

Жеенбаев Н.Ж.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭМИССИОННОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В НЕРАВНОВЕСНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

N.Zh. Zheenbaev

APPLYING OF THE MOLECULAR EMISSION SPECTROSCOPY FOR TEMPERATURE DETERMINATION IN NO-EQUILIBRIUM LAW TEMPERATURE PLASMA

УДК: 530:145:539.1(04)

В работе представлены результаты исследований применения методов молекулярной спектроскопии для изучения низкотемпературной неравновесной плазмы. Показана возможность использования вращательных распределений в электронном спектре N_2^+ для определения температуры плазмы.

The results of investigations of applying molecular spectroscopy methods for studying law temperature non-equilibrium plasma are presented in this work. The possibility of using rotational distribution in electronic spectra of N_2^+ for temperature determination is shown.

Сегодня низкотемпературная неравновесная плазма широко используется в плазмохимической промышленности, в плазменной обработке материалов, в плазменной металлургии и во многих других отраслях. Хорошо известны плазменные двигатели, различные виды газоразрядных устройств и их использование для квантовых генераторов, широкое применение получили дуговые генераторы плазмы и, это лишь некоторые примеры использования низкотемпературной плазмы. Однако расширяющийся круг природных явлений и технических устройств, в которых встречается низкотемпературная неравновесная плазма, настоятельно требует углубления научно-исследовательских работ и ставит перед учёными множество задач, решение которых, в первую очередь, должно обеспечить получение более полных знаний о такой сложной плазменной системе.

Для развития методов исследования низкотемпературной плазмы приоритетным является развитие и применение доступных экспериментально обоснованных методов диагностики, позволяющих получить надёжную информацию о физико-химических процессах, протекающих в плазме. Но получить искомую надёжную информацию не всегда представляется возможным. Трудность исследования физико-химических процессов в низкотемпературной плазме состоит в сложности многочисленных происходящих процессов, их взаимообусловленности и коррелированности. Поэтому в исследованиях физики плазмы, одними из наиболее доступных и информативных являются методы эмиссионной атомной и молекулярной спектроскопии, позволяющие получать информацию непосредственно из аналитической зоны источника возбуждения спектров.

Одним из таких сложных плазменных объектов, где применяется низкотемпературная плазма и, где

присутствует частичное или полное неравновесие между степенями свободы частиц, является дуговой генератор плазмы - двухструйный плазматрон. Для плазматронов зачастую довольно сложно разработать корректные методы диагностики низкотемпературной плазмы, поскольку в условиях имеющейся неравновесности и высоких энерговкладов, как правило, происходят интенсивные физико-химические превращения исходного состава. Особо наглядно неравновесное состояние плазмы в двухструйных плазматронах проявляется в области до слияния плазменных струй [1], из-за наличия более «холодных» областей потока плазмы, которые создаются благодаря довольно большому углу между плазменными струями.

Однако именно эта технологическая область дуговых генераторов плазмы широко используется при спектральном анализе жидкостей, что позволяет решать различные экологические задачи, в частности определять содержание тяжелых металлов в природных и питьевых водах. Для широкого использования данной технологической (рабочей) области плазмы на практике, требуется знание температуры газа до слияния струй, а также ее зависимость от других параметров плазмы. Но попытки комплексных измерений температурного режима, которые начали проводиться только в последнее время, в двухструйном плазматроне до слияния струй при введении жидких проб традиционными спектроскопическими методами, основанных на наличии локального термодинамического равновесия, встретили серьезные затруднения. Для авторов работ [1] задача определения температуры в исследуемой области осложнялась отсутствием больцмановской прямой для построения традиционного температурного графика.

Объяснением такого увеличения неравновесности является возникновение эффекта подсоса анализируемого вещества в поток плазмы. Явление подсоса, было открыто создателями двухструйного плазматрона [2,3]. Результатом такого естественного подсоса воздушной массы или вводимого вещества является возникновение разрядной зоны пониженного давления ниже области слияния токоведущих струй, основные процессы нагрева в которой следует рассматривать строго с точки зрения отклонения от условий ЛТР. С понижением давления, т.е. в случае когда вследствие уменьшения частоты столкновений частиц преобладающими становятся неравновесные процессы, для диагностики низкотемпературной

плазмы в исследуемой области могут быть привлечены методы молекулярной спектроскопии, в частности использование интенсивностей вращательных линий электронных спектров молекул. Однако для конкретного случая возможность применения методов молекулярной спектроскопии должна быть обоснована.

