

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

02; 04; 07

Журнал технической физики, т. 59, в. 4, 1989

**ФОРМИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЗОН
ЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ
В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ**

В. А. Горшков, А. И. Климов, А. Б. Федотов, Ф. В. Шугаев

В работе [1], посвященной изучению структуры ударной волны (УВ) в слабоионизованной неравновесной плазме (СНП) было отмечено, что при определенных условиях в потоке за фронтом УВ возникают всплески электронной концентрации (n_e), значительно превышающие уровень n_{e2} на самом фронте УВ. В настоящей работе обнаруженное явление было исследовано более детально.

Эксперименты проводились на установке, подробно описанной в [1].

В качестве рабочих газов использовались Ar и CO₂, также Ar с примесью CO₂. Давление газа в трубе могло варьироваться от 1 до 30 Тор.

В рабочей секции (РС) создавался продольный электрический разряд, длина плазменной зоны составляла 30 см. Использовались два типа разрядов: импульсный разряд (ИР) и тлеющий разряд (ТР) постоянного тока. Параметры разрядов представлены в таблице.

Тип разряда	Газ	j , А/см ²	U , кВ	T , К	P , Тор	$\tau_{\text{гнм}}$
ИР	Ar	40	5	—	24	50
	CO ₂	40	6	—	6	50
ТР	Ar	62 мА/см ²	0.7	800	6	—
	CO ₂	62 мА/см ²	1.1	900	6	—

Примечание. j — плотность тока, U — напряжение, T — температура газа, $\tau_{\text{гнм}}$ — время горения, P — давление газа.

Температура в ТР измерялась хромель-алюмелевой термопарой. В качестве диагностических средств использовались два идентичных СВЧ интерферометра, приемники ИК излучения, лазерная шпирен-система, приемники интегрального излучения плазмы (ФЭУ). СВЧ интерферометры ($\lambda=8$ мм) позволяли измерять электронную концентрацию n_e в пределах от $3 \cdot 10^{10}$ до $5 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Интерферометры работали в линейном режиме, при котором величина регистрируемого СВЧ сигнала была пропорциональна n_e . В большинстве экспериментов рупоры СВЧ интерферометров были расположены в сечениях S_1 и S_2 ударной трубы соответственно на расстояниях 10 и 25 см от переднего края РС.

В качестве ИК приемников использовались фотосопротивления типа ФСГ-223А. Необходимые линии излучения выделялись с помощью узкополосных фильтров. В эксперименте регистрировалось собственное излучение молекул CO₂ на длинах волн 2.7 и 4.3 мкм. В результате обработки ИК сигналов определялась колебательная температура T_V молекул CO₂ [2]. Калибровка ИК датчиков производилась по известной колебательной температуре T_{Vz} за фронтом УВ в контрольных экспериментах без плазмы. Лазерная шпирен-система использовалась в эксперименте для идентификации положения фронта УВ на СВЧ и ИК сигналах, а также для измерения скорости УВ. Величина шпирен-сигнала была пропорциональна в нашем случае градиенту плотности нейтралов в СНП на фронте УВ [3]. Лазерный луч пере-

секал ударную трубу вблизи передних кромок СВЧ рупоров, ИК датчик и ФЭУ располагались точно над лазерным лучом.

Характерные ИК и СВЧ сигналы в ИР представлены на рис. 1, 2 (аналогичные сигналы были получены и в ТР). Начальные участки A_1, B_1 (A_2, B_2) на осциллограммах отражают распад плазмы ИР в отсутствие УВ с характерным временем $\tau_p = 10^{-4}$ с. В моменты прохождения

