

РАСПАД ИЗОЛИРОВАННОГО ОТ СТЕНОК ВОЛНОВОДА
ПОТОКА БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ,
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В. И. Баринов, И. Р. Геккер, В. А. Иванов

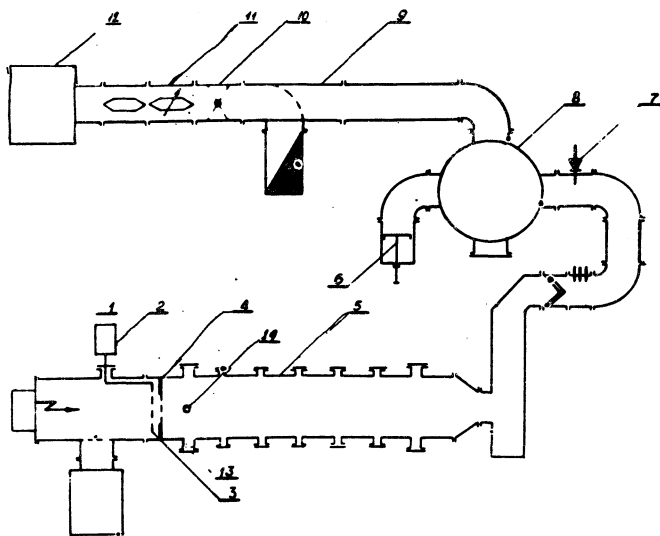
УДК 533.95

Исследуется распад плазмы, взаимодействующей с интенсивным импульсным СВЧ излучением. Измеряются энергия и токи ускоренных электронов, выходящих из "скин-слоя" на переднем фронте плазменного потока, имеющего резкую границу.

Одним из актуальных вопросов при решении проблемы управляемого синтеза является нагрев плазмы электромагнитным излучением, в частности, являющийся местом при создании лазерной плазмы. Возможный механизм поглощения энергии волны в плазме может быть связан с аномальной диссипацией, связанной развитием неустойчивости плазмы. Для понимания физики протекающих при этом процессов существенно проведение моделирующих экспериментов в различных диапазонах длин волн.

При взаимодействии электромагнитного излучения Ю-см диапазона с потоками бесстолкновительной незамагниченной плазмы ($n/n_c = 0,4 \div 2,0$ где n_c - критическая концентрация плазмы; $T_e \approx 5 \text{ эВ} \gg T_i$), заполняющими все сечения металлического волновода, начиная с некоторого значения напряженности электрического поля бегущей волны $E_0 > E_{\text{пор}} \approx 0,1 \text{ кВ/см}$, наблюдалась аномальная диссипация энергии волны в плазме, проявляющаяся в аномально большом поглощении /1-3/, появлении ускоренных электронов /3,4/ и распаде плазмы /2/. Распад плазмы и ускоренные концы также отмечались в экспериментах с ограниченными плазменными потоками /5,6/. Поскольку при контакте плазмы с поверхностью волновода определенную роль могли играть

пристеночные явления, то авторами /7/ было проведено изучение аномального поглощения СВЧ волны в плазменном потоке, оторванном первоначально от стенок волновода. В частности, было показано, что



Р и с. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - плазменный искровой источник; 2 - блокинг-генератор; 3 - отсекающая плазму медная сетка (ячейка $0,03 \times 0,03 \text{ мм}^2$); 4 - металлическая диафрагма ($\varnothing 8$ и 3 см); 5 - вакуумный волновод; ($\varnothing 14 \text{ см}$); 6 - короткозамыкающий поршень; 7 - СВЧ - зонд; 8 - волноводный переключатель; 9 - направленный ответвитель; 10 - согласующая секция; 11 - ферритовый вентиль - регулируемый ослабитель; 12 - СВЧ генератор; 13 - многоотсечный плазменный зонд; 14 - экранированный плазменный зонд.

по крайней мере, для коротких СВЧ импульсов ($\tau \approx 0,5 \text{ нсек}$) контакт плазмы с металлическими поверхностями не сказывался на величине коэффициента поглощения $|D|^2$. В данной работе проводится исследование распада изолированного от стенок волновода потока плазмы, измерение токов и энергии ускоренных электронов и сопоставление полученных результатов с данными по СВЧ поглощению.

