

примчивостей, линейных восприимчивостей и вероятности многофотонной ионизации. В связи с этим, оптимизация процессов преобразования частоты в пучках возбужденных ионов является интересной задачей.

Авторы выражают благодарность за предоставленный образец ЖМИ Н.Х. Джемилеву и Р. Курбанову.

Л и т е р а т у р а

- [1] H a r r i s S.E. // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 31. N. 6. P. 341-344.
- [2] Лебедев В.В., Плясуля В.М. // Квантовая электроника. 1988. Т. 15, № 1. С. 127-132.
- [3] Дудников В.Г., Шабалин А.Л. // ПТЭ. 1986. №5. С. 149-152.
- [4] Гладков С.М., Коротеев Н.И., Рычев М.В., Штенцель О. // Письма в ЖЭТФ, 1986. Т. 43. В. 5. С. 227-229.
- [5] B r o w n W., V e n k a t e s a n T., W a g n e r A. // Nuclear instruments and methods. 1981. V. 191. P. 157-168.
- [6] Кулагин И.А., Усманов Т. Препринт ИЭ АН УзССР, № 1, Ташкент, 1987. 20 с.

Институт электроники
им. У.А. Арифова АН УзССР,
Ташкент

Поступило в Редакцию
22 июня 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 2

26 января 1989 г.

04

ОСЦИЛЛЯЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ УДАРНО-НАГРЕТОЙ ПЛАЗМЫ КСЕНОНА

Г.К. Т у м а к а е в, З.А. С т е п а н о в а

В настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал [1-6], указывающий на аномальное, не укладывающееся в рамки сложившихся представлений, поведение плазмы одноатомных газов в потоке за фронтом ударной волны. Аномалии, отличающиеся друг от друга условиями возникновения и формами проявления (флуктуация светимости, нарушение газодинамической устойчивости течения и т.д.), наблюдаются в широком диапазоне изменения чисел Маха падающих ударных волн. В ксеноне - при $M \sim 8.3-30$, в аргоне $M \sim 10.5-32$. На основании анализа характерных особенностей наблюдаемых аномалий выделены [7] четыре группы (типа) явлений.

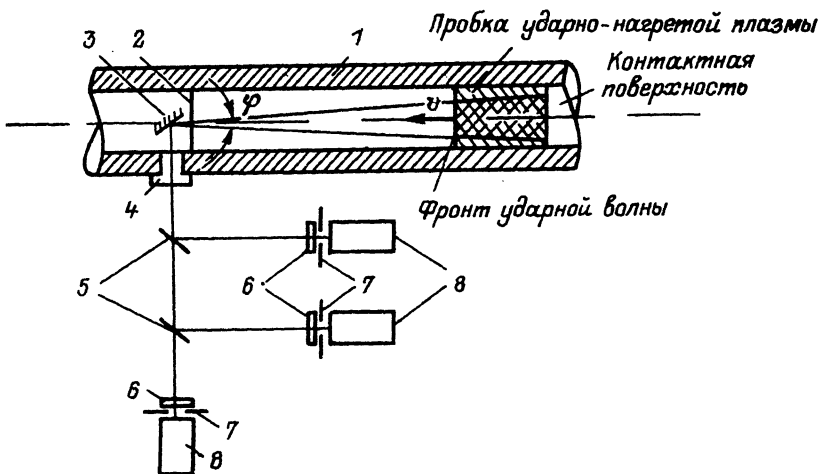


Рис. 1.

Первая группа охватывает круг явлений, связанных с флуктуацией излучения плазмы в релаксационной зоне потока [1, 6]. Процесс развивается в узком диапазоне изменения чисел Маха падающей ударной волны (в ксеноне - $M \sim 8,3 \pm 0,5$, в аргоне - $M \sim 10,5-11,0$).

Ко второй группе отнесены явления, эволюционирующие в рекомбинирующей зоне потока за ударными волнами интенсивностью $M \sim 10-15$. Здесь аномальность проявляется в слабом нарушении устойчивости течения и фронта ударной волны [1-3].

