

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ В ПЛАЗМЕ ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ

Ю.Г.Залеский, В.И.Зинченко, Н.И.Назаров
В.В.Демченко

В системе вращающийся электронный пучок—плазма выявлен эффект возникновения текущего поперек магнитного поля диамагнитного тока, вызванного ВЧ давлением пакета возбуждаемых в плазме циклотронных волн, сопровождающийся интенсивным электромагнитным излучением из плазмы и генерацией электронов с большой поперечной энергией.

В настоящее время интенсивно ведутся эксперименты по ВЧ нагреву плазмы в замкнутых магнитных ловушках мощными электромагнитными волнами с частотами, близкими к гармоникам электронной циклотронной частоты ¹. По этой причине необходимо детальное изучение физических процессов, имеющих место при взаимодействии сильных циклотронных волн с плазмой.

В настоящей статье изложены результаты экспериментального исследования нелинейных эффектов при возбуждении циклотронных волн большой амплитуды в системе вращающийся электронный пучок – плазма. Эксперименты проводились на прямой системе ($L = 150$ см, $\Phi = 15$ см) с пробочной конфигурацией магнитного поля (пробочное отношение 1,25). Длина однородного участка магнитного поля 50 см при напряженности ведущего магнитного поля 6 кЭ. Плазма создается импульсным электронным пучком с параметрами: ток 2,5 А, энергия 20 кэВ, длительность 300 мкс, диаметр 1 см, отношение поперечной скорости электронов к продольной 1/2.

В эксперименте измерялись: интенсивность и энергия рентгеновского излучения с мишени, помещенной в пространство взаимодействия пучок – плазма; электромагнитное излучение в диапазоне 10 – 30 ГГц; радиальные распределения высокоэнергетичных электронов и амплитуды СВЧ колебаний; ток электронного пучка, прошедшего пространство взаимодействия с плазмой; ослабление магнитного поля в процессе взаимодействия плазмы с циклотронными волнами.

При исходном давлении рабочего газа (атмосферный воздух) $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. образуется плазма с плотностью $\sim 10^{10} \div 10^{11}$ см⁻³. При значении магнитного поля, соответствующем одной из зон интенсивного электромагнитного излучения на частоте $f = 30$ ГГц ($f \approx 2f_{ce}$), возникает мощное рентгеновское излучение, свидетельствующее о генерации в плазме высокоэнергетичных электронов с энергией 500 кэВ. В режиме с максимальной интенсивностью рентгеновского излучения наблюдается полная амплитудная модуляция

электромагнитного излучения на второй гармонике циклотронной частоты. Из рис. 1 следует, что провалы в излучении на второй гармонике коррелируют со всплесками излучения на основной циклотронной частоте. Всплески рентгеновского излучения возникают синхронно с пиками электромагнитного излучения на циклотронной частоте (рис. 2). Одновременно с рентгеновским и циклотронным излучением наблюдается уменьшение тока (торможение) электронного пучка, принятого на коллектор, сопровождающееся уменьшением магнитного поля (рис. 3). Отмечено резонансное увеличение диамагнитного сигнала при совпадении частоты волны с гармоникой циклотронной частоты (ширина резонанса по магнитному полю $\Delta B_0 = \pm 10 \text{ Э}$).

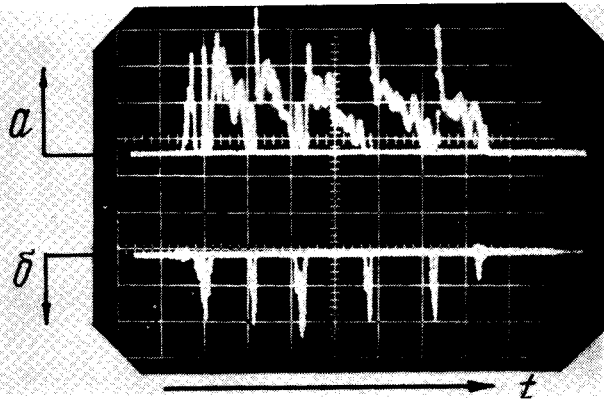


Рис.1. Осциллограммы электромагнитного излучения на второй гармонике (а) и основной электронной циклотронной частоте (б)

