

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. С. Артеев, С. С. Сулакшин, Излучение плотных инертных газов при мощной накачке протонным пучком, *ТВТ*, 1990, том 28, выпуск 2, 216–219

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.86

7 февраля 2025 г., 00:52:54



УДК 543.42 © 1990 г.

М. С. Артеев, С. С. Сулакшин

ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛОТНЫХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ ПРИ МОЩНОЙ НАКАЧКЕ ПРОТОННЫМ ПУЧКОМ

В диапазоне 200–600 нм исследованы спектры инертных газов Ne, Ar, Kr, Xe атмосферного давления при их накачке мощным ионным пучком с параметрами $E=500$ кэВ, $j=400$ А/см², $\tau=80$ нс. Получены сплошные спектры, механизм излучения которых связывается с переходами R^{+2} . Максимумы полос лежат на границе ВУФ- и УФ-областей. Максимум излучения приходится на послесвечение, что подтверждает рекомбинационную природу излучения. Проведено сравнение со спектрами, полученными при слабой накачке электронным пучком. Показано влияние нагрева газа при мощной ионной накачке на спектральные и временные характеристики излучения.

Исследованию сплошных спектров инертных газов атмосферных давлений посвящено достаточно много работ. Основное внимание в них уделялось определению механизма излучения и изучению усиления света. Давление газа составляло от долей мм рт. ст. до десятков атмосфер, использовались и способы возбуждения: газовый разряд [1], СВЧ-разряд (ссылки в [2]), α -частицы [3], непрерывный слаботочный электронный пучок [4], импульсные микросекундный [5] и наносекундный [6] сильноточные электронные пучки. Характеризуя в целом наблюдаемые спектры, можно отметить, что имеются три полосы (рис. 1). На рис. 1 приведены и возможные механизмы их излучения, обсуждаемые в литературе (ссылки в [6]).

Лазерная генерация получена пока только на переходе I [7], хотя из рис. 1 видно, что в принципе усиление возможно на всех указанных переходах I–IV. Генерация получена с использованием для накачки сильноточных электронных пучков с плотностью тока до сотен А/см² на молекулах Ar₂, Kr₂, Xe₂. На Ne₂ и He₂ генерация не получена, теоретические же расчеты [8] свидетельствуют о необходимости сверхмощной накачки при плотностях тока пучка до десятков кА/см².

В настоящее время электронные пучки большого сечения с такой плотностью практически недоступны, однако возможны модификация того же самого ускорителя и получение мощного протонного пучка вместо электронного [9]. Учитывая значительно большую тормозную способность ионов, можно показать, что в пересчете на эквивалентный ток электронного пучка увеличение составляет два порядка [10].

В данной работе исследованы спектры свечения инертных газов атмосферного давления при возбуждении мощным ионным пучком.

Для возбуждения газов использовался пучок протонов, полученный на ускорителе «ГИМН» [10], с параметрами: $E_0=500$ кэВ, $j=400$ А/см², $\tau_{0,5}=80$ нс. Плотность мощности накачки в экспериментах достигала $6 \cdot 10^8$ Вт/см². Отметим, что в известных работах данная величина была на несколько порядков меньше. Использовались инертные газы марки ВЧ. Спектры излучения регистрировались спектрографом ИСП 30 в диапазоне 200–600 нм на пленку РФ-3 за одно срабатывание ускорителя. Для восстановления спектрального распределения интенсивности излучения по плотности почернения определялась чувствительность пленки $S_\lambda=1/H_{(D=1)}$ (H – энергетическая экспозиция, D – плотность почернения) [11]. Для ее измерения использовался импульсный источник излучения со спектром абсолютно черного тела при яркостной температуре 38 000 К. Осциллограммы свечения в диапазоне 200–600 нм регистрировались фотоэлектронным катодом ФЭК 22.

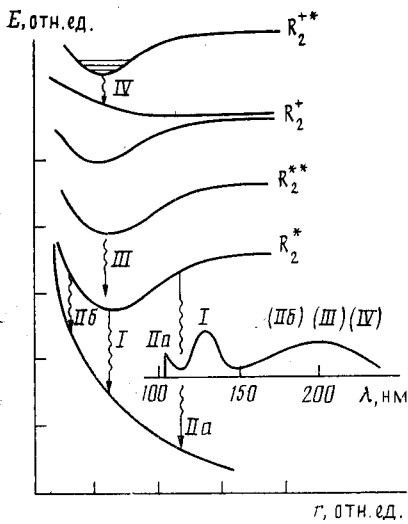


Рис. 1

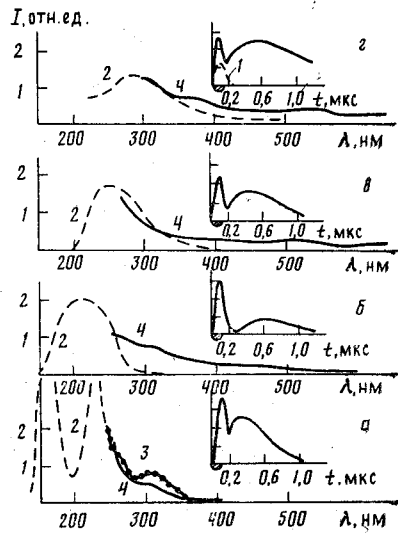


Рис. 2

Рис. 1. Схема термов молекулы инертного газа с возможными переходами, отвечающими соответствующим полосам в спектре излучения, приведенном для аргона