Исходным положением для измерения поступательной температуры методом относительных интенсивностей во вращательной структуре берется предположение о возбуждении вращательных уровней молекул прямым электронным ударом, а также то, что в этом процессе возбуждения легкий электрон не может передать молекуле дополнительного момента количества движения. Если возбуждение молекул в электронные состояния происходит прямым электронным ударом, то должно происходить копирование вращательных распределений в основном и возбужденных состояниях. В этих условиях имеет место и известное соотношение между вращательными температурами возбужденного и основного состояний:

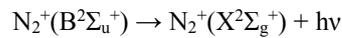
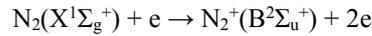
$$V_{вр}^*/T_{вр}^* = V_{вр}^0/T_{вр}^0 \quad (1)$$

где V_v^* и V_v^0 – вращательные постоянные возбужденного и основного электронных состояний, соответственно. Выражение (1) дает возможность измерять вращательное распределение в основном состоянии по распределению интенсивностей линий вращательной структуры при радиационных переходах из возбужденных электронных состояний. Полученная таким образом вращательная температура основного состояния молекулы отождествляется с температурой газа в потоке плазмы.

При этом возникновение зоны пониженного давления, что отмечено выше, не является непреодолимым препятствием для измерения температуры газа. Выражение (1) не является необходимым условием, хотя и обеспечивает возможность применения метода относительных интенсивностей при исследованиях вращательной структуры в двухструйных плазматронах. Даже если время жизни возбужденного электронного состояния меньше, чем время между газокинетическими соударениями, температуру нейтрального газа можем определить в случае когда: **а)** состояние, из которого производится возбуждение, характеризуется наличием равновесия между вращательными и поступательными степенями свободы, **б)** известен закон изменения характера вращательных распределений при возбуждении.

Поэтому для обоснования использования метода необходимо рассмотреть анализ условий заселения и распада излучающих электронных состояний, происходящих в области до слияния струй. Для определения температуры газа был выбран спектр излучения молекулярного иона азота (0-0 полоса, переход $\hat{A}^2 \sum_u^+ \rightarrow X^2 \sum_g^+$). Согласно полученным данным, при средних (пониженных) давлениях возбуждение вращательных уровней молекул

прямым электронным ударом является основным процессом заселения, а тушение происходит за счет радиационного распада.



где $h\nu$ – излучение первой отрицательной системы полос.

Такой механизм часто реализуется в разрядных зонах с малой степенью ионизации, что характерно для области до места слияния плазменных струй. Тогда, в условиях исследуемой низкотемпературной неравновесной плазмы при возбуждении прямым электронным ударом из основного состояния можно использовать метод относительных интенсивностей во вращательной структуре. Равновесие вращательных состояний может быть нарушено, если имеется мощный селективный источник накачки или разрушения какой либо группы вращательных уровней, что не наблюдается в исследуемых дуговых генераторах плазмы.

Важным аргументом в пользу возможности использования метода является больцмановское распределение частиц по вращательным уровням, что получено нами во всех экспериментах, проводимых в области до слияния струй. На рис.1 представлена характерная для всех режимов измерений зависимость величины $\ln(I_{kkI} / S_{kkI})$ от $k(k+1)$, где I_{kkI} – интенсивность вращательной линии перехода $k \rightarrow k'$, S_{kkI} – фактор Хенля-Лондона, k и k' – квантовые вращательные числа. Прямолинейный характер зависимости на рис. 1 говорит в пользу больцмановского распределения молекул в электронно-возбужденном состоянии, что и позволяет ввести понятие вращательной температуры в возбужденном состоянии.

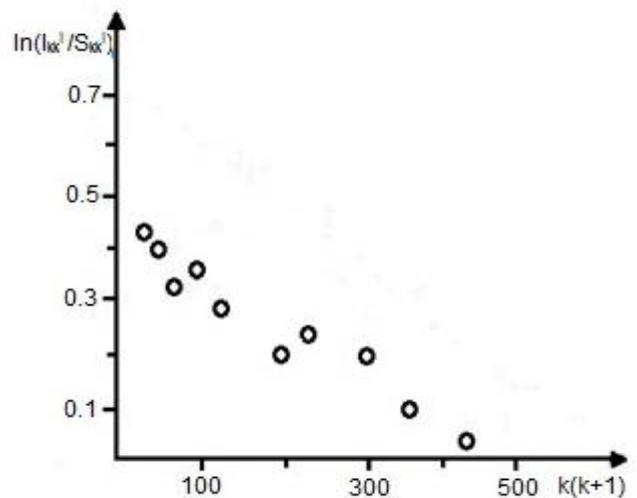


Рис. 2. Зависимость величины $\ln(I_{kkI} / S_{kkI})$ от $k(k+1)$ для вращательной структуры молекулярного иона азота.

Следующим шагом для подтверждения механизмов возбуждения и дезактивации, используемых

в работе электронно-колебательно-вращательных состояний молекул, стало проведение специальных экспериментов. Измерялась интенсивность отдельной вращательной линии (0-0) полосы в зависимости от силы тока в плазматроне в области до слияния струй на различных расстояниях от среза сопел – 10 мм и 23 мм. Данные измерений представлены на рис. 2 и рис.3.

