

## РАДИОФИЗИКА

УДК 533.951

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПЛАЗМОЙ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В АРГОНЕ

Л. Д. Исаева, А. А. Кузовников, С. В. Мартишин, В. С. Свиридкина,  
А. К. Сухов, В. В. Тарасова

(кафедра электроники)

При прохождении ударной волны (УВ) в плазме на ее фронте происходит резкое увеличение свечения плазмы и возникает скачок потенциала. Обнаружено существование колебаний потенциала за фронтом УВ. При взаимодействии УВ со стратифицированной плазмой происходило разрушение страт.

В последнее время вопросы взаимодействия ударных волн (УВ) с плазмой привлекают большое внимание. В условиях реальных экспериментов распределения параметров плазмы обычно не являются однородными и стационарными. Представляет интерес исследовать взаимодействие УВ с плазмой в случае, когда в плазме нет сильных неоднородностей по температуре и концентрации заряженных частиц, и в случае, когда эти неоднородности существуют. В качестве неоднородности плазмы в данной работе использовались самовозбужденные бегущие страты.

Эксперименты проводились в электроразрядной ударной трубе (УТ), в которой зажигался стационарный тлеющий разряд постоянного тока в Аг. Экспериментальная установка состояла из конденсаторной батареи с разрядным устройством, конической разрядной камеры, продолжением которой служила стеклянная УТ диаметром 37 и длиной 700 мм. Наличие разгонного промежутка, равного 10 калибрам (30 см), позволяло получить УВ с плоским фронтом. Электроразрядная УТ формировала УВ в аргоне со скоростью  $v=4 \cdot 10^4$  см/с, что соответствует числу Маха  $M=1,4$ .

Инициирование разряда конденсаторной батареи осуществлялось подачей высоковольтного импульса (10 кВ) на поджигающий электрод. Высоковольтный импульс создавался с помощью специального устройства на тиратроне, которое запускалось от импульсного генератора схемы синхронизации. В эксперименте исследовалось прохождение УВ в плазме в двух режимах: спокойной плазмы (без развитых неустойчивостей) и стратифицированного разряда (с развитой ионизационной неустойчивостью). Схема синхронизации в первом режиме служила для запуска развертки осциллографа непосредственно перед приходом УВ в точку регистрации, во втором она обеспечивала жесткую привязку запуска осциллографа к голове страты.

Для создания плазмы использовался тлеющий разряд постоянного тока в Аг при давлениях нейтрального газа  $5 \div 10$  Тор. Чтобы исключить влияние сильных полей катодных частей разряда и создать условия для распространения УВ по положительному столбу, катод располагали в специальном отростке. УВ распространялась по разряду в направлении электронного дрейфа. При разрядных токах от 5 до 60 мА мощность разряда составляла от 1 до 6 Вт, концентрация электронов  $n_e=10^{10} \div 10^{11}$  см $^{-3}$ , температура электронов  $T_e=1 \div 3$  эВ. При разрядном токе 70 мА в плазме положительного столба существовали самовозбужденные бегущие страты. Их фазовая скорость  $v_\phi$  была направлена от анода к катоду и составляла  $u_\phi=5 \cdot 10^3$  см/с, частота следования страт была 1,2 кГц. Измеренная с помощью ФЭУ степень модуляции интегрального свечения плазмы в страте составляла около 50. Страты двигались навстречу УВ, их скорость была много меньше скорости УВ.

Для определения положения фронта УВ по нейтральной компоненте и определения ее скорости использовался лазерный ширен-метод [1]. Разрешающая способность по времени ширен-метода  $t$  определялась временем прохождения УВ через сечение лазерного луча. В условиях эксперимента  $t=1$  мкс. Скорость УВ измерялась с точностью 1%. Диагностика плазмы при прохождении по ней УВ осуществлялась с помощью ФЭУ и емкостного детектора [2], представляющего собой кольцо из медной проволоки диаметром 0,5 мм, расположенное поверх газоразрядной трубки. Фотоэлектрический метод регистрировал изменение интегрального свечения плазмы, а емкостный детектор — изменение ее потенциала в точке наблюдения. Оба метода не вносили искажений в исследуемый объект. Временное разрешение этих методов определялось временем, за которое УВ проходит щель коллиматора ФЭУ или емкостный детектор, и было приблизительно 5 мкс.

