

СПЕКТРАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ АЗОТНОЙ ПЛАЗМЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

А.С. Дикалюк^{1,2}

¹*Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского, Россия, Москва, 119526*

²*Московский физико-технический институт, Россия, Долгопрудный, 141700*

Аннотация

В данной работе приведены результаты расчетов спектральных интенсивностей излучения азотной плазмы тлеющего разряда постоянного тока. Оценка заселенности излучающих состояний, а так же колебательных и вращательных температур молекул азота выполнена путем анализа результатов работ [1] и [2]. Расчеты спектров выполнены с использованием модели перекрывающихся линий. Результаты, полученные численно, сопоставлены с экспериментальными данными.

SPECTRAL INTENSITY OF RADIATION OF DIRECT CURRENT GLOW DISCHARGE IN NITROGEN

A.S. Dikalyuk^{1,2}

¹*Institute for Problems in Mechanics RAS after A. Yu. Ishlinskii, Russia, Moscow, 119526*

²*Moscow Institute of Physics and Technology, Russia, Moscow, 141700*

In the paper results of the calculations of spectral intensity of radiation of direct current glow discharge nitrogen plasma are presented. Estimations of populations of emitting electronic states as well as vibrational and rotational temperatures of molecular nitrogen are based on the results of [1] and [2]. Spectra are calculated using the "just-overlapping" line model. Comparison of numerical and experimental results is carried out.

1. ВВЕДЕНИЕ

Работы по изучению структуры тлеющего разряда начались в первой половине XX века [3]. Для анализа этой проблемы использовались как теоретические подходы, так и экспериментальные. Например, в работах [4, 5, 7, 8] структура газового разряда рассчитывалась с использованием диффузионно-дрейфового приближения. Для экспериментального анализа проблемы применялись различные диагностические методики. Среди них: зондовые методы; масс спектрометрия; энергодисперсионная масс спектрометрия; оптические методы (оптическая эмиссионная спектроскопия и актинометрическая оптическая эмиссионная спектроскопия); лазерно-индуцированная флуоресценция и двойная резонансная лазерно-индуцированная флуоресценция; когерентная спектроскопия комбинационного рассеяния; оптическая интерферометрия и инфракрасная лазерная абсорбционная спектроскопия.

Среди диагностических методик, приведенных выше, особое место занимают оптические методы в силу того, что они не вносят возмущений в исследуемый объект. Для обработки результатов, получаемых с использованием оптических методов необходимо привлекать радиационно-столкновительные модели. Таким образом, возможно создание методики, позволяющей получать уникальную информацию о структуре газоразрядной плазмы.

Создание радиационно-столкновительной модели является весьма длительными и трудоемким процессом, который включает в себя сбор и анализ констант скоростей процессов, определяющих заселенность излучающих состояний атомов, молекул и их ионов, а

так же сопоставление результатов модели с доступными экспериментальными данными.

В данной работе представлены предварительные результаты расчетов спектральной интенсивности излучения низкотемпературной азотной плазмы. Расчеты спектров выполнены с использованием модели перекрывающихся линий. Параметры газоразрядной азотной плазмы для расчета излучения получены в результате анализа данных работ [1, 2]. В работе так же представлен анализ чувствительности спектральных распределений к входным параметрам, выполнено сопоставление с доступными экспериментальными данными.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

В работах [1, 2] выполнено экспериментальное исследование спектральных интенсивностей излучения плазмы, полученной в результате зажигания различных типов разрядов (тлеющий разряд постоянного тока, резонансный СВЧ-разряд, электронной СВЧ-разряд). Основное внимание уделялось регистрации излучения в полосах $N_2(C^3\Pi-B^3\Pi)$, $N_2(B^3\Pi-A^3\Sigma)$ и $N_2^+(B^2\Sigma-X^2\Sigma)$. Последующий анализ спектральных распределений, позволил авторам [1] и [2] определить вращательные и колебательные температуры, а так же заселенности электронно-возбужденных излучающих состояний молекул и ионов. Данные, полученные в результате обработки экспериментального материала, послужили в качестве основы при тестировании предложенной авторами радиационно-столкновительной модели.