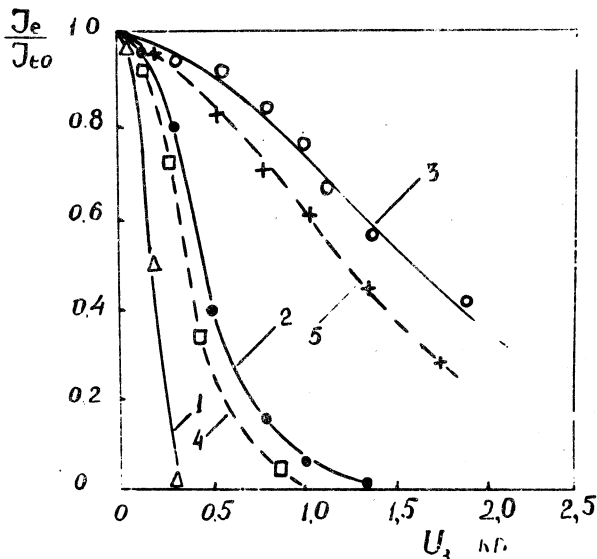
Эксперименты проводились на установке с Н_{II}-волной /7/. Плазма, создаваемая искровым источником, инжектировалась ($v \sim 10^7 \text{ см/сек}$)

в металлический волновод ϕ 14 см через затянутую редкой сеткой диафрагму ϕ 8 см (или ϕ 3 см), располагаемому в 60 см от источника (рис. 1). Формирование крутого плазменного фронта протяженностью не выше 3 см, т.е. порядка $0,1 \lambda_g$, где λ_g - длина волны в волноводе, обеспечивалось подачей отрицательного импульса на дополнительную металлическую сетку, расположенную в 1 см от диафрагмы /7,8/. При этом получался однородный по концентрации цилиндрический участок плазменного потока длиной около 15 см (неоднородность не выше $\pm 10\%$ от значения концентрации в средней части потока). Значения концентрации плазмы n измерялись с помощью экранированного плазменного зонда (точность измерений $+10\%$). При определении абсолютных значений n зонд калибровался по минимальному порогу развития неустойчивости (v_E/v_{Te}) пор (где $v_E = eE_0/m\omega_0$ - скорость осциллирующий электрона и $v_{Te} = \sqrt{kT/m}$ - тепловая скорость), соответствующему $n/n_c = 1/5,9$. Порог неустойчивости отождествлялся с порогом появления ускоренных электронов, регистрируемых многосеточным зондом, работающим в целях повышения чувствительности в "интегральном" режиме /4/ и располагаемом в одном сечении с экранированным зондом.

Плазма взаимодействовала с H_{II} -волной, мощность которой могла повышаться до 1 Мвт. СВЧ импульсы длительностью $\tau \approx 0,5$ мксек подавались в тот момент, когда передний фронт плазмы перемещался примерно на расстояние в 10 см от диафрагмы. Измерения, проведенные на малом уровне СВЧ мощности, показали наличие почти полного отражения H_{II} -волны ($|D|^2 \approx 0$) от переднего фронта движущегося плазменного потока (при $n/n_c \geq 0,9$). Возрастание уровня СВЧ мощности приводило к уменьшению отражения ($|D|^2 \approx 0,1$ при $E_0 = 3,6$ кв/см) и сильному распаду плазмы, сопровождаемому вылетом ускоренных частиц /7/.

Распределения быстрых электронов по энергиям ($w_e \geq eU_a$, где $U_a = -20$ - потенциал антидинаatronной сетки) измерялись одновременно с помощью двух многосеточных зондов (МСЗ), располагаемых в боковых патрубках волновода в одной плоскости и двух взаимно перпендикулярных направлениях: параллельно и перпендикулярно к вектору напряженности электрического поля волны \vec{E} (рис. 1). Из кривых задержек, приведенных на рис. 2, следует, что при $n/n_c > 1$ и $E_0 = 3,6$ кв/см появляются ускоренные электроны с энергией 2 кэв

и выше, что почти на два порядка превышает энергию их осцилляторного движения в СВЧ поле (см. также /3,4/). Энергии электронов, вылетающих из диафрагмированного плазменного потока, оказываются примерно одинаковыми во всех направлениях (однако, несколько мень-



Р и с. 2. Кривые задержки тока быстрых электронов, покидающих плазменный поток ($n/n_e = 0,9 \div 1,5$). 1 - $E_0 = 0,35$ кв/см; 2 - $E_0 = 1,5$ кв/см; 3 - $E_0 = 3,6$ кв/см (все для МЗ||Е); 4 - $E_0 = 1,5$ кв/см; 5 - $E_0 = 3,6$ кв/см (все для МЗ⊥Е).

