

Известия НАН Армении, Физика, т.58, №3, с.304–309 (2023)

УДК 539.2

DOI:10.54503/0002-3035-2023-58.3-304

ГЕНЕРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЗАПРЕЩЕННЫХ ПЕРЕХОДАХ В ЛАБОРАТОРНОЙ АКУСТОПЛАЗМЕ

А.С. АБРААМЯН*, А.Г. МКРТЧЯН, Р.Ю. ЧИЛИНГАРЯН

Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

*e-mail: arbel11@mail.ru

(Поступила в редакцию 18 апреля 2023 г.)

Экспериментально в лабораторных условиях в азотной акустоплазме в районе запрещенных линий 654.81 нм и 658.36 нм получена спектральная эмиссионная линия большой интенсивности (до 17 раз больше соседних линий спектра первой положительной системы азота). Результаты получены как в чистой азотной акустоплазме низкого давления (несколько сот Па), так и в различных смесях, содержащих азот, в том числе в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$. Полученные результаты объясняются акустоплазменным состоянием разряда и аналогом комбинационного рассеяния, снимающими некоторые из квантово-механических запретов. Рассмотрено также возможное влияние силы Кориолиса.

1. Введение

Если разрядный ток содержит постоянную и переменную компоненты, то при определенных условиях плазма переходит в новое – акустоплазменное состояние [1–3]. Воздействие переменной компоненты разрядного тока можно разложить на последовательные возрастание и убывание тока между минимальным и максимальным значениями [4]. Возрастание можно представить как приложение импульсного электрического поля, а убывание – как рекомбинирующую плазму [5, 6]. При приложении к равновесной плазме импульсного электрического поля (на стадии возрастания тока) степень ионизации будет отставать от роста температуры, и если длительность импульсного напряжения меньше времени полной релаксации параметров плазмы, то возникает «недоионизованная плазма», в которой могут отсутствовать все три типа распределений: Больцмана, Максвелла, Саха [4]. При уменьшении электрического поля ионизация уменьшается медленнее температуры, возникает «рекомбинирующая» плазма. В акустоплазменном разряде из-за непрерывного изменения тока разряда режимы «недоионизированной» и «рекомбинирующей» плазмы происходят непрерывно и сменяют друг друга с частотой модуляции тока. В этом случае разряд вообще невозможно охарактеризовать какой-либо температурой и невозможно ни описание плазмы в рамках двухтемпературной модели, ни описание неравновесной плазмы при помощи нескольких температур (электронной, собственной газовой, колебательной, вращательной) [4, 7, 8]. Из-за самосогласованности процессов в плазме изменения по разным степеням свободы связаны между собой, и

отклонение от равновесия по одной из степеней свободы может привести к отклонению от равновесия по другим степеням свободы [9,10]. Использование зондовых методов [11, 12] для акустоплазмы нежелательно, поскольку зонды влияют на разряд, и одним из немногих методов определения параметров плазмы остается спектроскопия [13, 14]. В работах [2,3, 15] сообщалось о получении сильной спектральной линии в красной области спектра.

2. Эксперимент

Эксперимент детально описан в работе [3]. Исследовались лазерная смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$, чистый азот, различные смеси, содержащие и не содержащие азот. Наиболее сильная эмиссионная линия была получена в смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$. Давление в разрядной трубке изменялось от 10–5000 Па, постоянная и переменная компоненты разрядного тока могли меняться по отдельности от 1 до 30 мА, т.е. глубина модуляции тока (отношение переменной компоненты к постоянной) менялась от 0 до 1. Частота модуляции тока разряда f менялась от 0.1 до 50 кГц. В эксперименте исследовалась видимая область 300–800 нм, и в данной работе детально рассмотрена область с сильной линией около 650 нм.

3. Результаты и их обсуждение

На рис.1 представлен экспериментально полученный спектр с разрешением 0.1 нм. Показана только полоса первой положительной системы (ППС) азота (электронный переход $\text{B}^3\Pi_g \rightarrow \text{A}^3\Sigma_u^+$).

Хорошо видна спектральная линия большой интенсивности между линиями 654.48 и 662.36 нм спектра ППС азота (до 17 раз больше соседних линий). В этой же области есть красная линия водорода H – альфа 656.3 нм. Водород у нас мог появиться из kleевых соединений. В этом случае водород присутствовал бы всегда, но у нас в плазме гелия и углекислого газа без азота сильной линии не было, а в чистой азотной плазме такая линия была, но в 3–4 раза слабее, чем в смеси 1:1:8. Было сделано заключение, что сильная красная линия получается из-за азота.

