

АНОМАЛЬНАЯ ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ СВЧ ВОЛН В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

К.Ф.Сергейчев, В.Е.Трофимов

В ряде экспериментальных работ [1 - 3], появившихся в последнее время, исследовались различные аспекты аномального взаимодействия СВЧ волн с бесстолкновительной плазмой: нагрев электронной компоненты [1], поглощение энергии СВЧ волн в плазме [2], распад ограниченной плазмы [3]. Общим свойством перечисленных явлений было то, что частота кулоновских столкновений электронов с ионами $\nu_{ei} \sim 10^{14} - 10^{16} \text{ сек}^{-1}$ была на 3 - 4 порядка ниже некоторой эффективной частоты столкновений $\nu_{эфф}$, необходимой для того, чтобы вызвать наблюдавшиеся диссипативные эффекты. Теоретические исследования неустойчивости плазмы в СВЧ поле [4 - 7] позволяют предполагать, что аномальное увеличение диссипации СВЧ энергии связано с возникновением параметрической неустойчивости плазмы. В [3], где проводились измерения порогового значения напряженности электрического поля волны при аномальном распаде в зависимости от концентрации плазмы, было получено качественное согласие с теорией [5]: пороговая напряженность снижалась на 2 - 3 порядка по мере приближения концентрации электронов плазмы n к критическому значению n_0 , определяемому равенством ленгмюровской частоты электронов и круговой частоты внешнего поля: $\omega_{Le} = \omega_0$.

В настоящей работе ставилась задача одновременно исследовать эффекты поглощения волн и нагрева электронов для однородного плазменного слоя.

Эксперимент проводился с однородным по концентрации потоком плазмы [3], пересекающим прямоугольный волновод перпендикулярно широкой стенке с направленной скоростью ионов в 10^7 см/сек . Для этого одна из широких стенок волновода на длине 15 см заменялась проводящей сеткой. Волновод возбуждался в 10-см диапазоне на волне типа H_{10} , у которой направление силовых линий электрического поля совпадало с направлением движения потока плазмы через волновод. Как известно, напряженность электрического поля меняется только вдоль широкой стенки волновода: $E(x) = E_0 \cos(\pi x/a)$ (a - размер широкой стенки). Отсечка распространения волны в волноводе, заполненном плазмой, началась при концентрации $n = 0,6 n_0$ (при отсутствии аномальной диссипации). Сразу же отметим, что концентрация ионов в потоке плазмы не менялась даже при условии высокого уровня аномальной диссипации СВЧ энергии в плазме. Отсутствие аномального распада в данных условиях объяснено ниже. Продолжительность импульса СВЧ мощности составляла $3 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$. При этом стационарная картина аномальной диссипации устанавливалась за время $\Delta t \sim 10^{-7} \text{ сек}$.

Зависимость измеренного коэффициента отражения $|R|^2$ волны с малой напряженностью $E_0 \sim 1 \text{ в/см}$ от плазмы с различной концентрацией соответствует расчетной для плазмы без столкновений (рис. 1, б - 0). Очевидно, что коэффициент поглощения $|D|^2$ при этом равен нулю. С ростом напряженности до $E_0 = 0,7 \text{ кв/см}$ и выше, зависимость $|R|^2$ от

n становилась более слабой, но вместе с тем в плазме возникало сильное поглощение $|D|^2 \rightarrow 1$.

Поглощение при больших значениях E_0 начиналось с более низких концентраций (ср. кривые 1 - 4 рис. 1, а). В случае, соответствующем

