности возбужденных атомов и атомов в основном состоянии, g_k и g_o – статические веса уровней, A_{ki} – вероятность излучательного перехода с уровня k на уровень i , $\hbar \omega_{ki} = E_k - E_i$.

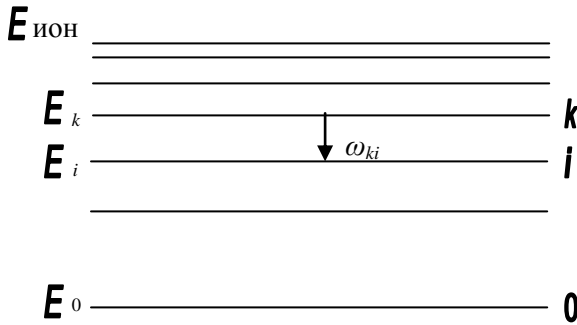


Рис. 1

Вместо вероятности перехода часто пользуются так называемой силой осциллятора перехода f_{ik} , которая связана с вероятностью перехода A_{ki} через атомные константы:

$$A_{ki} = \frac{2e^2}{mc^3} \omega_{ki}^2 f_{ik} \frac{g_i}{g_k}. \quad (4)$$

Измерив интенсивность линии и зная вероятность или силу осциллятора перехода, можно, пользуясь формулой (3), определить

температуру электронов. Однако измерение абсолютной интенсивности линий – задача очень непростая. Можно определить температуру электронов по относительной интенсивности линий, сравнивая между собой интенсивности двух линий:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{g_2}{g_1} \frac{f_2}{f_1} \frac{\omega_2^3}{\omega_1^3} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT_e}\right). \quad (5)$$

Здесь ΔE – разность энергий возбуждения исследуемых линий. Чтобы определение T_e из (5) было достаточно надежным, необходимо, чтобы ΔE было сравнимо с kT_e : $\Delta E \geq kT_e$.

Ошибка в измерении может возникать и в том случае, если фотон на пути от излучившего атома до границ плазмы испытывает многократное поглощение другими атомами. Из-за большого числа столкновений возбужденное состояние поглотившего фотон атома может разрушиться без излучения и из плазмы выйдет меньше фотонов, чем было первоначально испущено. Эффективность поглощения определяется силой осциллятора и количеством атомов в нижнем состоянии, поэтому искажения, связанные с так называемой диффузией излучения, более вероятны для более сильных линий.

Итак, применимость выражения (5) для определения T_e из относительной интенсивности линий имеет одно принципиальное ограничение: необходимо иметь уверенность в справедливости предположения о наличии ЛТР в изучаемой плазме.

Если ЛТР имеет место, то нужно аккуратно выбрать линии, чтобы точность измерения T_e соответствовала поставленной задаче.

В настоящей работе объектом исследования является дуговой разряд в парах ртути, который возбуждается в стандартных ртутных лампах типа ПРК-2 или ПРК-4. В таком разряде достигается высокая плотность частиц, и можно считать, что ЛТР имеет место.

В спектре ртути для измерения T_e по относительной интенсивности спектральных линий можно использовать следующие линии:

$$\begin{array}{ll} 1) \quad \lambda_1 = 3650,15 \text{ \AA}; & g_1 f_1 = 13; \quad E1 = 8,86 \text{ эВ.} \\ \lambda_2 = 4046,56 \text{ \AA}; & g_2 f_2 = 8,8; \quad E2 = 7,73 \text{ эВ.} \end{array}$$