На рис.1 каждый маленький прямоугольник представляет отдельную вращательную полосу для соответствующего колебательного уровня (отдельные вращательные линии сливаются вместе). Сильная красная линия находится между переходами с колебательными квантовыми уровнями ($7 \rightarrow 4; \lambda = 654.5$ нм) и ($6 \rightarrow 3; \lambda = 662.4$ нм). Поскольку расстояние между центрами соседних линий

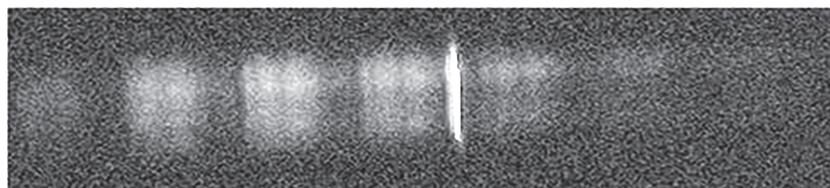


Рис.1. Спектр, снятый с помощью модернизированного спектрографа ИКС-51 с разрешением 0.1 нм. $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$; $P_0 = 200$ Па; $I_0 = 21$ мА; $U = 2.58$ кВ; $I \sim = 17.2$ мА.

654.48 и 662.36 нм около 8 нм, то ширина сильной линии у основания приблизительно равна 1/10 этого расстояния, т.е. около 0.8 нм, а ширина на полувысоте 0.3 ± 0.1 нм. Эксперименты показали, что на частоте модуляции $f = 0.1$ кГц интенсивность сильной красной спектральной линии в несколько раз слабее, чем на частоте 10 кГц. Поскольку красная линия очень сильная, остальные колебательно-вращательные полосы почти не видны (из-за нормировки на уровень белого при печати).

Чтобы проверить, что не происходит перенос спектра (типа фотосмещения) из-за нелинейного взаимодействия различных спектральных линий азота с линией излучения 10.6 мкм CO₂-лазера, одно из окон разрядной трубы было заменено на германиевое, другое окно оставалось стеклянным. Через германиевое окно в трубку поступал лазерный луч с плотностью мощности до 10 Вт/см². Никаких изменений в видимом спектре не произошло. Тогда было выдвинуто предположение об эмиссионной линии на запрещенном переходе. В 1927 г. А.С. Боуен [16] доказал, что наблюдаемые в спектрах некоторых туманностей непонятные спектральные линии можно объяснить излучением на запрещенных переходах. Наиболее вероятно появление запрещенных линий, если их верхним состоянием является метастабильное состояние атома. В лабораторных условиях вероятность разрушения метастабильного состояния при столкновениях намного больше, чем вероятность запрещенного перехода. Поэтому в лабораторных условиях излучение на запрещенных переходах наблюдается редко. Впервые это отметил С. Мрозовски [17]. В условиях космоса из-за большой протяженности объектов и малой вероятности столкновений (поскольку концентрации частиц намного меньше, чем в лабораторных условиях) возможно наблюдение астрономами излучения на запрещенных переходах. В частности, наблюдается излучение двух запрещенных линий однократно ионизованного азота ($\lambda = 654.81$ нм и 658.36 нм). Это первая отрицательная система (ПОС) азота – электронный переход $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ (рис.10 [3]). Запрещенные линии присутствуют также в полярных сияниях и в свечении ночного неба. В наших экспериментах чаще наблюдалась линия в районе 658.36 нм, которая соответствует переходу $^3P_2 - ^1D_2$.

В работе [18] указывается, что в разрядных трубках можно получить запрещенное излучение двух типов. Для линий первого типа интенсивность уменьшается с возрастанием тока, и они связаны с механизмом спонтанного излучения. Для линий второго типа интенсивность возрастает пропорционально квадрату плотности тока, и они связаны с механизмом вынужденного излучения. Механизм спонтанного излучения связан с мультипольным излучением, для которого правила отбора отличаются от дипольного электрического, и запрещенные для дипольного излучения линии становятся разрешенными для мультипольного [18, 19]. Механизм вынужденного излучения связан с ионными полями, либо с внешними электрическими и магнитными полями, которые можно считать постоянными на расстояниях, сравнимых с размером атома.

