

ЛОКАЛЬНЫЕ ВСПЫШКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАЗМЕ С СИЛЬНОЙ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ

Д.М.Карфидов, А.М.Рубенчик, К.Ф.Сергейчев, И.А.Сычев

Установлено соответствие динамики локальных вспышек электромагнитного излучения в плазме, находящейся в состоянии сильной ленгмюровской турбулентности, с представлениями о коллапсе плазменных волн.

Как известно, сильная ленгмюровская турбулентность характерна такими явлениями, как коллапс плазменных волн ¹, генерация коротковолновых ионно-звуковых колебаний плазмы ², ускорение электронов ³ и, наконец, вспышки электромагнитного излучения из коллапсирующих каверн плотности ^{4, 5}. В этой работе продемонстрировано, что электромагнитное излучение может служить удовлетворительным источником информации о динамике локальных процессов сильной ленгмюровской турбулентности, протекающих в реальной плазме, а не в специально организованной плазме модельных экспериментов, как например, в ⁶.

Сильная ленгмюровская турбулентность реализовывалась при инжекции электронного пучка в плазму. Плазма же создавалась плазменно-пучковым разрядом в продольном статическом магнитном поле $H_0 \approx 100$ Гс в среде аргона или ксенона при давлении $P_{Ar, Xe} \approx 5 \cdot 10^{-4}$ торр. Инжекция пучка проводилась на стадии распада плазмы после окончания разрядного импульса, когда параметры плазмы на оси столба, имеющего осевую симметрию, принимали следующие значения: плотность частиц $n_0 \lesssim 10^{12}$ см⁻³, температура электронов $T_e \approx 2,5$ эВ, неизотермичность ионов и электронов $T_i/T_e \lesssim 0,1$, потенциал пространства $\varphi_0 = 0 \div 5$ В, флуктуации плотности $\delta n/n_0 < 5 \cdot 10^{-3}$. Энергия и ток пучка варьировались в пределах $U_b = 0 \div 300$ В, $I_b = 0 \div 15$ А, длительность импульса инжекции $\tau_b = 5$ мкс. Пучок распространялся в практически однородной плазме, так как характерный размер сечения столба плазмы ~ 10 см был существенно больше диаметра пучка ~ 3 см.

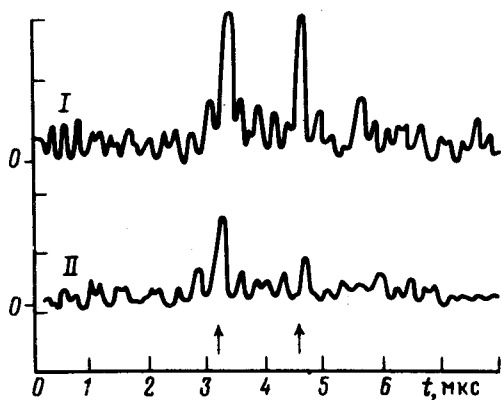


Рис. 1. Осциллограммы вспышек электромагнитного излучения в плазме на частоте $f_{pe} = 4,8$ ГГц с двух идентичных петлевых антенн, расположенных на расстоянии $\sim 0,1$ см

Инжекция пучка сопровождалась вспышками нетеплового электромагнитного излучения с частотой, близкой к плазменной $f_{pl} = (2\pi)^{-1} \left(\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m} \right)^{1/2}$, где e и m — заряд и масса электрона, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума. Вспышки регистрировались с помощью тонких изолированных петлевых или дипольных антенн, погруженных в плазму (диаметр проволоки 0,01 см, диаметр петли 0,5 см). Характерные размеры источников излучения определялись методом корреляции сигналов с двух одинаковых антенн, перемещаемых одна относительно другой. Пример такой корреляции сигналов для расстояния между антеннами $L \sim 0,1$ см при $U_b = 300$ В и $I_b = 6$ А представлен на рис. 1. Стрелками помечены совпадения сигналов вспышек излучения. При $L > 0,2$ см совпадения сигналов не наблюдались совсем