шими в направлении, перпендикулярном \vec{E}). Плотность тока ускоренных электронов вдоль направления \vec{E} превышает в 2-5 раз плотность тока, измеренную поперек \vec{E} . При этом анизотропия токов убывает с возрастанием уровня СВЧ мощности. Отметим далее, что указанная анизотропия, которая могла быть вызвана неоднородностью поля по сечению потока, сохраняется и при уменьшении диаметра потока до 3 см, когда электрическое поле становится практически однородным в пределах сечения потока. Наблюдаемые явления, по-видимому, можно связать с тем, что электроны, первоначально ускоренные вдоль \vec{E} , испытывают рассеяние как на границах плазменного потока, так

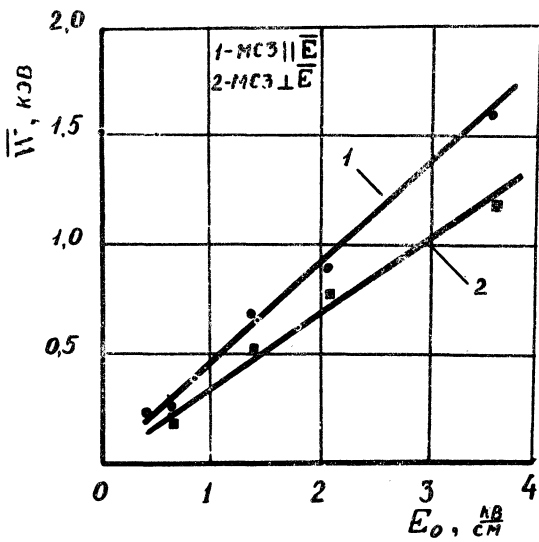
и на ионно-звуковых колебаниях плазмы. Последние имеют в нашем случае частоту около 5 МГц и, как показали измерения с помощью двойного зонда с плавающим потенциалом, возникают одновременно с появлением ускоренных электронов, что не противоречит представлениям о развитии параметрической неустойчивости плазмы /9/.

Средняя энергия быстрых электронов, вылетающих как вдоль, так и поперек \vec{E}_0 , растет почти линейно с увеличением E_0 (рис. 3а), а плотность тока электронов примерно пропорционально E_0^2 (рис. 3б). Средние энергии быстрых электронов и плотность их тока слабо зависят от концентрации плазмы в случае $n/n_0 = 0,9 \div 1,5$. При $n/n_0 < 0,9$ энергия и плотность тока резко падают. Таким образом, поток энергии Σ , переносимый быстрыми электронами в единицу времени, растет как E_0^3 , т.е. как $p^{3/2}$, а отношение $\eta = \Sigma/p$, характеризующее эффективность поглощения, растет как $p^{1/2}$, т.е. как E_0 . Такой же рост, по-видимому, имеется и для $|D|^2 / \eta$. По порядку величины значение поглощенной СВЧ энергии совпадает с энергией, уносимой из "скин-слоя" быстрыми электронами. Возможно, что заметная доля энергии уносится также ионной компонентой плазмы /1/.

