

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОДУЛИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМОЙ

А.В.Костров¹⁾, К.Крафт¹⁾²⁾*, Ж.Матьесан²⁾*, М.В.Стародубцев,
А.С.Волокитин[□]

Институт прикладной физики РАН
603600 Нижний Новгород, Россия

* *Laboratory of Physic of Gases and Plasmas, University of Paris-South-National Centre of
Scientific Research
91405 Orsay, France*

□ ИЗМИРАН
142092 Москва, Россия

Поступила в редакцию 6 февраля 1998 г.

Представлены экспериментальные результаты по взаимодействию модулированного электронного пучка с магнитоактивной плазмой в свистовом диапазоне частот. Экспериментально показано, что возможны два механизма генерации волн при инжекции пучка в плазму: черенковское излучение свистовых волн модулированным пучком и переходное излучение от точки инжекции пучка. В случае малых токов пучка ($N_b/N_0 \ll 10^{-4}$) излучение на черенковском резонансе более чем на порядок превосходит переходное излучение; при больших токах пучка эффективность черенковского излучения падает. Для случая малых токов пучка исследована трансформация его функции распределения. Показано, что при черенковском взаимодействии со свистовыми волнами пучок тормозится, его функция распределения уширяется и на ней формируется область плато.

PACS: 52.35.Hg, 52.40.-w, 94.30.Tz

В последнее время в приложении к активным экспериментам в космосе обсуждается возможность использования модулированных электронных пучков в качестве излучателя волн свистового диапазона частот [1]. Основное внимание в теоретических работах [2–3] по этой проблеме уделялось анализу черенковского излучения электромагнитных волн в безграничной плазме и первые лабораторные эксперименты [4] продемонстрировали возможность такого излучения свистовых волн. В настоящей работе экспериментально показано, что помимо черенковского излучения во всем объеме существует нерезонансное излучение от точки инжекции модулированного пучка в плазму (переходное излучение).

Эксперименты выполнялись на установке, схема которой представлена на рис.1. Источник плазмы представлял собой подогреваемый оксидный катод и сетку, между которыми с частотой повторения 5 Гц подавался импульс ускоряющего напряжения. Возникший в результате поток ускоренных электронов ионизовал нейтральный газ (аргон с давлением $5 \cdot 10^{-4}$ Торр). В результате в вакуумной камере создавался квазиоднородный столб плазмы длиной 70 см и диаметром 50 см. Начальная концентрация плазмы N_e составляла величину порядка 10^{12} см^{-3} и уменьшалась далее с

¹⁾ e-mail: kstr@appl.sci-nnov.ru., catherine.krafft@lpgp.u-psud.fr

²⁾ C.Krafft, G.Matthieussent.

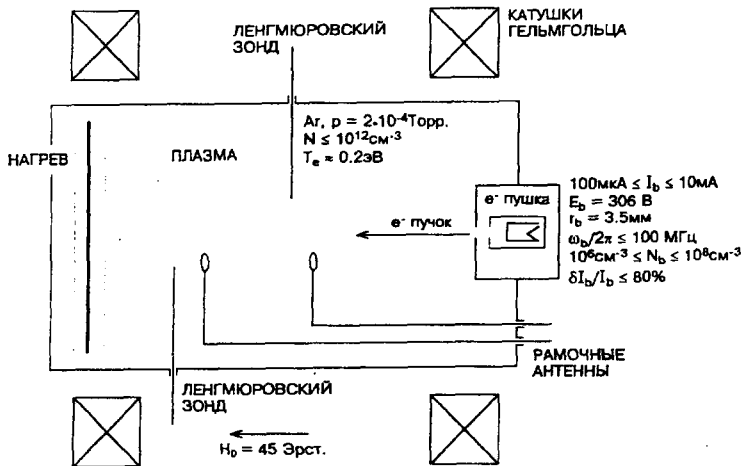


Рис.1. Схема экспериментальной установки

характерным временем 1 мс (см. ниже рис.3а). Эксперименты выполнялись в режиме распадающейся плазмы. На стадии распада плазмы устанавливалась температура электронов $T_e \approx 0.2$ эВ. Однородное магнитное поле создавалось двумя катушками Гельмгольца (диаметр катушек 2 мм, расстояние между ними – 1.5 м). Величина магнитного поля составляла $H_0 \approx 45$ Э.