Рис. 2. Спектры и осциллограммы излучения (а — Ne (3,5 атм), б — Ar (3 атм), в — Kr (1 атм), г — Xe (1 атм)): заштрихован импульс тока протонного пучка; 1 — $P_{Xe}=0,25$ атм; 2 — накачка электронным пучком; 3 — накачка электронным пучком [6]; 4 — накачка протонным пучком

Результаты измерений приведены на рис. 2. Во всех инертных газах, кроме гелия, наблюдались широкополосные спектры, максимумы излучения которых находятся вблизи границы УФ- и ВУФ-областей, а красноволновое крыло — в видимом (Ne) и ИК-(Ar, Kr, Xe) спектре (более 600 нм). При давлении ниже ~1 атм наблюдался линейчатый спектр, постепенно исчезающий и переходящий в сплошной при увеличении давления до 3 атм. Для более легких газов (Ne, Ar) сплошной спектр возникал при больших давлениях 3–3,5 атм, для тяжелых (Kr, Xe) переход наблюдался при 1–1,5 атм. Это свидетельствует о роли удельной мощности накачки, зависящей от сорта газа и его давления $W=E_0 j P / (r_0 P_0)$, где r_0 — пробег протона в данном газе при давлении $P_0=1$ атм [12].

В табл. 1 приведено давление инертных газов для фиксированной величины плотности накачки $W=2,5 \cdot 10^8$ Вт/см². При фиксированном давлении газа повысить мощность накачки можно, уменьшая E_0 (поскольку пробег r от энергии зависит нелинейно) или увеличивая плотность тока j . Пределом плотности ионного тока для современного уровня ускорительной техники на практике является величина в несколько кА/см².

Свечение в данных полосах имеет ярко выраженную двухпиковую временную структуру. Первый пик привязан к импульсу тока и имеет длительность $\tau_{0,5}=100-120$ нс, т. е. заканчивается сразу после окончания импульса тока. Второй пик появляется в послесвечении, длительность его зависит от сорта газа и составляет для Ne $\tau_{0,5}=460$ нс, Ar — 600 нс, Kr — 640 нс, Xe — 960 нс. Широкополосный спектр соответствует второму пику осциллограммы. Это следует из того, что и при низких и при высоких давлениях первый пик изменяется всего в 2 раза (рис. 2), а широкополосный спектр при низких давлениях отсутствует. При высоких давлениях возникают и широкополосный спектр и второй пик на осциллограмме. Кроме того, малая добавка водорода (1–10%) подавляла и второй пик на осциллограмме, и широкополосный спектр одновременно. Следовательно, широкополосное излучение связано с процессами рекомбинации в плазме.

Полученные при накачке протонным пучком спектры сравнивались с аналогичными спектрами, полученными при накачке электронным пучком

Таблица 1

Газ	Ne	Ne	Ar	Kr	Xe
p , атм	11	3,0	2,0	1,4	1,2

Таблица 2

Газ	Ne	Ar	Kr	Xe
T , К	1100	1700	2400	3000

с параметрами $\tau_{0,5}=5$ нс, $j=300$ А/см², $E_0=150$ кэВ. Регистрация осуществлялась фотоэлектрическим способом в УФ- и ВУФ-диапазонах. Результаты приведены на рис. 2. Протонно-пучковые и электронно-пучковые спектры нормировались и «сшивались» на 250–300 нм. Максимумы излучения, приходящиеся на 220 нм для Ne, 200 нм для Ar, 250 нм для (Kr), 270 нм для Xe совпадают с известными в литературе [5] (для Ne данных нет). В спектре неона совпадает меньший максимум на 300 нм (электронно-пучковой спектр взят из [5]). Следовательно, можно утверждать, что коротковолновая часть спектра является крылом УФ-полосы, природа которой при высоких давлениях связана с переходами R^{++} [13]. Расширение полосы в красную область при возбуждении протонным пучком может быть связано с нагревом газа и вкладом равновесного излучения. В отличие от известных работ в данном эксперименте мощная накачка приводила к сильному нагреву газа. Если учесть радиационные потери энергии из плазмы, можно оценить газовую температуру как

$$T=T_0+(1-\varepsilon)PV \int W dt / \left[S r_0 \rho \left(C_p - \frac{S r_0 \rho P_0 R}{P \mu} \right) \right],$$

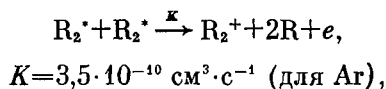
где T_0 , V — начальные температура и объем газа; S — площадь окна инжекции пучка; ρ — удельный вес газа; C_p — теплоемкость [14]; R — газовая постоянная; μ — молекулярный вес газа; ε — доля радиационных потерь. Положим $\varepsilon=50\%$ [7]. Результаты расчета температур приведены в табл. 2.