Далее приведем параметры газоразрядной плазмы, полученные в [1, 2]. Вращательная температура молекул и молекулярных ионов в плазме тлеющего разряда постоянного тока зависит от давления нейтрального газа, при этом [1]: $T_{rot} = 460 \pm 30$ К при $p = 3.5$ Торр; $T_{rot} = 540 \pm 30$ К при $p = 7.0$ Торр, $T_{rot} = 580 \pm 35$ К при $p = 9.5$ Торр. При $p = 3$ Торр в прикатодной области (25 мм выше катода) $T_{rot}(N_2(C^3\Pi)) = 940$ К, $T_{rot}(N_2^+(B^2\Sigma)) = 550$ К [2].

В [2] приведены данные о зависимости вращательной и колебательных температур различных электронно-возбужденных излучающих состояний молекул от разрядного тока в прикатодном слое (25 мм выше катода) и в положительном столбе тлеющего разряда (125 мм выше катода). Согласно этим результатам при изменении разрядного тока в диапазоне $I = 17 \div 100$ мА колебательная температура в положительном столбе тлеющего разряда меняется следующим образом: $T_{vib}(N_2(C^3\Pi)) = 3700 \div 5500$ К, $T_{vib}(N_2(B^3\Pi)) = 7000 \div 8000$ К, $T_{vib}(N_2(X^2\Sigma)) = 1870 \div 4600$ К. Вращательная температура при этом составляет: T_{rot} (по $N_2(C^3\Pi)$) = 470 ÷ 940 К. В прикатодном слое при изменении разрядного тока в диапазоне $I = 17 \div 100$ мА колебательная температура состояния $C^3\Pi$ меняется немонотонно в диапазоне $T_{vib}(N_2(C^3\Pi)) = 6000 \div 7330$ К, в то время как колебательная температура состояния $B^3\Pi$ меняется монотонно в диапазоне $T_{vib}(N_2(B^3\Pi)) = 7400 \div 8000$ К (сходно с тем, что наблюдается в положительном столбе).

Заселенности излучающих состояний приведены в [1]. Для условий плазмы тлеющего разряда постоянного тока ($p = 0.1 \div 10$ Торр, $I = 0.3 \div 50$ мА) измеренное значение заселенности состояния $N_2(A^3\Sigma) - 10^{11} \div 10^{12}$ см⁻³. Заселенность состояния $N_2(C^3\Pi)$ меняется в диапазоне $10^7 \div 10^8$ см⁻³ при изменении тока разряда $I = 10 \div 90$ мА. Заселенность состояния $B^3\Pi$ молекулы N_2 можно оценить как $10^{12} \div 10^{13}$ см⁻³.

3. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В данной работе для расчета спектральной излучательной способности плазмы разряда используется модель усредненного по вращательной структуре спектра (Вт/(см³·мкм·ср)) [6]

$$j_\lambda = 3.202 \times 10^{-10} \frac{N_{eel}}{Q_{VR} \lambda^6} \times \sum_{V'} \sum_{V''} \frac{S_{VV''}}{|\Delta B_V|} \exp \left[-\frac{hc}{kT_V} E_{eel}(V') \right] \times \exp \left[-\frac{hc}{kT_R} \frac{B_{V'}}{\Delta B_V} (\omega - \omega_{VV''} + B_{V'}) \right]. \quad (1)$$

Здесь N_{eel} – заселенность электронно-возбужденных состояний молекул (см⁻³); $\omega = 10^4/\lambda$ – волновое число, см⁻¹; λ – длина волны, мкм; $\omega_{VV''}$ – волновое число электронно-колебательного перехода, см⁻¹; $\Delta B_V = B_{V'} - B_{V''}$; $B_{V'}$, $B_{V''}$ – вращательные постоянные соответствующих электронно-колебательных уровней; Q_{VR} – колебательно-вращательная статистическая сумма возбужденного электронного состояния; $S_{VV''}$ –

