

## ГЕНЕРАЦИЯ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЧ ВОЛНЫ С БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМОЙ

В. И. Баринов, И. Р. Геккер,  
О. В. Сизухин, Э. Г. Хачатурян

В работе /1/ было обнаружено аномально сильное поглощение электромагнитной волны в бесстолкновительной немагнитной плазме. Эксперименты проводились в 10-сантиметровом диапазоне, когда  $H_{11}$ -волна в круглом волноводе взаимодействовала с движущимся ей навстречу плазменным потоком с плавно нарастающей концентрацией. Эффект наблюдался по достижении некоторого граничного значения напряженности электрического поля  $E_0$  ( $E_{ог} \approx 0,2$  кв/см), где  $E_0$  - максимальная напряженность электрического поля в вакуумном волноводе. При увеличении  $E_0$  свыше  $E_{ог}$  происходило резкое нарастание коэффициента поглощения СВЧ мощности  $|D|^2$  вплоть до десятков % ( $E_0 = 1-2$  кв/см), что не могло быть объяснено кулоновскими столкновениями ( $\omega_{Le} \sim \omega_0 \gg \nu_{e1}$ , где  $\omega_{Le}$  - частота электронных плазменных колебаний,  $\nu_{e1}$  - частота электрон-ионных столкновений). Аномальное поглощение волны в бесстолкновительной плазме связывалось с развитием неустойчивости /1-5/, приводящей к существенной турбулизации плазмы и увеличению взаимодействия частиц с флуктуационными полями в плазме ( $\nu_{эфф} \sim \omega_0 \gg \nu_{e1}$ ).

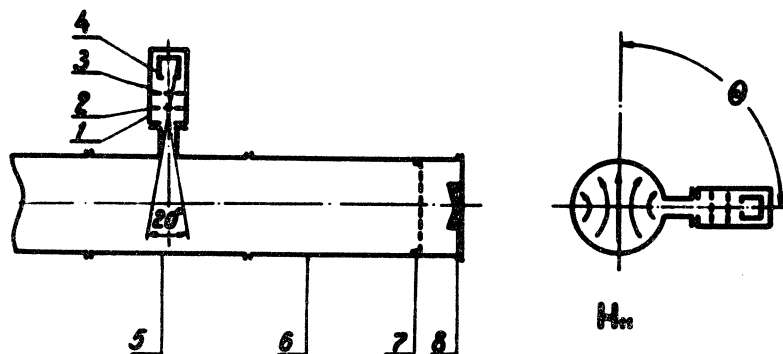
В ряде работ было показано, что взаимодействие волн с плазмой сопровождается интенсивным распадом плазмы /1, 6-11/, причем энергии ионов достигают 1

Кэв. Ранее в экспериментах с магнитоактивной бесстолкновительной плазмой /11/ был зарегистрирован интенсивный нагрев электронов, который также связывался с возбуждением турбулентности плазмы, находящейся в СВЧ и сильном магнитном полях. Поэтому следовало ожидать, что аномальное поглощение волны /1/ вызывает нагрев электронов и в незамагниченной плазме, что в конечном итоге приводит к ускоренному амбиполярному разлету плазменного потока.

В настоящей работе была поставлена цель: выяснить, происходит ли генерация быстрых электронов в условиях наблюдения аномального поглощения СВЧ волн в бесстолкновительной плазме /1/. Как и ранее, плазменный поток создавался искровым инжектором /6/ (водородно-углеродная плазма). Максимальная концентрация плазмы в потоке  $n_{\text{макс}} > n_c$ , где  $n_c$  - критическая концентрация плазмы в свободном пространстве. Концентрация плазмы измерялась с помощью экранированных плазменных зондов. Измерение энергии электронов проводилось по методу тормозящего поля с помощью трехэлектродного зонда, располагаемого на выходе бокового патрубка, запредельного для СВЧ ( $l = 2$  см), вне круглого волновода /1/, секция которого могла поворачиваться вокруг оси (рис. 1). Угловая апертура зонда составляла  $20^\circ$ ; зонд мог принимать электроны, выходящие из сравнительно узкого слоя ( $\Delta \sim 5$  см) пролетающего мимо зонда плазменного сгустка ( $v \sim 10^7$  см/сек). Импульсы ускоренных электронов регистрировались в момент взаимодействия проходящей плазмы с СВЧ полем.