Можно рассчитать энергетическую светимость газов в диапазоне регистрации ФЭК 22 200–600 нм, исходя из свойств излучения абсолютно черного тела при яркостной температуре, приведенной в табл. 2 [15]. С учетом геометрических размеров излучателя и приемника поток энергии составляет для Ne $M_{\Delta\lambda}=0,07$ Вт/см², для Ar — 2 Вт/см², для Kr — 19 Вт/см² и для Xe — 72 Вт/см². Использованный в эксперименте фотоприемник был калиброван абсолютно. Сравнение экспериментального значения потока энергии и приведенного выше показало, что вклад в длинноволновую часть спектров на рис. 1 равновесного излучения составил для Ne 0,05%, для Ar — 2,8%, для Kr — 34%, для Xe — 65%.

Для Ar приведенная оценка не объясняет наблюдаемый уровень интенсивности. Возможно, что значительный вклад вносят переходы с более высоких колебательных состояний R_2^{++} , заселяемые в соответствии с распределением Больцмана при нагреве среды. Кроме того, определенную роль может играть излучение молекулы H_2 (следы водорода в газе присутствовали) на переходе $a^3\Sigma_g^+ \rightarrow b^3\Sigma_a^+$, верхний уровень которого с $v'=0$ находится в резонансе с уровнями Ar(^{1,3}P). Для остальных инертных газов такой резонанс отсутствует. Можно, следовательно, сделать предварительный вывод о совпадении УФ-полос, приписываемых R_2^{++} [13] при электронно-пучковой накачке и мощной протонно-пучковой накачке.

Значительное увеличение мощности накачки приводит к относитель-

ному возрастанию роли процесса [7]



в результате которого возможны довозбуждение в состоянии R^{+*} и увеличение выхода излучения на переходах R_2^{+*} , которое наблюдалось в эксперименте. В то же время процессы релаксации с участием медленных электронов вследствие роста температуры замедляются, что и приводит к наблюдаемому в эксперименте увеличению длительности свечения и его зависимости от сорта газа.

Таким образом, при мощной накачке плотных инертных газов протонным пучком получено широкополосное молекулярное излучение на границе ВУФ — УФ-диапазонов, совпадающее со спектрами переходов при накачке электронным пучком невысокой мощности. Зафиксировано влияние нагрева среды в ходе воздействия пучка на временные и спектральные характеристики широкополосного излучения.

Авторы выражают благодарность В. И. Держиеву и В. Ф. Тарасенко за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tanaka Y. // J. O. S. A. 1955. V. 45. P. 344.
2. Окабе Х. Фотохимия малых молекул. М.: Мир, 1981.
3. Vitot A., Brunet H., Galy J., Millet P. // J. Chem. Phys. 1975. V. 63. P. 1469.
4. Вердовцева Э. Т., Фозелья М., Осыка В. С. // Оптика и спектроскопия. 1968. Т. 25, С. 440.
5. Шампань Л. Ф. В кн.: Газовые лазеры/Под ред. И. Мак-Даниэля и У. Нигэна, М.: Мир, 1986.
6. Артеев М. С., Кузнецов А. А., Скакун В. С. и др. Излучение плотных инертных газов в ВУФ-, УФ- и видимой областях спектра при возбуждении наносекундным электронным пучком. Препринт № 10. Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1987.
7. Экцимерные лазеры/Под ред. Ч. Роудза. М.: Мир, 1981.
8. Лакоба И. С., Яковленко С. И. // Квантовая электроника. 1980. Т. 6. № 4. С. 677.
9. Сулакшин С. С. Исследование сильноточной ионной накачки газовых лазеров. Дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1983.
10. Артеев М. С., Баранов С. В., Ваулин В. А. и др. Генератор мощного ионного пучка для накачки газовых лазеров. Тр. VII Всес. симп. по сильноточной электронике. Ч. 2. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 124.
11. Малышев В. М. Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979.
12. Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975.
13. Бойченко А. И., Держиев В. И., Жидков А. Г. и др. О природе длинноволнового континуума в ВУФ — УФ-спектрах инертных газов, возбуждаемых наносекундным электронным пучком. Томск. 1988, 31 с. Ред. ж. Изв. вузов. Физика. Дец, в ВИНТИ 17.10.88. № 7459—В88.
14. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кыкоина. М.: Атомиздат, 1976.
15. Гуревич М. М. Фотометрия, Л.: Энергоатомиздат, 1983.

НИИЯФ при Томском
политехническом институте

Поступила в редакцию
08.09.88