сила электронно-колебательного перехода; $E_{eel}(V')$ – колебательная энергия V' -го уровня возбужденного электронного состояния; T_V , T_R – колебательная и вращательная температуры соответственно. $S_{VV''}$ определяется следующим образом через квадрат момента электронного перехода $|R_{VV''}|^2$:

$$S_{VV''} = (2 - \delta_{0,\Lambda'+\Lambda''}) (2S + 1) |R_{VV''}|^2, \\ |R_{VV''}|^2 = \frac{3h}{64\pi^4 a_0^2 e^2} \frac{2 - \delta_{0,\Lambda'}}{2 - \delta_{0,\Lambda'+\Lambda''}} \frac{1}{\omega_{VV''}^3} \cdot A_{VV''}$$

Здесь $A_{VV''}$ – коэффициент Эйнштейна электронно-колебательного перехода; $\delta_{0,\Lambda}$ – символ Кронекера; S – квантовое число суммарного спина электронов. Коэффициенты Эйнштейна $A_{VV''}$ можно рассчитать, решив квантово-механическую задачу о вычислении электронно-колебательных волновых функций молекул. Значения $A_{VV''}$ зависят только от начального и конечного электронно-колебательного состояния молекулы, между которыми рассматривается переход. Это означает, что решив такого рода задачу для набора электронно-колебательных переходов, значения $A_{VV''}$ могут быть затабулированы для последующего использования.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа в данной работе были выбраны экспериментальные результаты, представленные в [1] (рис.1) и [2] (рис.9). В [1] на указанном рисунке приведен спектр излучения полосы $N_2(2+):C^3\Pi-B^3\Pi$ (для анализа был выбран спектральный диапазон 290 ÷ 390 нм), измеренный в плазме тлеющего разряда постоянного тока при $p = 10.0$ Торр, $I = 50$ мА. В [2] на указанном рисунке приведен спектр излучения полосы $N_2(1+):B^3\Pi-A^3\Sigma$, измеренный в плазме разряда постоянного тока при $p = 3.0$ Торр, $I = 17$ мА. Стоит отметить, что выбранные для исследования спектральные распределения представлены в безразмерных единицах в [1, 2].

Согласно данным, проанализированным в пункте 2, можно сделать следующие выводы относительно величин параметров необходимых для проведения спектральных расчетов. Вращательная температура молекул в плазме тлеющего разряда постоянного тока составляет ≤ 1000 К. Колебательная температура для различных электронно-возбужденных состояний различна. Для состояния $N_2(C^3\Pi)$ колебательная температура ~ 4500 К, для состояния $N_2(B^3\Pi) \sim 7000$ К. Заселенности состояний $N_2(C^3\Pi)$ и $N_2(B^3\Pi)$ соответственно 10^7 и 10^{13} см⁻³.

На рис. 1 приведены экспериментальные (○) и расчетные данные по излучению полосы $N_2(1+):B^3\Pi-A^3\Sigma$ в плазме разряда постоянного тока. Параметры разряда, а так же параметры, при которых рассчитывались спектры, представлены на рисунках. На рис. 1а при выполнении расчетного исследования колебательная температура излучающего состояния $N_2(B^3\Pi)$ была фиксирована $T_{vib}(N_2(B^3\Pi)) = 7000$ К, а вращательная варьировалась в диапазоне 500 ÷ 1500 К. На рис. 1б на-

оборот – вращательная температура молекул N_2 в состоянии $V^3\Pi$ была фиксирована $T_{rot}(N_2(V^3\Pi)) = 1000$ К, а колебательная менялась в диапазоне $6000 \div 8000$ К. Видно, что при повышении вращательной температуры повышается величина интенсивности излучения в промежутках между пиками. При этом она не зависит от

колебательной температуры. В результате можно заключить, что вращательная температура молекул N_2 в состоянии $V^3\Pi$ составляла величину ~ 1000 К. Величина интенсивности излучения в пиках зависит и от вращательной и от колебательной температуры.