В условиях космоса из-за малой плотности газа должен преобладать спонтанный механизм. В лабораторных условиях при намного больших плотностях газа может преобладать механизм вынужденного излучения. Именно этот результат получен в наших экспериментах при давлениях 10–600 Па, что намного

больше, чем в космическом пространстве. В акустоплазменном режиме разряда в разрядной трубке и в лазерной смеси, и в различных смесях, содержащих азот, и в чистом азоте была получена спектральная линия большой интенсивности именно в этой области. В наших экспериментах интенсивность сильной линии возрастает и с увеличением силы тока, и с увеличением глубины модуляции тока. Таким образом, можно говорить о механизме вынужденного излучения.

Было высказано предположение, что акустоплазменное состояние снимает запрет, вероятность излучения с метастабильного перехода становится больше вероятности тушения столкновениями, и появляется сильная спектральная линия на запрещенном переходе. Поскольку вероятность уменьшения населенности метастабильного перехода остается меньше, чем вероятность уменьшения населенности из-за излучения для разрешенных линий всего стандартного колебательно-вращательного перехода, то полученная линия излучения будет уже и сильнее, что мы и наблюдаем в эксперименте. В работе [18] рассматривается теория дипольного электрического излучения, вынужденного постоянным электрическим полем. Причем действие постоянного поля рассматривается как граничный случай переменного периодического поля с частотой равной нулю. В наших экспериментах мы производим низкочастотную модуляцию тока и электрического напряжения разряда, но для переменных периодических полей излучение имеет резонансный характер. Акустические колебания в плазме приводят к тому, что внешняя сила (по отношению к двухатомной молекуле азота) приводит к усилинию колебаний внутри молекулы на определенных частотах. В результате в колебательном спектре молекулы азота может значительно усиливаться интенсивность одной из колебательных полос, настолько, что возможен эффект комбинационного рассеяния. Но при комбинационном рассеянии возможно нарушение некоторых правил запрета и генерация на запрещенном (в нормальных условиях) переходе [18].

Другое объяснение связано с прецессией. Механизм – следующий: двухатомная молекула азота является молекулярным волчком. На частотах акустоплазменных резонансов в разрядной трубке возрастает амплитуда линейных колебаний молекулы как целого. В результате снова произойдет изменение интенсивностей отдельных линий в колебательно-вращательном спектре, и возможно комбинационное рассеяние. Возникающая сила Кориолиса меняет правила запрета, причем направление силы Кориолиса меняется каждую половину периода акустических колебаний. В итоге мы можем получить излучение на каких-то из запрещенных переходов. Для разных направлений вращения молекулярных волчков силы Кориолиса будут разные, и конкуренция переходов сузит линию излучения.

По нашим оценкам на частоте первой продольной акустической моды акустическое давление порядка 0.2 Па. На неосевых модах в районе частот 10 кГц акустическое давление возрастает настолько, что может изменять траекторию разряда [20]. По нашим оценкам кинетическая энергия акустических колебаний молекулы азота может достигать 10^{-2} эВ. Достаточно долгое воздействие (сравнимое с периодом акустики) такой достаточно большой энергии может снять запрет на излучение с запрещенных переходов. В нашем случае давление может

превышать 10 Па. Тогда колебательная скорость молекулы азота может достигать 200 м/с; кинетическая энергия молекулы азота может превышать 10^{-2} эВ. Все это мы наблюдаем в эксперименте.