2. Измерение относительной интенсивности спектральных линий

В настоящей работе для измерения относительной интенсивности спектральных линий используется малогабаритный спектрометр, выполненный на базе вогнутой нарезной дифракционной решетки. Вогнутая дифракционная решетка одновременно создает изображение всей рабочей области спектра на круге Роуланда (см. [1, 2]). Для регистрации разложенного спектра используется система приборов с зарядовой связью (ПЗС) (см. [6]), расположенных на том же круге Роуланда. Этот тип фотоприемников отличается рядом особенностей. Главное достоинство этого приемника, которое используется в данной работе, – возможность измерять не только интенсивность падающего излучения, но также и его пространственное распределение. ПЗС представляет длинную цепочку маленьких фотодиодов, изолированных друг от друга. Размер одного фотодиода – 8 мкм х 200 мкм, их число – 3700, общая длина цепочки – 30 мм. Управление системой регистрации и обработку сигналов, полученных с ПЗС, осуществляет электронная схема, которая передает информацию в ЭВМ.

Излучение ртутной лампы по кварцевому световоду направляется в спектрометр и после разложения в спектр падает на пять ПЗС (позиций). Каждая ПЗС регистрирует свою область спектра: первая – от 200 нм до 242 нм, вторая – от 242 нм до 284 нм, третья – от 284 нм до 326 нм, четвертая – от 326 нм до 368 нм, пятая – от 368 нм до 410 нм. Поэтому линия 3650,15А располагается на четвертой позиции, а линия 4046,56А – на пятой позиции.

3. Порядок выполнения работы

Работа выполняется в следующем порядке:

- 1) Включить ЭВМ. После окончания загрузки операционной системы Windows XP запустить программу SP. Для этого нужно произвести двойной щелчок мышью на иконке с соответствующим

названием, расположенной на рабочем столе монитора. На экране монитора должно появиться главное окно программы SP. В этом окне производятся операции при проведении эмиссионного спектрального анализа.

2) Выполнить команду меню **Методика/Спектр**, после чего на экране появится окно наблюдения падающего на ПЗС спектра в реальном времени.

3) В верхнем левом углу окна располагается переключатель номеров позиций. Включить четвертую позицию.

4) Включить ртутную лампу. Расположить входной торец световода на расстоянии 5–8 см от ртутной лампы, направив его в сторону выходного отверстия лампы.

5) Щелкнуть мышью на кнопку **Пуск**. При этом с периодичностью в 0.1 секунды на экран монитора будет выводиться зарегистрированный спектр в четвертой позиции. Для остановки вывода спектра на экран и для фиксации последнего выведенного кадра нужно мышью щелкнуть на кнопку **Стоп**. Для продолжения вывода опять нажать кнопку **Пуск**.

6) В течение пяти минут можно наблюдать постепенное увеличение интенсивностей спектральных линий, после чего величина спектральных линий стабилизируется. Это возникает из-за разгорания ртутной лампы и выхода ее в рабочий режим.

7) Пользуясь таблицами спектральных линий, найти в зарегистрированном спектре выбранные спектральные линии и вычислить их абсолютные интенсивности. Для этого из величины интенсивности в максимуме исследуемой линии нужно вычесть величину интенсивности спектрального фона, на котором располагается эта линия.

8) Найти логарифмы отношений интенсивностей линий и определить температуру T_e разряда, пользуясь формулой (5). Формулу (5) удобно переписать в следующем виде:

$$kT_e = \frac{-\Delta E}{\left\{ \ln \frac{I_2}{I_1} - \ln \left[\frac{g_2 f_2}{g_1 f_1} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^3 \right] \right\}}$$

где $k = 8,6 \cdot 10^{-5}$ эВ/град.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И.* Техника и практика спектроскопии. – М.: Наука, 1976. Гл. 3, 4, 12.
2. *Лебедева В.В.* Экспериментальная оптика. – М.: изд. МГУ, 1994. Гл. 5, 9.
3. *Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы.* – М.: Наука, 1974. Гл.4
4. *Лукьянов С.Ю.* Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. – М.: Наука, 1975. Гл. 7.
5. *Зайдель А.Н. и др.* Таблицы спектральных линий. – М.: Наука, 1977.
6. *Пресс Ф.П.* Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1981.