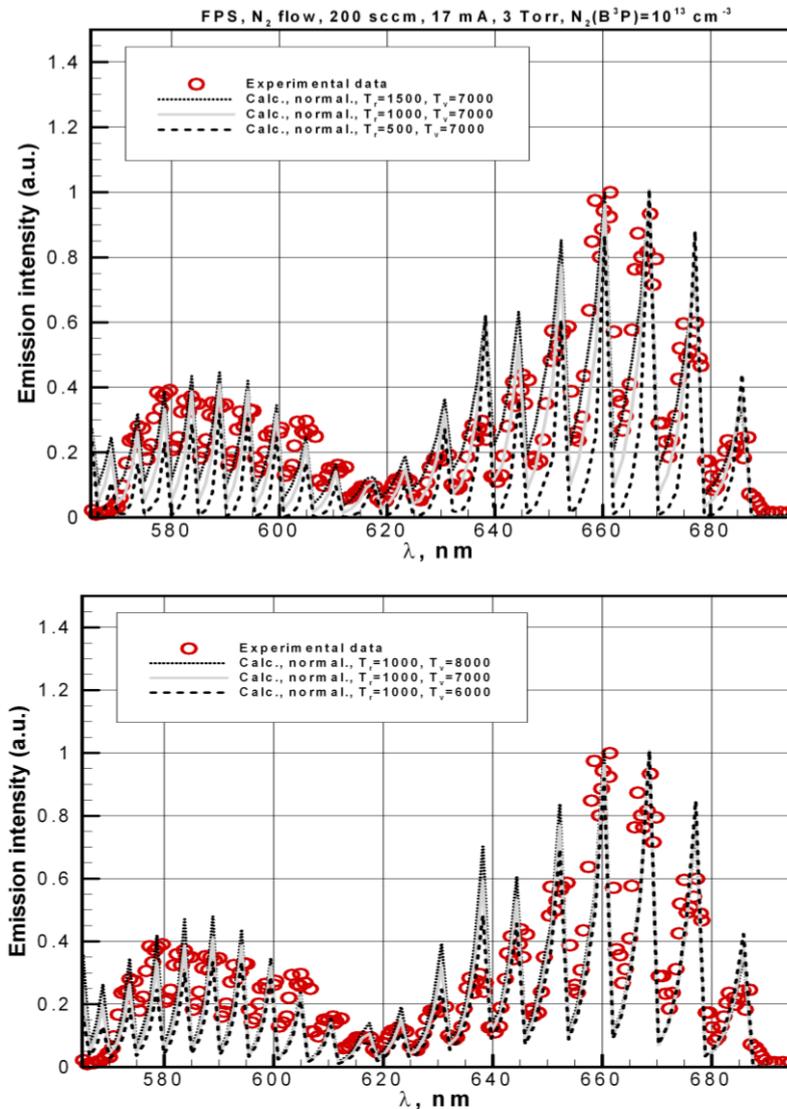


Рис. 1. Спектральные интенсивности излучения полосы $N_2(1+): V^3\Pi-A^3\Sigma$ разрядной плазмы постоянного тока в потоке N_2 : $p = 3$ Торр, $I = 17$ мА, скорость потока N_2 $200 \text{ см}^3/\text{мин}$. Экспериментальные данные – \circ , линии – расчетные данные

Анализ рис. 1 позволяет заключить, что колебательная температура молекул N_2 в состоянии $V^3\Pi$ составляет ~ 6000 К.

На рис. 2 приведены экспериментальные (\circ) и расчетные данные по излучению полосы $N_2(2+): C^3\Pi-V^3\Pi$ в области длин волн $290 \div 390$ нм. Параметры разряда, а так же параметры, при которых рассчитывались спектры, представлены на рисунке. При выполнении расчетов, согласно исследованию выполненному в пункте 2, вращательная температура молекул N_2 в состоянии $C^3\Pi$ была фиксирована $T_{rot}(N_2(C^3\Pi)) = 500$ К, колебательная менялась в диапазоне $3500 \div 5500$ К. Из рис. 2 видно, что при повышении колебательной температуры молекул величина интенсивности в пиках

возрастает. Данные представленные на рис. 2 позволяют заключить, что колебательная температура молекул N_2 в состоянии $C^3\Pi$ составляет ~ 4500 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнен расчетно-теоретический анализ экспериментальных спектральных интенсивностей излучений азотной плазмы, созданной с помощью различных разрядов. Вычисления выполнены с помощью модели перекрывающихся линий. По результатам расчетов восстановлены параметры газоразрядной плазмы. Так же проведен анализ чувствительности расчетных данных к входным параметрам.