Кривые задержки (рис. 2) были получены при измерении интеграла электронного тока за импульс. Поскольку замечалось уменьшение тока на зонд при удалении его от стенки волновода, то можно предположить, что на полученные зависимости в области электронов с малой энергией могло существенно повлиять тепловое или кулоновское расширение плазмы. Однако этот про-

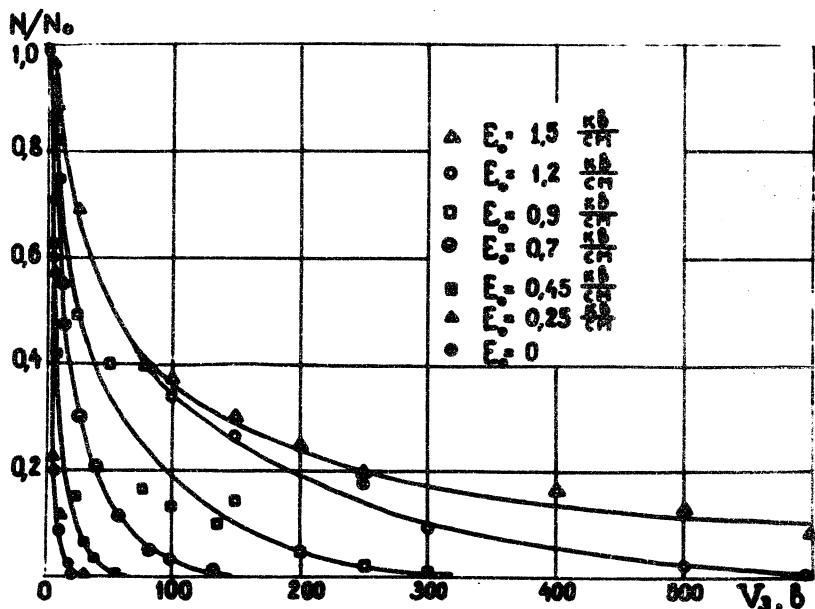
цесс, по-видимому, не мог оказать заметного влияния на электроны с большими энергиями. Из распределений электронов по энергиям следует, что максимальная энергия электронов резко возрастает по мере увеличения  $E_0$  (рис. 2). При этом возрастает и абсолютное значение тока на зонд. В измерениях энергии электро-



Р и с. 1. Схема эксперимента. 1 - трехэлектродный зонд; 2 - первая (экранирующая) сетка,  $V_1 = 0$ ; 3 - вторая (разрывающая) сетка,  $V_2 = +100$  в; 4 - коллектор Фарадея (анализатор энергии электронов),  $V_3 = 0 \div -600$  в; 5 - вращаемая диагностическая секция; 6 - круглый волновод; 7 - металлическая сетка; 8 - плазменный инжектор.

нов вдоль линий электрического поля  $H_{11}$ -волны ( $\theta = 0$ ) при  $E_0 = 1$  кв/см появляются "горячие" электроны с энергиями в сотни эв, что более чем на порядок превышает энергию осцилляции электронов в СВЧ поле ( $V_E = eE_0/m\omega_0$ ), равную 5 эв. Отметим также, что максимальная энергия электронов в инжектируемой плазме не превосходит 10-15 эв ( $T_e \approx 5$  эв), а высота квазипотенциального СВЧ барьера, создаваемого  $H_{11}$ -волной, равняется 2,5 эв. Максимальные энергии возможных вторично-эмиссионных электронов не могут превысить 20 эв. Получение ускоренных электронов со столь большими энергиями (аналогично /11/)

свидетельствует о коллективном характере процесса приобретения энергии электронами плазмы, помещенной в сильное СВЧ поле. Сравнение распределений электронов по энергиям (рис. 2) показывает, что появление ускоренных электронов происходит при поро-



Р и с. 2. Интегральное распределение электронов по энергиям ( $N/N_0$  - доля электронов с энергией, большей чем  $eV_3$ ) при различных напряженностях электрического поля  $E_0$  ( $V_H = 3$  кв,  $\tau_0 = 5$  мксек,  $\theta = 0$ ).

вом значении  $E_0, E_{ог} \approx 0,25$  кв/см, которое совпадает со значением  $E_{ог}$ , определенным по началу СВЧ поглощения /1/.

Поскольку в наших экспериментах наблюдалась слабая зависимость энергетического распределения ускоренных электронов от напряжения на инжекторе плазмы  $V_u$ , т.е. от  $n_{макс} > n_c$ , то можно было предполо-

жить, что наиболее эффективное ускорение электронов плазмы происходит в некотором слое разреженной плазмы ( $n < n_c$ ) на фронте плазменного сгустка. Далее, поскольку значения  $E_{оп}$  или, что то же  $(v_E/v_{Te})_{пор}$ , где  $v_{Te} = \sqrt{kT_e/m_e}$  - начальная тепловая скорость электронов, резко уменьшаются с приближением  $n$  к  $n_c$  /8, 12, 13/, то следовало ожидать, что рассматриваемые процессы будут наиболее энергично протекать при некоторой оптимальной концентрации плазмы  $n(z)$  в волноводе ( $n_{сг} < n < n_c$ , где  $n_{сг}$  - концентрация "отсечки" для волновода /14,15/), куда проникает СВЧ поле.