При распространении УВ в спокойной плазме скачку по нейтральной компоненте, регистрируемому с помощью ширен-метода, соответствовало резкое увеличение свечения плазмы (рис. 1). При увеличении разрядного тока амплитуда скачка по свечению росла. По мере прохождения УВ по плазме происходило уменьшение скачка свечения в ее фронте (рис. 2) и скорости ее распространения.

Интегральное свечение плазмы является функцией концентрации электронов ( $n_e$ ), нейтральных атомов ( $n_n$ ) и электронной температуры ( $T_e$ ) [3]. Характерное время изменения электронной температуры во фронте УВ за счет адиабатического сжатия [4] приблизительно равно времени между столкновениями иона и нейтрального атома  $\tau_{in} \approx 2 \cdot 10^{-8}$  с и мало отличается от характерного времени изменения концентрации электронов и нейтральных атомов. Следовательно, скачок свечения во фронте УВ обусловлен ростом как концентрации, так и температуры электронов. Время нарастания скачка по свечению в эксперименте определялось временным разрешением фотоэлектрического метода. При увеличении разрядного тока растет концентрация электронов, а их температура меня-

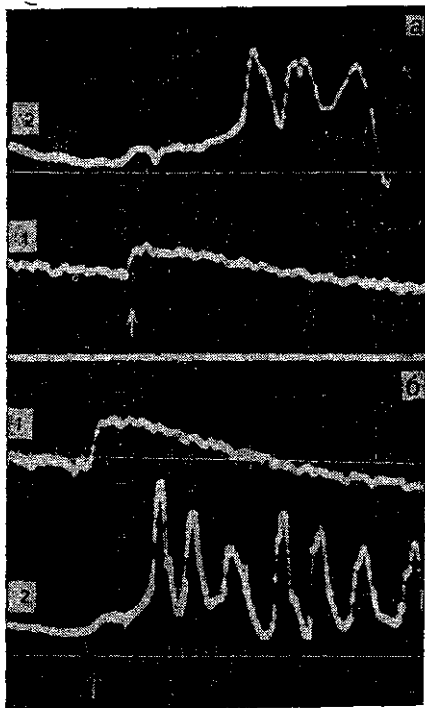


Рис. 1. Осциллограммы сигналов ФЭУ (1) и емкостного детектора (2), при различных токах разряда:  $I_p = 7$  (а) и 10 мА (б); расстояние от начала плазмы до места регистрации  $L = 8$  см,  $P = 6$  Тор, развертка 50 мкс/дел. Стрелкой показано положение фронта УВ

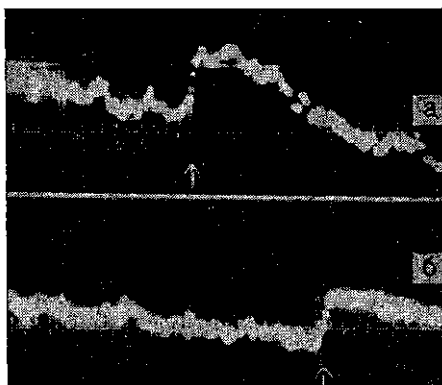


Рис. 2. Осциллограммы сигналов ФЭУ в различных точках плазмы:  $L = 5$  (а) и 9 см (б),  $I_p = 60$  мА,  $P = 6$  Тор, развертка 50 мкс/дел

ется слабо, это приводит к росту скачка свечения на фронте УВ, распространяющейся по плазме. Уменьшение скачка свечения по мере прохождения УВ по плазме, по-видимому, обусловлено уменьшением интенсивности УВ во время ее распространения по плазме.

