

УДК 533.9.07

СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ ПЛАЗМЕННОГО ВОЛНОВОДА, ОБРАЗОВАННОГО ДЛИННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ИСКРОЙ

А. В. Шелоболин

Экспериментально определены две собственные частоты плазменного волновода, образованного длинной лазерной искрой. Проведены оценки плотности носителей в этом волноводе.

В [1] сообщалось об экспериментах по иницированию электрического пробоя газов (ЭПГ) длинной лазерной искрой (ДЛИ). В [2] определялась продольная граница ЭПГ при малых (~ 1 кВ/см) напряженностях электрического поля и было высказано предположение о волноводном характере ЭПГ при иницировании его ДЛИ. В [3] эта гипотеза получила подтверждение при скоростном фотографировании волны пробоя. Соответственно большой интерес представляют собственные частоты продольных волн в плазменном цилиндрическом резонаторе, образованном ДЛИ.

Схема и условия эксперимента аналогичны представленным в [1, 2]. Использовалась камера с диаметром окружности обратного токопровода 18 см. Расстояние между электродами, в качестве которых применялись две трубы диаметром 12 мм, составляло либо 7,5 см, либо 10 см. На один из электродов монтировался излучатель продольного электрического поля, который подключался к одному из элементов емкостного делителя, включенного параллельно основному емкостному накопителю. Обмотка излучателя и этот конденсатор образовывали резонансный контур положительной обратной связи. Частотно-фазовое рассогласование делало эту связь слабой. Постоянное напряжение на камере поддерживалось ниже границы ЭПГ.

Подбором собственной частоты контура обратной связи возбуждались колебания в цилиндрическом плазменном волноводе, образованном ДЛИ и эволюционирующем в приложенном электрическом поле. Регистрация возникающих токовых колебаний осуществлялась поясом Роговского с выводом сигнала на осциллограф С8-13. Источником

ДЛИ служило излучение неодимового лазера (10 Дж, 3 нс). Все эксперименты проводились в воздухе при атмосферном давлении.

По осциллограммам тока в разрядном промежутке, представлявшим собой затухающие синусоиды, определялся период колебаний τ и декремент затухания γ . Удалось зарегистрировать две моды колебаний: высокочастотную с параметрами $\tau = 0,5$ мкс, $\gamma = (1,5 \pm 0,3)$ мкс и низкочастотную с параметрами $\tau = 1,5$ мкс, $\gamma = (23 \pm 7)$ мкс. При этом в качестве погрешности γ указан статистический разброс между отдельными экспериментами. Для τ подобный разброс не наблюдался, и погрешность значения этой величины можно оценить погрешностью временных осциллографических измерений, т.е. она менее 10%. Амплитудная калибровка ПР экспериментально не проводилась, однако расчетная чувствительность ПР позволяет утверждать, что амплитуды тока в первом максимуме составляли 0,2 – 0,4 А. Изменение межэлектродного расстояния с 7,5 см до 10 см заметного влияния на регистрируемые параметры не оказало.

Основной анализ полученных результатов сводится к идентификации зарегистрированной в [3] первичной волны ЭПГ и определению состояния плазмы канала, в котором она распространяется. Дополнительный анализ сводится к идентификации вторичной волны на базе имеющихся данных.

Наблюдавшаяся в [3] первичная волна ЭПГ должна быть отнесена к ионно-звуковым волнам, поскольку согласно фотографическим экспериментам скорость ее распространения соответствовала тепловой скорости ионов воздуха (10^5 см/с), при этом наблюдался существенный энергообмен между волной и средой. К классу поверхностных, а не объемных волн эту волну можно отнести в связи с тем, что в настоящем эксперименте декремент ее затухания зависит от частоты более сильно, чем линейно.

При анализе структуры канала, в котором распространяется первичная волна, следует выделить область допустимых значений температур (T) и плотностей носителей заряда (n) на плоскости T - n . Из фотографических экспериментов [3] вытекает требование для дебаевского радиуса $r < 0,1$ см. Отсюда следует $T/n < 4 \cdot 10^{-8}$ эВ · см³. С другой стороны, любая компонента плазмы канала должна иметь температуру не ниже комнатной, т.е. $T > 0,025$ эВ. Совместное рассмотрение этих условий приводит к требованию на плотность носителей заряда $n > 6 \cdot 10^5$ см⁻³. При этом следует подчеркнуть, что поскольку в исходные предпосылки масса носителей заряда не входила, то это условие распространяется как на электронную, так и на ионную компоненты.

Учитывая, что поверхностная волна распространяется с частотой, близкой к плазменной, можно определить соответствующие резонансным экспериментам критические

плотности электронов и ионов на этой поверхности. Для электронной компоненты эти значения составят $2,5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ и $2,2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ соответственно для НЧ и ВЧ зарегистрированных мод. Для ионной компоненты эти величины будут более, чем на четыре порядка выше, т.е. 10^8 см^{-3} и 10^9 см^{-3} (для ионов O_2^- и N_2^+). Эти плотности ионов соответствуют результатам работы [4], где аналогичные значения плотностей носителей получены в сходных условиях как из анализа балансных уравнений, так и из прямых зондовых измерений.

Сравнивая значения критических плотностей носителей заряда с величиной, вытекающей из анализа области допустимых значений, можно сделать вывод, что за коллективные эффекты в первичной волне ответственны исключительно ионы, а электроны присутствуют в ней как газ.

Вторичную волну следует интерпретировать как электронную. Предпосылкой для этого является совпадение оценки ее скорости, вытекающей из фотографических экспериментов [3], с тепловой скоростью электронов, а также результаты работы [4], где ЭПГ начинался сразу со вторичной волны, а средняя ее скорость изменялась в зависимости от условий эксперимента в диапазоне $10^7 - 10^8 \text{ см/с}$. Для интерпретации вторичной волны как поверхностной или объемной прямых экспериментальных данных недостаточно. Вместе с тем из приведенных выше оценок можно предположить, что переход первичной волны во вторичную обусловлен наработкой электронной компоненты в процессе распространения первичной волны, а не нелинейной перекачкой энергии из поверхностной волны в объемную. Оценивая из анализа области допустимых значений необходимую плотность электронов во вторичной волне, можно получить условие порога ее возникновения $n > 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Считаю необходимым выразить благодарность фирме SHENTH за помощь в проведении этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] З в о р ы к и н В. Д. и др. Физика плазмы, 5, вып. 5, 1140 (1979).
- [2] З в о р ы к и н В. Д. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 8, 41 (1980).
- [3] Н и к о л а е в Ф. А. и др. Phenomena in Ionized Gases, Minsk, 1981, p. 1304.

[4] Коорман D. W. and Саум К. А. Appl. Phys., **44**, N 12, 5328 (1973).

Поступила в редакцию 7 апреля 1997 г.

После переработки 10 сентября 1997 г.