Третья группа аномальных процессов наблюдается в ксеноне при $M \geq 17,4$, а в аргоне - при $M \geq 21$ [1, 3-5]. Возникновение значительных, обнаруженных в экспериментах структурных изменений в потоке, в данном случае носит четко выраженный пороговый характер по числу Маха и хорошо коррелирует с выполнением условия $\frac{dn_0}{dM} \leq 0$ (n_0 - равновесное значение концентрации нормальных атомов в потоке за фронтом ударной волны).

И, наконец, к четвертой группе отнесены явления, развивающиеся в аргоне при $M > 32$ [3]. Этот тип неустойчивости развивается при выполнении условия $\frac{dn^+}{dM} \leq 0$, где n^+ - равновесное значение концентрации однократно заряженных ионов за фронтом ударной волны.

При исследовании излучательных свойств ударно-нагретой плазмы ксенона в режиме возникновения неустойчивости течения 2-го типа ($M \sim 10-15$) обнаружено, что интенсивность излучения столба плазмы, ограниченного с одной стороны фронтом ударной волны, с другой - контактной поверхностью, в континууме видимого и ИК диапазонов длин волн ($\lambda = 4000-100000 \text{ \AA}$) не постоянна во времени, а носит периодический пульсирующий характер. Глубина модуляции наблюдае-

мого автоколебательного процесса велика, до 40% от уровня рекомбинационного и тормозного континуума. Частота колебаний зависит как от интенсивности падающей ударной волны, так и от начального давления исследуемого газа и меняется от 10 кГц до нескольких десятков килогерц.

Исследования выполнены на ударной трубе с цилиндрическим каналом камеры низкого давления с диаметром сечения 100 мм. Длина камеры - 8 метров. Предварительная степень откачки системы 10^{-5} Торр.

В качестве исследуемого газа использовался ксенон.

Условия проведения эксперимента: диапазон изменения чисел Маха падающей ударной волны $M \sim 10-16,5$, начальное давление исследуемого газа менялось в пределах 1,5-15 Торр.

Излучение ударно-нагретой плазмы ксенона регистрировалось в процессе ее распространения вдоль камеры низкого давления в направлении, перпендикулярном фронту ударной волны [8].

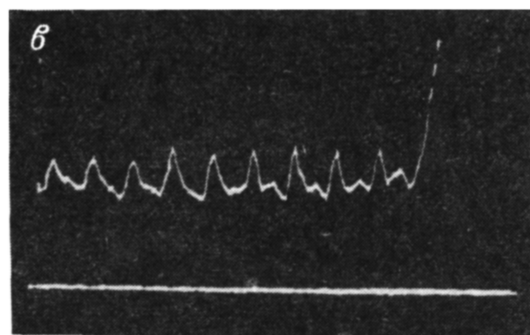
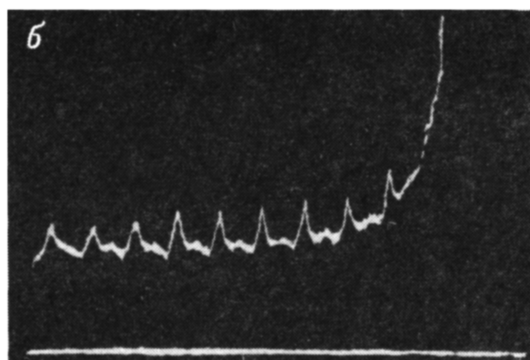
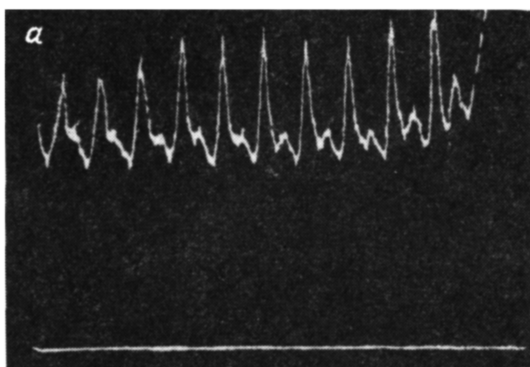
Оптическая схема установки представлена на рис. 1. Она включает поворотное зеркало - (3), установленное на оси камеры низкого давления (1), загерметизированное оптически прозрачное окно (4) из плавленого кварца, или лавсановой пленки, системы полупрозрачных зеркал (5), обеспечивающих разделение пучка света на несколько каналов для одновременной регистрации излучения в различных спектральных диапазонах длин волн, фотоэлектрические приемники света (8) и сменные оптические фильтры (6).