Электронная пушка, используемая для создания пучка с модулированной плотностью, представляла собой триод с сетчатым анодом. Ускоряющее напряжение было равно 300 В, ток пучка мог варьироваться от 10 мкА до 10 мА, что соответствует концентрации N_b в пределах от 10^6 см $^{-3}$ до 10^8 см $^{-3}$. Диаметр пучка составлял 7 мм. Модуляция плотности электронного пучка создавалась с помощью высокочастотного напряжения, прикладываемого к сетке электронной пушки. Частота модуляции составляла $f \sim 100$ МГц, что соответствовало свистовому диапазону частот; глубина модуляции была порядка 80%. Модулированный пучок инжектировался непрерывно в течение всего распада плазмы. В экспериментах использовалась только продольная инжекция пучка в плазму, то есть питч-угол всегда был равен нулю.

Исследование функции распределения электронного пучка по энергии проводилось с помощью многосеточного анализатора. Для изучения структуры возбуждаемых полей в плазменном объеме использовались две электростатически экранированные рамочные антенны, каждая из которых могла передвигаться в двух направлениях: вдоль оси установки и в радиальном направлении.

Из анализа условий черенковского излучения $\omega = k_{\parallel} V_b$ следует, что возбуждение собственных волн системы с продольной длиной волны $\lambda_{\parallel} = 2\pi/k_{\parallel}$ возможно при плотности плазмы, меньшей некоторой критической (при $\omega_{pe} \gg \omega_{He} > \omega_0 > \sqrt{(\omega_{He}\omega_{Ni})}$), определяемой из условия $\omega_{pe}^2 < \omega_{pekr}^2 = k_{\parallel}^2 c^2 (\omega_{He} - \omega)/\omega$, где ω_{pe} – плазменная частота электронов, ω_{He} ω_{Ni} – гирочастоты электронов и ионов, соответственно, λ_{\parallel} и k_{\parallel} – длина и продольное волновое число распространяющейся волны, c – скорость света в вакууме. Вне резонансной области плазмы эта волны оказывается поверхностной и локализована вблизи пучка на расстоянии порядка c/ω_{pe} .

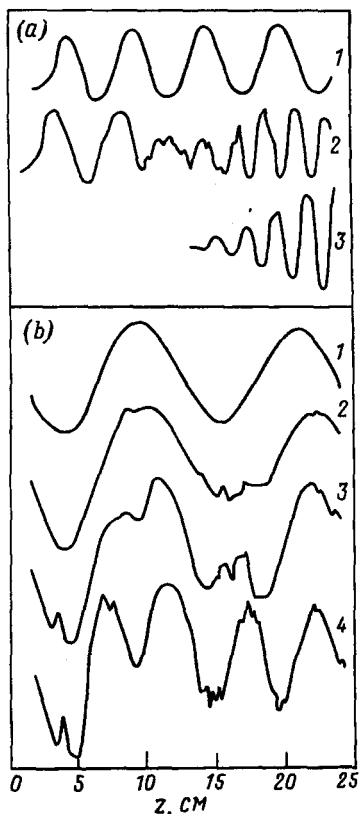


Рис.2. Интерферометрические измерения волн в плазме (условия черенковского резонанса не выполнены): а) 1 – поверхностная волна модулированного электронного пучка, 2 – излучение точки абсорбции пучка (видна также поверхностная волна пучка), 3 – волна, излучаемая рамочной антенной в тех же условиях; б) 4 – волна, излучаемая рамочной антенной, 2, 3 и 4 – излучение точки инжекции пучка при различных значениях тока пучка. При увеличении тока видна поверхностная волна пучка

Проведенные интерферометрические исследования свидетельствуют, что при плотности плазмы выше критической вблизи пучка существует бегущая поверхностная мода (рис.2а, кривая 1), и также регистрируется квазипродольная свистовая волна, которая возбуждается как вблизи точки инжекции модулированного пучка в плазму, так и в окрестности его точки абсорбции (рис.2а, кривая 2, рис.2б, кривая 4). Наблюдаемое нерезонансное излучение вблизи точек инжекции пучка и его абсорбции следует отнести к излучению переходного типа, а эффективный излучатель, ответственный за его излучение, представить в первом приближении как электрический диполь с моментом, направленным вдоль оси установки.

Уверенно резонансное черенковское излучение модулированного электронного пучка (рис.3б) удалось зарегистрировать при малых токах пучка $J_0 < 100$ мкА ($N_b/N_0 < 10^{-4}$). В этом случае амплитуда черенковского излучения более чем на порядок превышала амплитуду переходного излучения свистовых волн. С увеличением тока пучка эффективность черенковского излучения уменьшалась по сравнению с эффективностью излучения свистовых волн от точки инжекции и абсорбции.

