

**Определение спектральных схем для лазерной флуоресцентной диагностики
низкотемпературной ксеноновой плазмы**

Д.Д. Криворучко, А.В. Скрылев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Спектральные методы хорошо зарекомендовали себя для определения параметров плазмы. В отличие от зондовой диагностики оптические измерения не вносят возмущения в изучаемый объект и обладают высокой избирательностью по отношению к различным сортам и состояниям частиц.

Для диагностики плазменной струи электрических двигателей используется спектральный метод Лазерной Индуцированной Флуоресценции (ЛИФ) [1]. Данный метод позволяет определить скорости плазмообразующих частиц, их концентрации, а также концентрацию и температуру электронной компоненты с временным и пространственным разрешением вплоть до 1 мм^3 [2]. Применение метода ЛИФ для исследования параметров ксеноновой плазмы ограничивается: существованием нужного спектрального перехода и объемом накопленных знаний о кинетических и квантовых константах, необходимых для интерпретации получаемых данных. Помимо теоретических ограничений существуют и практические, которые заключающиеся в технических возможностях спектрального оборудования.

В качестве рабочего тела в плазменных ускорителях используют ксенон особой чистоты (99,99999 %). Это тяжелый инертный газ, имеющий 9 стабильных изотопов. В зависимости от исследуемого перехода изотопы приводят к различному уширению спектральных линий. Данное явление накладывает ограничения на применяемые диагностические схемы. Кроме того, уровни ксенона обладают тонкой и сверхтонкой структурами. В зависимости от исследуемого энергетического перехода, расщепления могут вносить до 50 % погрешности при использовании классических подходов в интерпретации получаемых спектров, а порой делают невозможным извлечение полезных данных из спектра. Другими словами, точность экспериментальных данных, полученных ЛИФ методом, напрямую зависит от параметров исследуемого энергетического перехода.

В работе были исследовано более 10 спектральных схем. Накачка для обоих видов частиц проводилась на метастабильные уровни: $6s' [1/2] 1, 6s [1/2] 0, 6s [3/2] 2$ и $5d [4] 7/2, 6p [2] 5/2, 5d [3] 7/2$ для атомов и ионов соответственно [3]. Регистрация производилась на следующих подуровнях: $6p$ и $6s$ - для атомов, $4s'$ - для ионов. При выборе переходов помимо теоретических интенсивностей переходов (например, взаимодействие между подуровнями $p4s$ и $p4d$ мало, а вот между $5s5p6$ и $5s5p4nd$ значительно) учитывался измеренный экспериментальный спектр, на котором наблюдалось неожиданное тушение атомарного $5d$ подуровня. Возбуждение исследуемых частиц и прием флуоресцентного сигнала проводились по трехуровневой схеме. Сигнал детектировался в течение короткого промежутка времени, синхронизированного с пиком интенсивности лазерного импульса. Экспериментально была подтверждена возможность регистрации излучения для 4-х спектральных схем, для которых известны основные квантовые константы и сечения переходов. Аналитические оценки показали, что при исследовании перехода электронов в атоме ксенона с $6s3/2 2$ на $6p$ подуровень, изменение температуры электронной компоненты в диапазоне от 1 до 6 эВ слабо влияет (отклонения не превышает 25%) на заселенность выбранных термов. Таким образом, интенсивность флуоресценции, измеренная по описанной схеме, можно принять не зависящей от температуры электронной компоненты. Соответственно интенсивность получаемого флуоресцентного сигнала зависит только от концентрации выбранного сорта частиц, что упрощает интерпретацию данных на выбранном переходе, но не позволяет определить электронную температуру. Теоретические расчеты на основе коэффициентов фотоионизации [4, 5] показали, что возмущение, вносимое лазерным излучением, не превышает 5 %.

Литература

1. *Демтредер В.* Современная лазерная спектроскопия. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2014. 1072 с.

2. Andrea Lucca Fabris · Christopher V. Young · Mark A. Cappelli. Time-resolved laser-induced fluorescence measurement of ion and neutral dynamics in a Hall thruster during ionization oscillations // *Journal of Applied Physics*. 2015. DOI: 10.1063/1.4937272
3. *Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team*. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.3)// <http://physics.nist.gov/asd>.
4. *James A. R. Samson and J. L. Gardner*. Photoionization Cross Sections of the Outer s-Subshell Electrons in the Rare Gases// *Phys. Rev. Lett.* 1974. V. 33, N 12. P. 671-673.
5. *Samson J.A.R., Stolte W.C.* Precision measurements of the total photoionization cross-sections of He, Ne, Ar, Kr, and Xe // *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2002. V. 123. P. 265–276.