Коллимирование пучков света по каждому из измерительных каналов осуществлялось с помощью двух диафрагм с диаметром отверстия ~ 1 мм. Диафрагма поля зрения (2) устанавливалась перед поворотным зеркалом в камере низкого давления, апературная диафрагма (7) крепилась на корпусе фоторегистрирующего приемника. Расстояние между диафрагмами не превышало 1 метра и подбиралось таким образом, чтобы поле зрения оптической системы по всей длине определялось диафрагмой (2), а не сечением цилиндрического канала камеры низкого давления ударной трубы.

В экспериментах регистрировалось излучение из объема плазмы, ограниченного размерами пробки ударно-нагретого газа и конусом телесного угла поля зрения (φ). На схеме эта область выделена двойной штриховкой.

На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов фотоэлектрических приемников, регистрирующих изменение интенсивности излучения ударно-нагретой плазмы в процессе ее распространения вдоль камеры низкого давления на участке протяженностью 2,0 метра ($M = 11,9$; $P = 6,6$ Торр). Осциллограммы а, б и в, соответственно, несут информацию об изменении интенсивности излучения плазмы в видимом ($\lambda = 4000-7000 \text{ \AA}$) в ближнем ИК ($\lambda = 8000-12000 \text{ \AA}$) и дальнем ИК ($\lambda = 4-10 \text{ \mu m}$) диапазонах длин волн.

Интенсивность излучения ударно нагретой плазмы, вопреки сложившимся представлениям об излучательных свойствах плазмы одноатомных газов в ударных трубах [9], испытывает периодическое изменение, указывая на реализацию автоколебательного процесса [10] в ударно-нагретой плазме.



— μ s

Рис. 2.

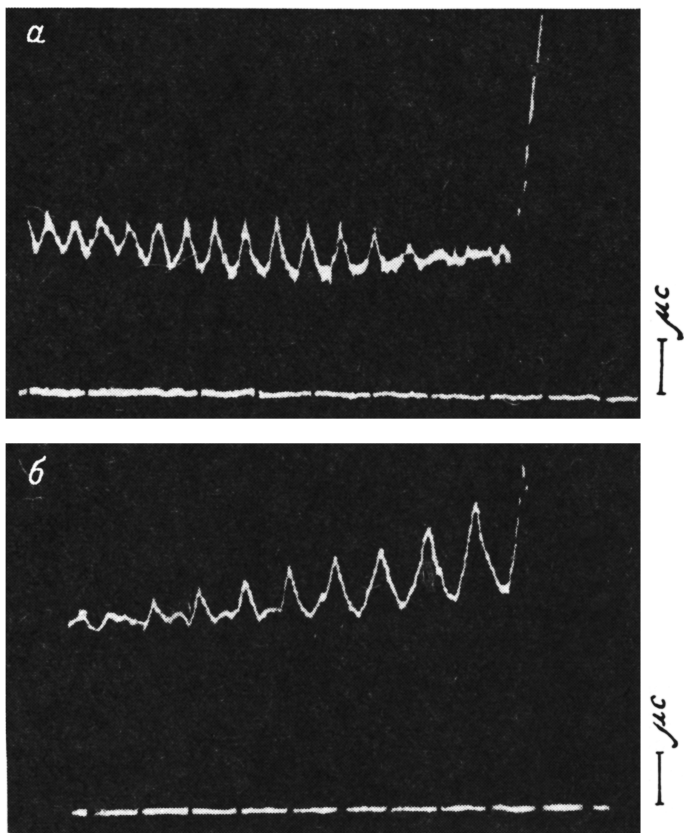


Рис. 3.