или с малой вероятностью могли быть случайными. Абсолютного соответствия всех всплесков, принимаемых обеими антеннами, как видно на рис. 1, нет и не должно быть в виду того, что размеры источников излучения $L_{\text{и}} < 0,1$ см, а связь между полем излучающего диполя малых размеров $L_{\text{и}} \ll c/f_{\text{pe}}$ и антенной убывает пропорционально r^{-3} , где r — расстояние до центра диполя. Это означает, что только близкое и при том симметричное расположение антенн относительно излучающего диполя приводит к появлению идентичных сигналов. Наиболее вероятным является случай отсутствия симметрии связи между антеннами и излучающими диполями. Гарантией того, что антенны принимают поперечное электромагнитное излучение, а не продольные плазменные поля (непосредственно через емкостную связь), служит наблюдение совершенно аналогичных сигналов, регистрируемых бесконтактно с помощью рупорно-линзовой приемной антенны, сфокусированной на центр столба. В последнем случае, правда общее количество регистрируемых всплесков значительно больше из-за того, что короткофокусная антенна эффективно "собирает" излучение всплесков в пределах всего фокального объема с характерным диаметром ~ 5 см.

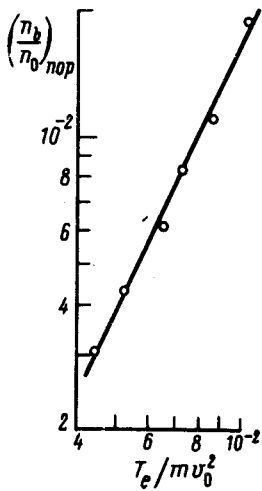


Рис.2

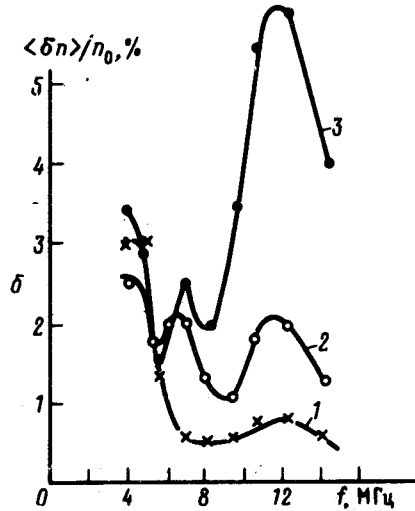


Рис.3

Рис. 2. Пороговая зависимость отношения плотностей электронного пучка и плазмы n_b/n_0 от параметра T_e/mv_0^2 для возникновения всплесков электромагнитного излучения

Рис. 3. Спектры ионно-звуковых колебаний: а — осциллограмма ионного тока лентгмюровского зонда, прошедшего резонансный фильтр, настроенный на частоту 12 МГц; б — спектры колебаний, измеренные при фиксированном значении энергии пучка $U_b = 300$ В и при трех значениях параметра n_b/n_0 : 1 — $n_b/n_0 = (n_b/n_0)_{\text{пор}} = 3,2 \cdot 10^{-3}$, 2 — $n_b/n_0 = 2(n_b/n_0)_{\text{пор}}$, 3 — $n_b/n_0 = 12(n_b/n_0)_{\text{пор}}$. Ионная лентгмюровская частота $f_{pi} = 16$ МГц

Было проведено сравнение длительности отдельных всплесков излучения для плазмы различных газов, например, аргона и ксенона. Измеренная по половине амплитуды длительность всплески излучения в аргоновой плазме составила $\tau_{\text{и}} \approx 0,08$ мкс, а в ксеноновой — 0,17 мкс, что удовлетворительно согласуется с обратной пропорциональностью длительности процесса квадратичному корню из массы иона. Отсюда можно сделать вывод, что длительность всплески радиоизлучения определяется скоростью движения ионов.