При плотности плазмы $N_0 \approx 10^{11}$ см $^{-3}$ продольная длина свистовой волны совпадает с пространственной длиной модуляции пучка $2\pi V_b/\omega_0$. Рамочная антенна при этих условиях возбуждает электромагнитную волну такой же продольной длины $\lambda_{||} \cong 2\pi V_B/\omega_0$.

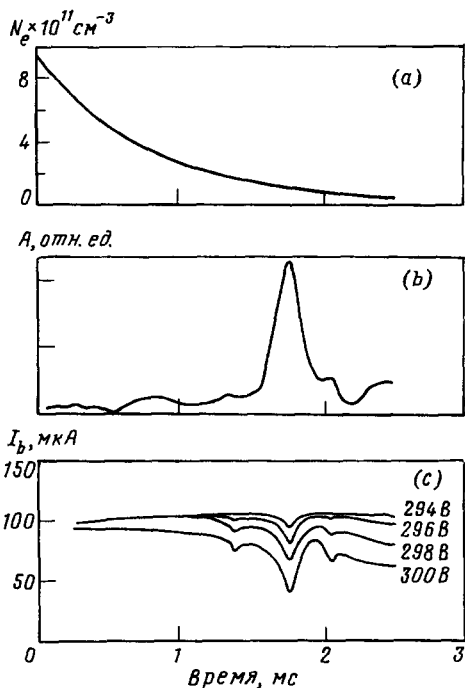


Рис.3. а – зависимость концентрации плазмы от времени; б – амплитуда H_r – компоненты ВЧ поля в плазме (максимум соответствует выполнению условия черенковского резонанса). Ток пучка 100 мкА ($N_b/N_0 \approx 10^{-5}$); с – сигнал с анализатора частиц пучка при различных значениях отсекающего напряжения на анализирующей сетке

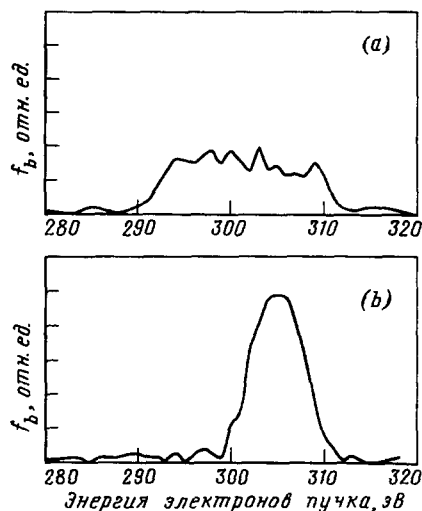


Рис.4. Функция распределения пучка (при токе $I_b = 100$ мкА ($N_b/N_0 \approx 10^{-5}$)): а – в условиях черенковского резонанса (средняя энергия частиц пучка приблизительно равна 300 В, ширина – 17 В, имеется область плато); б – вне черенковского резонанса (средняя энергия частиц пучка составляет 306 В, ширина – 7 В)

Анализ функции распределения электронного пучка по энергиям свидетельствует, что при выполнении условий черенковского резонанса наблюдалось эффективное торможение пучка. Характерные осциллограммы тока пучка на многосеточный анализатор при различных отсекающих напряжениях представлены на (рис.3с). Видно, что уменьшение потока электронов, проникающих на коллектор анализатора, означает торможение электронного пучка при взаимодействии его с плазмой. Функция распределения пучка в резонансной и нерезонансной ситуациях показана на рис.4а и б, соответственно. Характерная ширина функции распределения пучка в отсутствие резонанса – порядка 6 эВ. При выполнении резонансных условий пучок в среднем тормозится, его ширина возрастает до 12 эВ и на функции распределения образуется плато.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов установлено, что существует два различных механизма генерации свистовых волн при инжекции модулированного электронного пучка в плазму: это резонансное черенковское излучение $\omega_0 = k_{\parallel} V_b$ и нерезонансное переходное излучение, существующее в широком диапазоне изменения плотности плазмы. С увеличением тока пучка ($N_b/N_0 > 10^{-4}$) эффективность черенковского излучения падает вследствие уширения функции рас-

пределения пучка при переходном излучении электромагнитных волн в точке инжекции пучка.

-
1. V.N.Oraevski and Y.Y.Rouzin, *Project APEX. Scientific Aims Modelling and Technics*, Science, Moscow, 1992.
 2. K.J.Harker and P.M.Banks, *Planet. Space Sci.* **33**, 953 (1985).
 3. K.J.Harker and P.M.Banks, *Planet. Space Sci.* **35**, 11 (1987).
 4. C.Kraft, P.Thevenet, G.Matthieussent et al., *Phys. Rev. Lett.* **2**, 649 (1994).