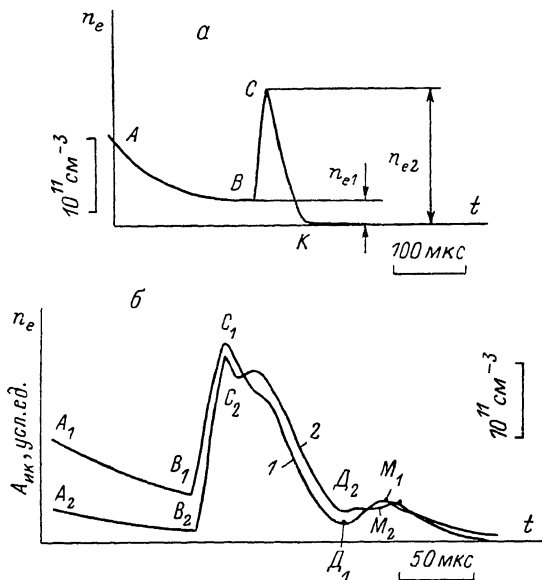


Рис. 1.

а — СВЧ сигнал, ИР, $\tau_{\text{зад}}=1000$ мкс, CO_2 , 6 Тор, $V_0=900$ м/с; б — СВЧ сигнал (1) и ИК сигнал (2), ИР, $\tau_{\text{зад}}=400$ мкс, $\text{Ar} : \text{CO}_2=1 : 1$, 6 Тор, $V_0=1000$ м/с. AB — распадающаяся плазма, BC — фронт УВ, K — граница плазмы, M_1, M_2 — ДПО, V_0 — скорость на входе в РС.

фронта УВ через сечение S_1 (или S_2) на СВЧ и ИК сигналах наблюдаются резкие подъемы B_2C_2 (B_1C_1). Возрастание СВЧ сигналов на этих участках обусловлено увеличением электронной компоненты плазмы за фронтом УВ. Подъемы на ИК сигналах определялись как сжатием газа, так и повышением колебательной температуры за фронтом УВ.

В результате обработки СВЧ и шпирен-сигналов, полученных на измерительной базе ~ 5 см, было показано, что на фронте УВ величина изменения электронной компоненты n_{e2}/n_{e1}

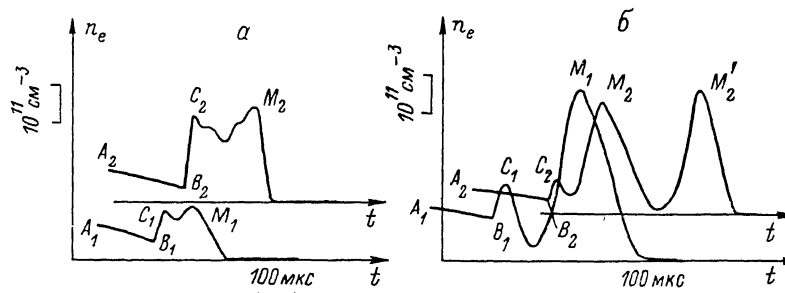


Рис. 2. Формирование ДПО за фронтом УВ в плазме ИР.

Осциллограммы СВЧ сигналов: а — CO_2 , 6 Тор, $\tau_{\text{зад}}=400$ мкс, $V_0=1300$ м/с; б — Ar , 24 Тор, $\tau_{\text{зад}}=100$ мкс, $V_0=800$ м/с. Сигналы получены в сечении $S_1=10$ см (1) от переднего края РС и $S_2=25$ см (2).

(рис. 1) близка к величине $V_{УВ}/(V_{УВ} - V_n)$, где $V_{УВ}$ — скорость УВ в плазме, V_n — массовая скорость за УВ, которая измерялась по движению границы плазмы K , регистрируемой различными датчиками. Из сохранения потока массы на волне следовало, что в плазме выполнялось соотношение

$$n_{e2}/n_{e1} \cong \frac{V_{УВ}}{V_{УВ} - V_n} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

Колебательная температура СНП в момент прихода УВ к измерительным датчикам не превышала 1500 К, за фронтом УВ колебательная температура в СНП поднималась до 3000—4000 К (ТР, CO_2 , $V_0=1300$ м/с).

Уменьшение СВЧ и ИК сигналов (рис. 1) на участке C_1D_1 (C_2D_2) вызвано процессами рекомбинации плазмы в ударно-сжатом газе, а также выносом ее из зоны регистрации спутным потоком за УВ.