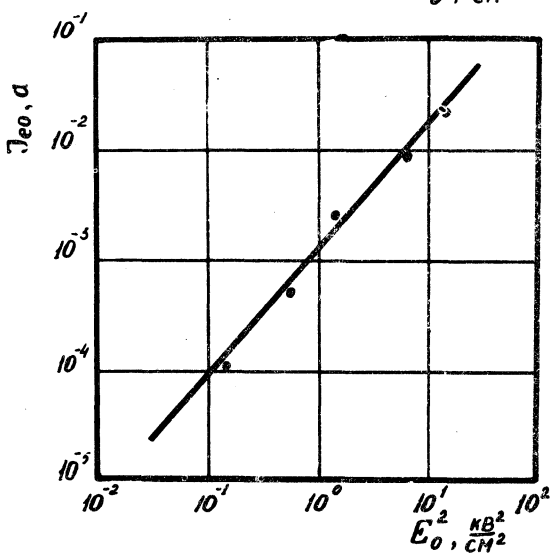
Изменяя задержку времени между моментом прохождения крутого переднего фронта плазменного потока через плоскость расположения многосеточных зондов и моментом запуска СВЧ генератора, удалось установить, что интенсивный вылет быстрых электронов происходит из узкого слоя плазмы протяженностью в 5–7 см ("скин-слой") на переднем фронте плазменного потока при изменении в широком диапазоне значений E_0 . Примерно на такую же глубину происходит распад плазмы на переднем фронте потока за время меньше 0,5 мксек при максимальном значении $E_0 = 3,6$ кв/см (при этом концентрация падает более, чем в 20 раз), что устанавливается с помощью измерений с миниатюрными экранированными зондами (внешний диаметр 3 мм), вводимыми в волновод перпендикулярно к E . В случае потока малого диаметра (\varnothing 3 см) вылет быстрых электронов происходит по всей его длине.

Отключение системы электрической отсечки плазмы, формирующей крутой фронт плазменного потока, существенно не изменяя v_p в наиболее плотной части потока, как и в случае экспериментов по поглощению СВЧ мощности /7/, не приводило к заметным изменениям результатов измерений.

а



б



Р и с. 3. Энергетические зависимости быстрых электронов ($n/n_0 = 0,9 \div 1,5$; $U_a = -50$ в). а - средняя энергия электронов энергии и тока в функции E_0 ; б - ток электронов в функции E_0^2 .

Как и в работе /7/ для проверки влияния контакта плазмы со стенками волновода в плазменный поток разных диаметров (\varnothing 8 и 3 см) вводилась нормально к \vec{E} медная пластинка (ось пластинки находилась в плоскости расположения многосеточных зондов). Однако, существенных изменений ни в распределениях электронов по энергиям, ни в пороговых значениях E_0 , также как и в измеренных ранее значениях $|D|^2$, замечено не было. Отметим, что геометрия входного отверстия зонда и разазты вводимой пластинки исключали возможность попадания в отверстие зонда (ось зонда направлена вдоль \vec{E} электронов, выходящих непосредственно с ближайших боковых стенок волновода. Введение медной пластинки в волновод, существенно изменившей условия для появления быстрых электронов со "стенок" (при этом сильно изменялась геометрия, материалы и т.п.), не давало заметного изменения результатов измерений, что свидетельствовало в пользу "плазменного" происхождения электронов. Кроме того полученные результаты говорят о том, что введение в плазму миниатюрных металлических тел, например, экранированных зондов, не должно существенно сказываться на протекании процессов поглощения и нагрева электронов в плазме, по крайней мере, для коротких СВЧ импульсов длительностью не свыше 0,5 мсек.

Поступила в редакцию
24 апреля 1973 г.

Л и т е р а т у р а

1. И. Р. Геккер, О. В. Сизухин. Письма в ЖЭТФ, 9, 108 (1969).
2. И. Р. Геккер, О. В. Сизухин. Труды 9-ой Межд. конф. по явл. в иониз. газах, Бухарест, 1969 г., стр. 542; препринт ФИАН, № 61, 1969 г.
3. К. Ф. Сергейчев, Е. Е. Трофимов. Письма в ЖЭТФ, 13, 236 (1971).
4. В. И. Барников, И. Р. Геккер, О. В. Сизухин, Э. Г. Хачатурян. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 3,41 (1971); препринт ФИАН № 25, 1971 г.
5. К. Ф. Сергейчев. Труды 9-ой Межд. конф. по явл. в иониз. газах, Бухарест, 1969 г., стр. 540; препринт ФИАН, № 61 стр. 12, 1969 г.

6. И. Р. Геккер, К. Ф. Сергейчев, В. Е. Трофимов. Труды 8-ой Межд. конф. по явл. в иониз. газе, Вена, 1967 г., стр. 395.
7. В. И. Баринов, И. Р. Геккер, В. А. Иванов. Школы в ЖЭТФ, (1973) (в печати).
8. В. И. Баринов. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 6, 8 (1971).
9. Н. Е. Андреев, А. Ю. Кирей, В. П. Селвин. ЖЭТФ, 57, 1024 (1969).