Более детальные измерения концентраций плазмы, соответствующих ускорению электронов, были сделаны при сопоставлении моментов прохождения мимо зонда слоев плазменного сгустка различной концентрации  $n(z, t)$  с моментами появления "горячих" электронов той или иной энергии. Измерения проводились при фиксированном значении  $E_0 = 0,7$  кВ/см, выбранном из условий слабого распада плазмы в СВЧ поле при одновременном наличии заметного эффекта нагрева электронов. В соответствии с первым соображением включение СВЧ импульса производилось только при подходе плазменного сгустка к трехэлектродному зонду. Оказалось, что энергии ускоренных электронов превосходили 50 эв только при  $n/n_c = 0,4 \pm 0,2$ , становясь более 100 эв при  $n/n_c = 0,5 \pm 0,2$  и достигая максимальной энергии 300 эв при  $n/n_c \sim 1$ . Дальнейшее увеличение  $n(z) < n_{макс}$  приводило к уменьшению энергии ускоренных электронов (время протекания тока уменьшалось с ростом  $V_z$ ), по-видимому, связанному с уменьшением  $E$  из-за "сканирования" поля (при  $n > n_{сг}$ ) и аномального поглощения волны.

Измерения распределения электронов по энергиям при различных углах  $\theta$  показали, что ускорение происходит преимущественно вдоль направления электрического поля волны, что находится в согласии с существующими теоретическими представлениями /12, 13/.

Заметное увеличение энергии ускоренных электронов получено и при машинном эксперименте /5/, в котором изучался аномальный нагрев плазмы высокочастотным полем.

Итак, обнаружена генерация ускоренных электронов при взаимодействии электромагнитной волны с потоком бесстолкновительной незамагниченной плазмы, имеющем плавное нарастание концентрации  $n(z)$ ,  $n_{\text{макс}} > n_c$ . В условиях, при которых наблюдалось аномальное поглощение /1/, максимальные энергии электронов на один-два порядка превышают энергию осцилляции электронов в СВЧ поле. Полученное значение  $(v_E/v_{Te})_{\text{порог}} \approx 0,25$  для аномального нагрева электронов находится в согласии с полученным ранее  $(v_E/v_{Te})_r$  для аномального СВЧ поглощения. Ускорение электронов зависит от концентрации плазмы и величины  $E$ , происходя одновременно в слоях с различными  $n(z)$ . Ускорение электронов анизотропно и идет преимущественно вдоль линий электрического поля падающей волны.

В заключение следует отметить, что полученные экспериментальные данные согласуются с представлениями о развитии параметрической неустойчивости плазмы в СВЧ поле /2-5/.

Авторы благодарят Ю. М. Алиева, Н. Е. Андреева, Г. М. Батанова, Л. М. Горбунова, С. Е. Гребенщикова, А. Ю. Кирия, М. С. Рабиновича, К. Ф. Сергейчева и В. П. Силина за полезные дискуссии.

Поступила в редакцию  
28 января 1971 г.

### Л и т е р а т у р а

1. И. Р. Геккер, О. В. Сизухин. Письма в ЖЭТФ, **9**, 408 (1969); Труды IX Международной конференции по явл. в ион. газах, Бухарест, 542 (1969); препринт ФИАН, № 61 (1969).

2. В. П. Силин. ЖЭТФ, 48, 1679 (1965); ЖЭТФ, 57, 183 (1969).
3. В. В. Пустовалов, В. П. Силин. ЖЭТФ, 59, 2215 (1970).
4. P. Kaw, E. Valeo, J. M. Dawson. Phys. Rev. Lett., 85, 430 (1970)
5. P. Kaw, Труды Межд. конф. по лазерной плазме, Москва (1970).
6. И. Р. Геккер, Э. Я. Гольц и др. Труды УП Межд. конф. по явл. в ион. газах, Белград, 2, 445 (1965); препринт ФИАН, А-155 (1965).
7. К. Ф. Сергейчев. ЖЭТФ, 52, 575 (1967); препринт ФИАН № 135 (1966).
8. К. Ф. Сергейчев. Труды IX Межд. конф. по явл. в ион. газах, Бухарест, 540 (1969); препринт ФИАН, № 61 (1969); ЖЭТФ 58, 1157 (1970).
9. И. Р. Геккер, К. Ф. Сергейчев, В. Е. Трофимов. Труды УШ Межд. конф. по явл. в ион. газах, Вена, 395 (1967).
10. К. Ф. Сергейчев, И. Р. Геккер. Труды УШ Межд. конф. по явл. в ион. газах, Вена, 394 (1967).
11. Г. М. Батанов, К. А. Сарксян, В. А. Силин. Препринт ФИАН № 7 (1968); Труды IX Межд. конф. по явл. в ион. газах, Бухарест, 541 (1969); препринт ФИАН № 61 (1969).
12. В. П. Силин. ЖЭТФ, 51, 1842 (1966).
13. Н. Е. Андреев, А. Ю. Кирий, В. П. Силин. Труды IX Межд. конференции по явл. в ион. газах, Бухарест, 544 (1969); препринт ФИАН № 59 (1969); ЖЭТФ, 57, 1028 (1969).
14. В. Е. Голант. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. "Наука", 1968 г.
15. И. Р. Геккер. Труды II Совещания по физике и технике плазмы, Росток, 1970 г.