Как видно из рисунков, во всех измерениях наблюдалась прямолинейная зависимость интенсивности вращательной линии от силы тока, что прямо говорит в пользу такого механизма возбуждения, как прямой электронный удар.

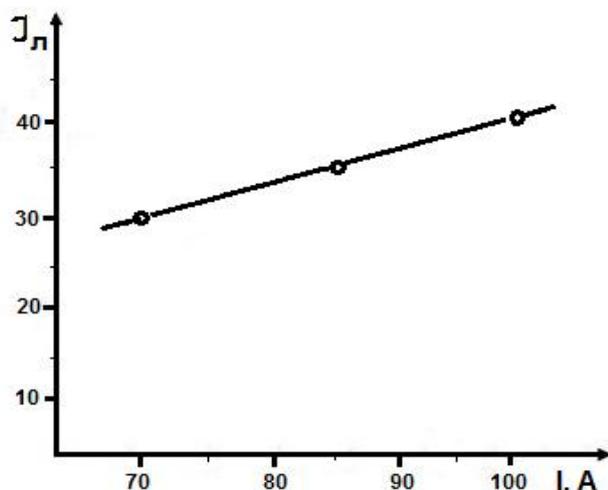


Рис. 2. Зависимость интенсивности вращательной линии R7 ($B^2 \Sigma_u^+ \rightarrow X^2 \Sigma_g^+, 0-0$) от силы тока на расстоянии $H=10$ мм от среза сопел. Интенсивность дана в относительных единицах.

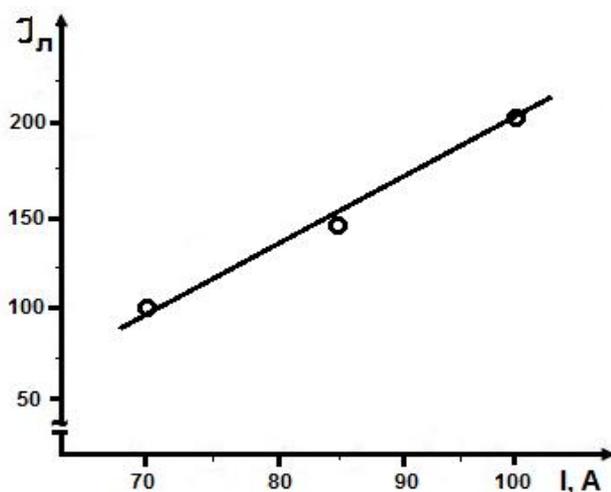


Рис.3. Зависимость интенсивности вращательной линии

R7 ($B^2 \Sigma_u^+ \rightarrow X^2 \Sigma_g^+, 0-0$) от силы тока на расстоянии $H=23$ мм от среза сопел. Величина интенсивности линии дана в относительных единицах.

Таким образом, вышеприведенные рассуждения и результаты экспериментальных исследований говорят о том, что газовую (поступательную) температуру в низкотемпературном неравновесном потоке плазмы в области до слияния струй можно измерять методом относительных интенсивностей во вращательной структуре молекулярного иона азота. Полученные результаты исследований температурного режима могут найти широкое практическое применение, а именно, используя эту “холодную” область двухструйного плазматрона можно проводить анализэлементного состава жидких проб, определять состав легколетучих элементов и наличие тяжёлых металлов в природных водах, т.е. решать проблемы экологического характера. Перспективным видится использование данного участка, обладающего особыми условиями нагрева, для анализа драгоценных металлов, в частности золота, в модернизированной конструкции двухструйного плазматрона ДГП-50М [4].

Литература:

1. Доржуева Г.Ж. Атомно-эмиссионное определение тяжелых металлов в жидкой пробе с возбуждением спектров на установке «НУР» // Наука и новые технологии. 2006. № 1. С. 13-18.
2. Asanaliev M.K., ZheenbaevZh. Investigation of two-jet plasmatron plasma flow and its application / high temperature dust laden jets in plasma technology. // Proc. Int. Workshop, 1988, Novosibirsk, p.555-571.;
3. Асаналиев М.К., Лелевкин В.М., Макешева К.К., Семенов В.Ф. Исследование характеристик двухструйного плазматрона. // Известия АН Киргизской ССР, серия физ.-техн. и мат.наук, 1989, №3, стр. 33-38;
4. Н.Жеенбаев, Э.Силькис. О возможности определения содержания золота в низкотемпературной плазме методами атомно-эмиссионной спектроскопии. // Известия НАН КР, 2013, №3, стр.17-21.

Рецензент: д.ф-м.н., профессор Татыбеков А.