На рис. 1 показан также сигнал емкостного детектора. Видно, что скачку по нейтральной компоненте соответствует скачок потенциала плазмы. За скачком потенциала через некоторый промежуток времени (от 20 до 100 мкс) возникают колебания потенциала частотой 20 кГц. При увеличении разрядного тока колебания потенциала появлялись через меньший промежуток времени относительно фронта УВ. Скачок потенциала на фронте УВ, распространяющийся по плазме, обусловлен амбиоплярной диффузией заряженных частиц во фронте УВ [4], так как его величина с учетом передаточной характеристики емкостного детектора была  $0,5 \pm 1$  В, что согласуется со значением амбиоплярного скачка потенциала.

При распространении УВ в стратифицированной плазме происходило взаимодействие УВ со стратами. На рис. 3 верхняя осциллограмма показывает сигнал ФЭУ, регистрирующего по интегральному свечению регулярные страты в плазме, нижняя —

процесс взаимодействия УВ со стратами. Из рис. 3 видно, что при взаимодействии УВ со стратой ионизационная волна разбивалась на серию релаксационных пиков с большой частотой следования, а следующая ионизационная волна уменьшалась по амплитуде. Известно, что в стратах электрический потенциал скачком возрастает в головной части страты и слабо меняется в остальной ее части [5]. С этим скачком потенциала связаны увеличение температуры электронов, усиление возбуждения и ионизации плазмы в узком по сравнению с длиной страты слое. Электрическое поле на фронте УВ взаимодействует с электрическим полем страты, вызывая изменение скоростей ионизации и возбуждения в страте. В результате страта разбивается на несколько релаксационных колебаний с большой частотой следования. Возможность влияния параметров внешнего скачка потенциала на возбуждение ионизационных волн показано в работе [6].

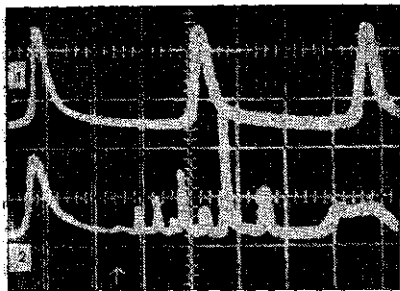


Рис. 3. Разрушение страт ударной волной: страты без УВ (1) и с УВ (2);  $I_p = 70$  мА,  $P = 10$  Тор,  $L = 4$  см, развертка 200 мкс/дел

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kiefer J. H., Lutz R. W. // Phys. Fluids. 1965. 8, N 7. P. 1393.  
 [2] Swain D. W., Brown S. C. // Ibid. 1971. 14, N 7. P. 1383. [3] Фриш С. Э. Оптические спектры атомов. М., 1963. [4] Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., 1963.  
 [5] Райзер Ю. П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М., 1980.  
 [6] Кузовников А. А., Свиридкина В. С., Сухов А. К., Тарасова В. В. III Всесоюз. конф. по физике газового разряда (Тезисы докладов). Киев, 1986. Ч. 3. С. 440.

Поступила в редакцию  
06.05.87

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1988. Т. 29, № 3

УДК 621.384.612

### ВЫНУЖДЕННОЕ ОНДУЛЯТОРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Ю. И. Богданов

(кафедра общей ядерной физики)

Рассмотрен линейный режим работы лазера на свободных электронах высокого усиления с учетом поперечной неоднородности электронного пучка. Проанализированы условия возникновения канализации электромагнитного излучения электронным пучком.

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) представляют собой перспективные источники когерентного ондуляторного излучения [1]. В последнее время в работах по теории ЛСЭ значительное внимание уделяется анализу эффектов, связанных с поперечной неоднородностью светового и электронного пучков [2, 3]. В ЛСЭ электронный пучок может вести себя подобно оптическому волноводу, когда излучение канализуется в основном внутри электронного пучка. Отметим, что ранее аналогичный эффект был описан в теории лазера на циклотронном резонансе [4].

В отличие от работ [2—4], где расчеты проведены численно, в настоящей работе благодаря выбору простой, но адекватной модели основные результаты представлены аналитически. Рассмотрение проводится в рамках двумерной модели ЛСЭ со спиральным ондулятором.