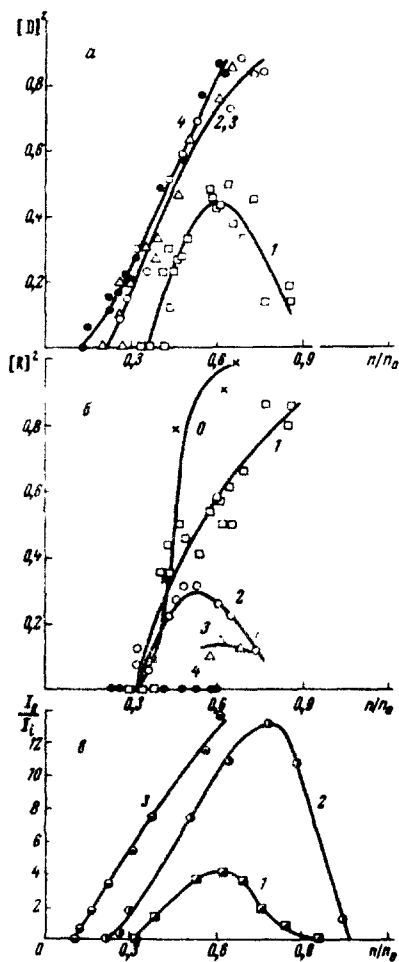


Рис. 1. Зависимость коэффициентов поглощения $|D|^2$, отражения $|R|^2$ и относительной плотности тока ускоренных электронов I_k/I_i от величины относительной концентрации плазмы n/n_0 . Порядковым номером кривых рис. 1, а и 1, б соответствуют следующие значения E_0 : 0 - 3 кВ/см; 1 - 0,7 кВ/см; 2 - 3,1 кВ/см; 3 - 4,2 кВ/см; 4 - 7 кВ/см.

Кривые на рис. 1, в снимались при следующих значениях потенциала коллектора зонда U_k и напряженности поля E_0 : 1 - $U_k = -0,7$ кВ; $E_0 = 2,2$ кВ/см; 2 - $U_k = -0,7$ кВ; $E_0 = 3,1$ кВ/см; 3 - $U_k = -2,0$ кВ; $E_0 = 7,0$ кВ/см

кривым 1 рис. 1, а, б, диссипация была еще относительно слабой и уменьшение объема взаимодействия плазмы с СВЧ полем, вызванное экранировкой поля при $n \geq 0,6 n_0$, приводило к уменьшению поглощения с ростом n . При больших значениях E_0 происходило уже практически полное поглощение СВЧ энергии. В случае $E_0 = 7$ кВ/см (рис. 1, а, б - 4) в пределах ошибок измерения отражение отсутствовало при любой концентрации. Немонотонное поведение коэффициента отражения $|R|^2$ с ростом концентрации (рис. 1 б - 2, 3) можно объяснить лишь резким возрастанием поглощения при $n \geq 0,5 n_0$.

Измерения показали, что одновременно с поглощением энергии СВЧ волны происходит "нагрев" электронов плазменного потока. Сравним найденные зависимости $|D|^2$ и $|R|^2$ от n/n_0 с зависимостью плотности тока ускоренных в плазме электронов, направленного вдоль силовых линий электрического поля волны, нормированной к плотности ионного то-

ка плазмы (в том же направлении): $I_e/I_i = f(n/n_0)$ (рис. 1, в). В отсутствие СВЧ поля электронный ток насыщения давал отношение $I_e/I_i \sim 5$. При измерении зависимости I_e/I_i от n/n_0 к коллектору зонда прикладывался отрицательный потенциал U_k для того, чтобы запереть вторичные электроны из стенок волновода с энергией $W_{вз} \leq 2e^2 E_0^2 / m\omega_0^2$.

По измерениям энергии электронов с помощью многосеточного зонда средние значения энергии ускоренных электронов $W_э$ при $E_0 = 7$ кВ/см и $n/n_0 = 0,6$, достигали 4 кэВ, а максимальные – 11 кэВ. Из кривых 1–3 рис. 1, в видно, что при больших E_0 ток возникает при меньших концентрациях и увеличивается быстрее с ростом концентрации.

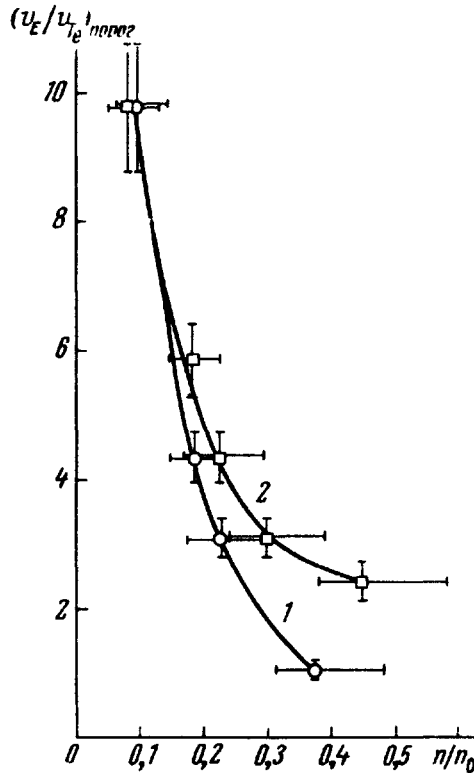


Рис. 2. Зависимость пороговых значений v_E/v_T от величины относительной концентрации n/n_0 : 1 – для начала поглощения СВЧ мощности, 2 – для начала тока ускоренных электронов