Глубина модуляции интенсивности излучения

$$\Delta A = \frac{J_{max} - J_{min}}{J_{max}} \cdot 100\%,$$

где J_{max} и J_{min} , соответственно максимальное и минимальное значение интенсивности излучения, для рассматриваемого случая значительна - 30-40%. Частота колебаний 12 кГц. Характер осцилляции излучения плазмы в различных спектральных диапазонах длин волн практически идентичен.

Момент контакта падающей ударной волны с корпусом диафрагмы поля зрения на осциллограммах отмечен резким нарастанием сигнала вследствие всплеска излучения плазмы за отраженной ударной волной, образующейся на корпусе диафрагмы (2).

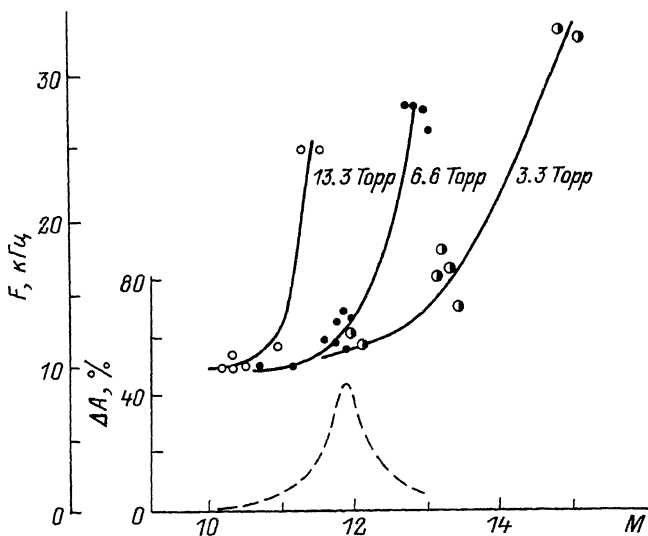


Рис. 4.

В экспериментах, кроме режима установившегося автоколебательного процесса, зарегистрированы режимы затухания и зарождения осцилляций излучения в плазме. Эти результаты иллюстрируются осциллограммами, приведенными на рис. 3.

Данные об изменении частот колебаний интенсивности излучения плазмы F от числа Маха падающей ударной волны для разных начальных давлений исследуемого газа $P_0 = 3.3$; 6.6 и 13.3 Торр приведены на рис. 4. Зависимость $F = f(M)$ при $P_0 = \text{const}$ носит сложный, явно выраженный пороговый характер.

Частота колебаний от предельного значения F , равного 9.8–10 кГц при $M < 10$, независимого от величины начального давления, с ростом числа Маха увеличивается. Однако пока интенсивность ударной волны не превышает некоторого значения числа Маха (критического), этот рост незначителен. Далее, сначала для больших, а затем и для меньших значений давлений функциональный характер зависимости $F = f(M)$ меняется, обнаруживая резкое изменение частоты от числа Маха. При $M > M_{\text{кр}}$, например, для $P_0 = 13.3$ Торр, она увеличивается от значения $F \sim 10$ кГц при $M = 10.3$ до $F \sim 25$ кГц при $M = 11.4$, а для $P_0 = 3.3$ Торр от $F \sim 15$ кГц при $M = 13.2$ до $F \sim 33$ кГц при $M = 15$. В ряде экспериментов для $M = 16.5$ и $P_0 = 4$ Торр была зарегистрирована осцилляция интенсивности излучения плазмы с частотой $F \sim 60$ –70 кГц.

Пунктиром на рис. 4 для $P_0 = 6.6$ Торр нанесена кривая, отражающая качественную зависимость изменения глубины модуляции излучения ΔA от числа Маха. Максимальное значение ΔA порядка 30–40% было зарегистрировано при $M \sim M_{\text{кр}}$.

Приведенные экспериментальные данные позволяют сделать следующее заключение:

1. Четкая зависимость частоты колебаний излучения ударно-нагретой плазмы от числа Маха и начального давления газа, с нашей точки зрения, полностью исключает возможность интерпретации природы возникновения наблюдаемого явления за счет возмущения течения шероховатостями канала ударной трубы [11], турбулизации потока в зоне контактного перемешивания газов и т.д.