4. Заключение

Экспериментально в лабораторных условиях в районе запрещенных линий 654.81 нм и 658.36 нм в акустоплазме, содержащей азот, при давлении 200–600 Па получена спектральная эмиссионная линия большой интенсивности (до 17 раз больше соседних линий спектра ППС азота). Обычно такие запрещенные эмиссионные линии наблюдались только астрономами в спектрах некоторых туманностей при давлениях на много порядков меньших и интенсивность запрещенных линий была сравнима с соседними линиями спектра ППС азота. Сильная линия была получена в акустоплазменном режиме разряда в лазерной смеси, в различных смесях, содержащих азот, и в чистом азоте. В газовых смесях, не содержащих азот, данная линия не наблюдалась. В качестве возможных механизмов получения сильной линии рассмотрены прецессия вокруг направления акустических колебаний и вынужденное комбинационное рассеяние. Таким образом полученная сильная линия соответствует не спонтанному, а вынужденноому механизму излучения. Что вероятно позволит создать акустоплазменный лазер, одновременно генерирующий в ИК и красной областях спектра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.А. Галечян, А.Р. Мкртчян. Акустоплазма. Ереван, Апага, 2005.
2. A.R. Mkrtchyan, A.S. Abrahamyan. Arm. J. Phys., **13**, 131 (2020).
3. A.S. Abrahamyan. Arm. J. Phys., **13**, 49 (2020).
4. Л.М. Биберман, В.С. Воробьев, И.Т. Якубов. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. Москва, Наука, 1982.
5. Г. Френсис. Ионизационные явления в газах. Москва, Атомиздат, 1964.
6. Б.М. Смирнов. Физика слабоионизованного газа. Москва, Наука, 1985.
7. В.Н. Очкин. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. Москва, Физматлит, 2006.
8. Ю.П. Райзер. Физика газового разряда. Москва, Наука, 1987.
9. А.В. Недоспасов, В.Л. Хайт. Колебания и неустойчивости низкотемпературной плазмы. Москва, Наука, 1979.
10. А.И. Осипов, А.В. Уваров. Неравновесный газ: проблемы устойчивости. УФН, **166**, 639 (1996).
11. Ю.М. Каган, В.И. Перель. Зондовые методы исследования плазмы. УФН, **81**, 409 (1963).
12. Ю.А. Лебедев. Введение в зондовую диагностику плазмы пониженного давления. Москва, МИФИ, 2003.
13. Л.А. Луизова. Всеросс. конф. по физике низкотемпературной плазмы, ФНТП-2001, Россия, Петрозаводск. Материалы школы молодых ученых, 213–303, 2001.
14. А.С. Федоренко. Экспериментально-расчетные исследования характеристик положительного столба разряда и совершенствование люминесцентных ламп. Дисс.

կ.թ.հ., 1980.

15. **В.В. Кабанов, А.Р. Мкртчян, В.П. Кривобоков, А.С. Абраамян, В.В. Ажаронок.**
IV Конгресс физиков Беларуси, Минск, Беларусь, Труды, 289–290, 2013.
16. **I.S. Bauer.** Nature, 1927.
17. **S. Mrozowski.** Rev. Mod. Phys., **16**, 153 (1944).
18. **Л.А. Борисоглебский.** УФН, **66**, 603 (1958).
19. **A. Rubinowicz.** Zeitschrift f. Phys., **65**, 662 (1930).
20. **A.S. Abrahanyan.** IX Int. Conf. Plasma Phys. and Plasma Technology, PPPT-9, Minsk, Belarus, Proceedings, 78–81, 2018.

ԼԱԲՈՐԱՏՈՐ ԱԿՈՒՍԱՊԼԱԶՄՈՒՄ ԱՐԳԵԼՎԱԾ
ԱՆՑՈՒՄՆԵՐԻ ՎՐԱ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ԳԵՆԵՐԱՑԻՒ

Ա.Ս. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ, Ա.Հ. ՄԿՐՏՉՅԱՆ, Ռ.Յու. ՉԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ

Փորձնականորեն, ազոտի ակուստապլազմայում լաբորատոր պայմաններում, արգելված գծերի շրջանում՝ 654.81 նմ և 658.36 նմ, ստացվել է բարձր ինտենսիվության սպեկտրալ զիծ (մինչև 17 անգամ ավելի, քան ազոտի առաջին դրական համակարգի սպեկտրի հարևան գծերը): Արդյունքները ստացվել են ինչպես ցածր ճնշման ազոտային ակուստոպլազմայում (մի քանի հարյուր Pa), այնպես էլ ազոտ պարունակող տարբեր խառնուրդներում, ներառյալ $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ խառնուրդը: Ստացված արդյունքները բացատրվում են պարզումի ակուստոպլազմիկ վիճակով և համանի ցրման անալոգով, որը վերացնում է քվանտամեխանիկական որոշ արգելվներ: Դիտարկվում է նաև Կորիոլիսի ուժի հնարավոր ազդեցությունը:

GENERATION OF RADIATION ON FORBIDDEN TRANSITIONS IN LABORATORY ACOUSTOPLASMA

A.S. ABRAHAMYAN, A.H. MKRTCHYAN, R.YU. CHILINGARYAN

Experimentally, under laboratory conditions in the nitrogen acoustoplasma, in the region of the forbidden lines at 654.81 nm and 658.36 nm, a spectral emission line of high intensity was obtained (up to 17 times more than the neighboring lines of the first positive system of nitrogen). The results were obtained both in pure low-pressure nitrogen acoustoplasma (several hundreds of Pa) and in various mixtures containing nitrogen, including the $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$ mixture. The results obtained are explained by the acoustoplasmic state of the discharge and an analogue of Raman scattering, which remove some of the quantum mechanical prohibitions. The possible influence of the Coriolis force is also considered.