По данным рис. 1 была построена зависимость пороговой напряженности поля от концентрации плазмы в безразмерном виде (рис. 2): $(v_E/v_T)_{порог} = f(n/n_0)$, где $v_{E_{порог}} = eE_{порог} / m\omega_0$, $v_{T_e} = \sqrt{kT_e/m}$ – тепловая скорость электронов. Зависимость строилась как для начала поглощения (рис. 1, а), так и для начала тока ускоренных электронов (рис. 1, в). Имеющееся расхождение объясняется только некорректностью наблюдения порогов тока ускоренных электронов при наличии высоких отрицательных значений потенциала U_k . Таким образом, зависимость пороговых полей от плотности плазмы, определенная по началу поглоще-

ния и "нагрева" электронов качественно такая же, как и определенная по распаду плазмы [3], однако величины пороговых полей оказались на порядок выше в данной геометрии эксперимента.

Угловая расходимость пучка ускоренных электронов по отношению к направлению поля E не превышала $\pm 7^\circ$. Таким образом, вследствие анизотропного характера "нагрева" электронов, их давление приходилось на стенки волновода, а не на свободные границы плазмы. Уход ускоренных электронов не должен был заряжать плазму вследствие их замены вторичными электронами из стенок волновода. Это объясняет отсутствие распада плазмы.

Для $n = 0,6 n_0$ по данным рис. 1, б была найдена зависимость средней эффективной частоты столкновений $\overline{\nu_{эфф}}$, нормированной к ω_0 , от напряженности поля E_0 (рис. 3). При $E_0 \sim 3 \text{ кВ/см}$, $\overline{\nu_{эфф}}/\omega_0 \sim 1$. Оценка частоты столкновений электронов со стенками волновода с энергией $(W_{вэ})_{\text{макс}}$ дала на два порядка меньшее значение, чем $\overline{\nu_{эфф}}$.

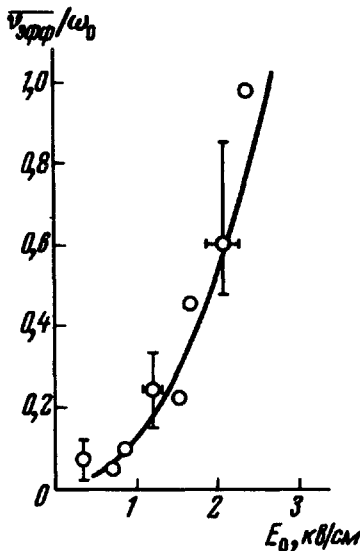


Рис. 3. Зависимость относительных значений, средней эффективной частоты столкновений $\overline{\nu_{эфф}}$ от величины напряженности поля E_0 , полученная для $n/n_0 = 0,6$

Выводы: 1) При аномальном поглощении СВЧ энергии в изотропной плазме наблюдается и аномальный "нагрев" электронов, причем "нагрев" носит анизотропный характер, он максимален в направлении E .

2) Пороги обоих явлений одинаковы и понижаются с приближением концентрации к n_0 , что находится в качественном согласии с теорией параметрической неустойчивости [5].

3) Аномальная диссипация характеризуется высокими значениями $\overline{\nu_{эфф}}$, которые не менее чем на один – два порядка выше частоты столкновений электронов со стенками и на три – четыре порядка выше ν_{ei} . С ростом E_0 $\overline{\nu_{эфф}}$ изменяется как E_0^2 и возможно даже быстрее.

Литература

- [1] Г.М.Батанов, К.А.Сарксян, В.А.Силин. Препринт ФИАН №7, 1968.
 - [2] И.Р.Геккер, О.В.Сизухин. Письма в ЖЭТФ, 9, 508, 1969.
 - [3] К.Ф.Сергейчев. Доклады 9-ой Междунар. конф. по явл. в ионизованных газах. Бухарест, 1969 г.; Препринт ФИАН №61, 1969 г.
 - [4] В.П.Силин. ЖЭТФ, 48, 1679, 1965.
 - [5] Н.Е.Андреев, А.Ю.Кирий, В.П.Силин. ЖЭТФ, 57, 1028, 1969.
 - [6] В.П.Силин. ЖЭТФ, 57, 183, 1969.
 - [7] В.В.Пустовалов, В.П.Силин. ЖЭТФ, 59, 2215, 1970.
-