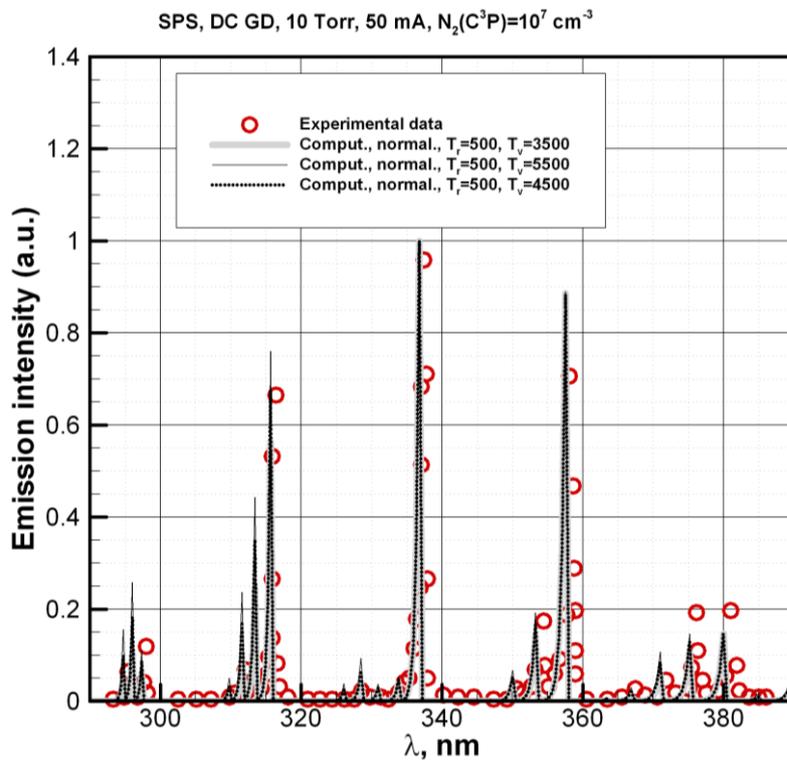


Рис. 2. Спектральные интенсивности излучения полосы $N_2(2+): C^3P-V^3P$ плазмы тлеющего разряда постоянного тока: $p=10$ Торр, $I=50$ мА. Экспериментальные данные – \circ , линии – расчетные данные

Автор выражает благодарность своему научному руководителю Суржикову С.Т. за плодотворные обсуждения проблемы. Работа выполнена в Лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН и на базовой кафедре МФТИ «Физическая и химическая механика» при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований, а так же в рамках Программы Фундаментальных Исследований РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шахатов В.А., Лебедев Ю.А. Исследование кинетики возбуждения $N_2(A^3\Sigma, v_A)$, $N_2(C^3P, v_C)$, $N_2(B^3P, v_B)$ в азотной плазме газовых разрядов методами эмиссионной спектроскопии и численного моделирования // ХВЭ. Т. 42. № 3. 2008. С. 207–241.
- Cicala G., De Tommaso E., Raino A.C., Lebedev Yu.A., Shakhmatov V.A. Study of positive column of glow discharge in nitrogen by optical emission and numerical simulation // Plasma Sources Sci. Technol. V. 18. 2009. 025032 (15pp).
- Von Engel A., Steenbeck M. Elektrische Gasentladungen. Berlin: Verlag Julius Springer, 1934.
- Dikalyuk A.S., Surzhikov S.T. The modeling of dust particles in a normal glow discharge: the comparison of two charged models // AIAA Paper. AIAA 2010-4310.
- Дикалюк А.С., Суржиков С.Т. Численное моделирование разреженной пылевой плазмы в нормальном тлеющем разряде // ТВТ. Т. 50. № 5. 2012. С. 611–620.
- Суржиков С.Т. Оптические свойства газов и плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. 575 с.
- Суржиков С.Т. Численный анализ структуры двух типов тлеющих разрядов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т.7. <http://chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-029.pdf>
- Дикалюк А.С., Суржиков С.Т. Учет процесса зарядки твердых частиц при моделировании эволюции пылевой компоненты плазмы в нормальном тлеющем разряде // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 11. <http://chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-009.pdf>