2. если предположить, что необходимым условием развития автоколебательного процесса в ударно-нагретой плазме является непрерывное обновление состава газа в потоке за фронтом ударной волны, то линейный размер области потока Δl , ответственный за генерацию осцилляции излучения на основании данных о периоде колебаний (T), о скорости распространения ударной волны (u) и о сжатии газа ($\bar{\rho}$), определяется соотношением

$$\Delta l = \frac{u \cdot T}{\bar{\rho}}$$

В проведенной серии экспериментов размеры Δl меняются в пределах от 1 до 4 см при общей длине пробки ударно-нагретого газа 60–80 см.

3. Согласно выполненным оценкам при $M > M_{кр}$ для $F = const$ в пределах точности эксперимента абсолютные величины равновесных концентраций электронов для $\rho = var$ принимают одно и то же значение. Так, например, для трех рассмотренных случаев $P_0 = 3.3; 6.6$ и 13.3 Торр при $F = 25$ кГц концентрация электронов $n_e = 1.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Л и т е р а т у р а

- [1] Тумакаев Г.К., Лазовская В.Р. VIII th Jnt. Conf. on Phen. in Ionized Gases, Vienna, 1967. P. 464.
- [2] Glass I.L., Liu W.S. // J. Fluid Mech., 1978. V. 84. P. 55–77.
- [3] Griffiths P.W., Sandeman R.J., Hornung H.G. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1976. V. 9. P. 1681.
- [4] Тумакаев Г.К., Масленников В.Г., Серова Е.В. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. С. 354–358.
- [5] Рязин А.П. Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. С. 516–519.
- [6] Тумакаев Г.К., Степанова З.А. // ЖТФ. 1982. Т. 52. В. 11. С. 2305–2306.
- [7] Тумакаев Г.К. В сб.: Высокотемпературная газодинамика, ударные трубы и ударные волны/ Под ред. Р.И. Солоухина, Минск, 1983, с. 154–160.
- [8] Жуков Б.К., Масленников В.Г., Тумакаев Г.К. // ЖТФ, 1981. Т. 51, № 11. С. 2194–2196.

- [9] Ступоченко Е.В., Лосев С.А., Осипов Л.И. Релаксационные процессы в ударных волнах. М.: Наука, 1965.
- [10] Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979.
- [11] Ткаченко Б.К. В сб.: Высокотемпературная газодинамика, ударные трубы и ударные волны / Под ред. Р.И. Солоухина, Минск, 1983, с. 46-51.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
18 июля 1988 г.
В окончательной редакции
10 ноября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 2

26 января 1989 г.

0 2

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ДИССОЦИАТИВНОЙ ИОНИЗАЦИИ CO_2 ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

А.И. Жуков, А.Н. Завилопуло,
А.В. Снегурский, О.Б. Шпеник

К настоящему времени достаточно полно изучена диссоциативная ионизация двухатомных молекул типа H_2 , N_2 , C_2 , а для более сложных молекул, исключая, пожалуй, N_2O , комплексные исследования не проводились. Попутно заметим, что имеющиеся данные, полученные разными авторами, недостаточно согласуются между собой, а в некоторых случаях противоречат друг другу [1]. В данной работе впервые проведены комплексные исследования игловых распределений и энергетических спектров ионов O^+ и CO^+ , образующихся в результате диссоциативной ионизации молекул CO_2 электронным ударом.

Исследования проводились на установке с пересекающимися газодинамическим молекулярным и электронным пучками. Анализ ионов по массам проводился монополярным масс-спектрометром (МС) типа МХ-7301, источником электронов служила вращающаяся четырехэлектродная электронная пушка. Пушка и МС располагались в плоскости, перпендикулярной оси молекулярного пучка, а угол между направлением электронного пучка и направлением анализа ионов мог изменяться от 40° до 140° . Энергетический анализ ионов осуществлялся методом задерживающего потенциала, для чего на входе в МС размещалась трехэлектродная ионно-оптическая система. Детектирование ионов на выходе МС производилось КЭУ, а накопление и обработка сигнала велись измерительно-вычислительным комплексом на базе многоканального анализатора импульсов и микро-ЭВМ.

В ходе экспериментов в условиях однократности столкновений при различных энергиях бомбардирующих электронов (45-150 эВ) изуча-