При определенных режимах создания плазмы в исследуемом газе (ТР — с мощностью накачки $g \geq 1$ Вт/см³, ИР — при временах задержки прихода УВ в РС относительно начала разряда $\tau_{\text{зад}} \approx 100-400$ мкс) на СВЧ и ИК сигналах наблюдалось появление дополнительных всплесков M_1 , M_2 , следующих за фронтом УВ (рис. 1, 2). В отдельных экспериментах наблюдалось формирование до 4-х дополнительных всплесков. Из обработки полученных осциллограмм следует, что отдельный всплеск M_1 (M_2) образуется непосредственно за фронтом УВ в момент ее входа в плазменную область, а затем сносится спутным потоком и отстает от фронта УВ M_2' (рис. 2, б). Максимальные значения в этих дополнительных плазменных образованиях (ДПО) M_1 , M_2 могли превосходить n_{e2} непосредственно на фронте УВ (а также превышать в 1.5—2 раза максимальную электронную концентрацию, наблюдаемую в ИР, в момент протекания максимального тока в нем) (рис. 2). Характерные продольные размеры ДПО были близки к диаметру ударной трубы.

Эксперименты показали, что амплитуда n_e в дополнительных плазменных всплесках за фронтом УВ M_1 , M_2 (рис. 2, б) имеет резко выраженный максимум при изменении параметров V_0 , $\tau_{\text{зад}}$. Наибольшие всплески n_e за фронтом УВ наблюдались при $\tau_{\text{зад}} \approx 400$ мкс в Ar ($V_0 \approx 800$ м/с), в CO_2 ($V_0 \approx 1000$ м/с).

Параметры ДПО, а также условия, при которых они образуются не зависят от начального давления исследуемого газа в диапазоне от 3 до 30 Тор.

Обнаружено, что рекомбинация плазмы в этих образованиях происходит аномально долго по сравнению с рекомбинацией плазмы в самом разряде без УВ в момент обрыва тока в нем. Характерные времена рекомбинационных процессов в ДПО достигают $10^{-3}-10^{-2}$ с. Отметим, что за эти времена не происходит существенного изменения размеров ДПО (размытия их границ).

Всплески ИК излучения из области ДПО (рис. 1) появляются одновременно с всплесками n_e . Временной ход ИК сигнала на участке $C_2D_2M_2$ синфазно отслеживает временную эволюцию сигнала СВЧ на этом же участке.

В момент времени, соответствующий появлению ДПО в зоне регистрации, на шпиренсигнале также обнаруживаются небольшие всплески. Однако соответствующие изменения плотности газа при этом незначительны. Таким образом, возрастание n_e в ДПО не связано с изменением плотности газа в них.

В указанном режиме одновременно с всплесками n_e в ДПО появляются «провалы» в интенсивности интегральной светимости плазмы в видимом диапазоне частот. Аналогичный характер светимости в прифронтальной зоне УВ в СНП был нами обнаружен ранее [1].

Отмеченные особенности, по-видимому, могут быть объяснены процессами стимулированной ионизации возбужденного газа за фронтом УВ в плазме (например, процессом ассоциативной ионизации [4]).

Литература

- [1] Горшков В. А., Климов А. И., Мишин Г. И. и др. // ЖТФ. 1987. т. 57. Вып. 10. С. 1893—1898.
- [2] Крючков С. И., Кудрявцев Н. Н., Новиков С. С. и др. Препринт ИТМО. № 15. Минск, 1983.
- [3] Kiefer J. H., Naudik J. C. // Proc. of the 12th Intern. Symp. on Shock Tubes and Waves. Jerusalem, 1980. P. 97—110.
- [4] Плазма в лазерах / Под ред. Бекефи Дж. М.: Энергоиздат, 1982. 310 с.

Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова
Физический факультет

Поступило в Редакцию
2 октября 1988 г.