Было также установлено, что появление вспышек излучения носит пороговый характер по отношению к величине тока пучка при фиксированной энергии U_b . По измерениям порогового тока $I_{b \text{ пор}} = F(T_e, U_b)$ была построена зависимость пороговых значений отношения плотности пучка и плазмы n_b/n_0 от величины T_e/mv_b^2 , где $v_b = (2U_b/m)^{1/2}$ (см. рис. 2). Согласно ⁷ эта зависимость должна характеризовать переход плазмы с пучком в режим сильной ленгмюровской турбулентности, однако полученная зависимость, имеющая пропорциональность $(n_b/n_0)_{\text{пор}} \sim (T_e/mv_b^2)^2$ отличается от теоретически предсказанной в ⁷ пропорциональности $(T_e/mv_b^2)^3$. Кроме того, при малых T_e/mv_b^2 экспериментальный порог существенно превышает теоретический, что, видимо, требует уточнения теории. Также заслуживает внимания факт, что вспышки радиоизлучения иногда наблюдаются и после выключения тока пучка с задержкой до 0,5 мкс. Он находит объяснение в том, что на стадии коллапса ленгмюровское поле кавитона перестает зависеть от поля накачки и продолжает эволюционировать даже если накачка выключается. Остаточный уровень тока на заднем фронте импульса оказывается при этом ниже порогового уровня. Найденная задержка Δt по порядку величины соответствует продолжительности коллапса ленгмюровского поля в каверне $\tau_{\text{к}} \sim L_{\text{к}}/v_s \approx 2 \cdot 10^{-7}$ с, где $L_{\text{к}} \sim k_{\text{макс}}^{-1}$ — начальный размер кавитона, соответствующий волновому числу $k_{\text{макс}}$ для максимального инкремента на пороге модуляционной неустойчивости ⁸, $v_s = (\kappa T_e/M)^{1/2}$ — скорость ионного звука. Одним из основных следствий сильной ленгмюровской турбулентности является генерация коротковолнового ионного звука ² с частотами f_s , близкими к ленгмюровской ионной $f_{pi} = (2\pi)^{-1} (n_0 e^2 / \epsilon_0 M)^{1/2}$. Исследование спектра ионно-звуковых колебаний проводилось по колебаниям ионного тока в цепи ленгмюровского зонда, смещенного отрицательно относительно плазмы на -50 В. К усилителю ток зонда проходил через перестраиваемый резонансный частотный фильтр. Сигнал тока ленгмюровского зонда на выделенной частоте (рис. 3а) имеет модулированный по амплитуде вид. Характер модуляции имеет значительное внешнее сходство с характером вспышек электромагнитного излучения, однако установление их временной корреляции затруднено из-за запаздывания отклика высокочастотного фильтра. Тот факт, что амплитуда модулированного ионно-звукового сигнала резко уменьшается и исчезает сама модуляция вместе со вспышками радиоизлучения при уменьшении величины n_b/n_0 ниже измеренного порога, служит убедительным аргументом в пользу связи генерации звука с явлениями сильной турбулентности.

На рис. 3б представлены измеренные частотные спектры ионно-звуковых колебаний для трех значений n_b/n_0 при фиксированном $U_b = 300$ В. При небольшом превышении n_b/n_0 над порогом образуется пик на частоте $f_s = 11,5$ МГц, который при увеличении n_b растет. Отсюда нетрудно получить оценку масштабов каверн $L_{\text{к}}$, предположив их соответствие длине возбуждаемой звуковой волны $L_{\text{к}} \sim \lambda_s = v_s/f_s = 2,5 \cdot 10^{-2}$ см $\sim 10r_{De}$, что согласуется с теоретическими оценками конечного размера кавитона ⁹.

Итак, нетепловое радиоизлучение плазмы при инжекции в нее пучка электронов с концентрациями, превышающими некоторый уровень, идентифицируемый как порог сильной ленгмюровской турбулентности, носит характер спорадических вспышек на ленгмюровской частоте, источниками которого являются малые (не более 100 дебаевских длин) случайные образования, произвольно рассеянные по объему плазмы. Динамика отдельных вспышек радиоизлучения находится в соответствии с характерными временами коллапса каверн, обратно пропорциональными скорости ионного звука. Вспышки радиоизлучения возникают одновременно с генерацией коротковолнового ионного звука и имеют с ним одинаковый порог возбуждения по величине плотности инжектируемого пучка. Измеренный порог сильной ленгмюровской турбулентности имеет пропорциональность: $(T_e/mv_b^2)^2$.

Литература

2. Галеев А.А., Сагдеев Р.З., Шапиро В.Д., Шевченко В.И. ЖЭТФ, 1977, 73, 1353.
3. Захаров В.Е. Основы физики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. Яньков В.В. Физика плазмы, 1982, 8, 86.
5. Миронов В.А., Сергеев А.М., Химич А.В. ЖЭТФ, 1988, 94, 76.
6. Wong A. Y., Cheung P. Y. Phys. Rev. Lett., 1984, 52, 1744; Cheung P. Y., Wong A. Y. Phys. Fluids, 1985, 28, 1538.
7. Галеев А.А., Сагдеев Р.З., Шапиро В.Д., Шевченко В.И. Взаимодействие сильных электромагнитных волн с бесстолкновительной плазмой. Горький, 1980, 6.
8. Шапиро В.Д., Шевченко В.И. Основы физики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1984, 2, 119.
9. Захаров В.Е., Пушкарев А.Н., Рубенчик А.М. и др. Письма в ЖЭТФ, 1988, 47, 239.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
5 августа 1988 г.