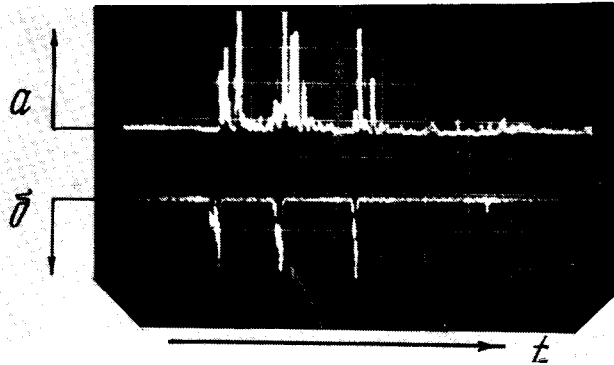


Рис.2. Осциллограмма излучения на электронной циклотронной частоте (а) и интенсивность рентгеновского излучения с энергией 500 кэВ (б)

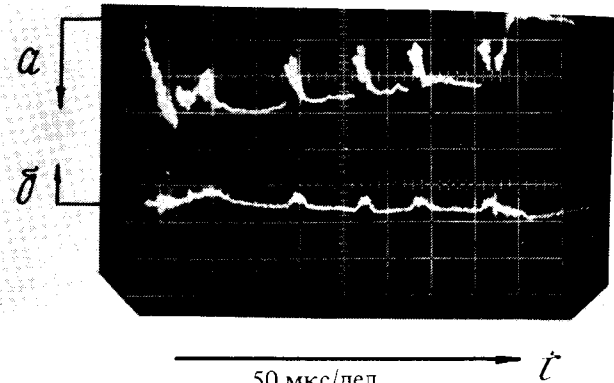


Рис.3. Осциллограмма тока электронного пучка, прошедшего область взаимодействия (а) и диамагнитный сигнал (б)

50 мкс/дел

Оценка амплитуды электрического поля, в котором электроны могут набирать измеренные в эксперименте энергии, дает значение $\sim 10 \text{ кВ/см}$, что на два порядка величины превышает реально существующие поля в лазерах на циклотронном резонансе с близкими к нашим параметрами электронного пучка. Измерение энергии ускоренных электронов по по-

лощению рентгеновского излучения дает величину, согласующуюся с полученной из оценок величины ларморовского радиуса высокоэнергетичных электронов, которые следуют из экспериментальных измерений радиального распределения интенсивности жесткого рентгеновского излучения. С помощью СВЧ зонда было установлено, что колебания на электронной частоте локализованы вблизи границы пучка.

Согласно существующим теоретическим представлениям^{2,3}, основным нелинейным эффектом, определяющим пространственно-временную эволюцию распространяющегося в плазме пакета циклотронных волн большой амплитуды, является уменьшение магнитного поля под действием ВЧ давления в области локализации волнового пакета. Это явление, названное в² ВЧ диамагнетизмом, обусловлено возникновением в плазме вызванного ВЧ давлением диамагнитного тока, направленного поперек магнитного поля. Образование магнитной ямы сопровождается накоплением в ней энергии циклотронных волн, что приводит к формированию в плазме циклотронных солитонов с В₁ наполнением.

В работе⁴ изложены результаты одномерного численного эксперимента, самосогласованным образом учитывающего нелинейные и кинетические эффекты, имеющие место при взаимодействии с однородной плазмой потенциальных циклотронных волн с частотами, близкими к удвоенной электронной циклотронной частоте. Результаты работы⁴ подтверждают теоретические предсказания работ^{2,3} о возникновении в плазме циклотронных солитонов (магнитных ям с ВЧ наполнением). Однако кинетические эффекты, обусловленные резонансным взаимодействием электронов и ионов плазмы с ансамблем циклотронных солитонов, в работе⁴ не исследовались.

Для объяснения механизма возникновения в описываемых экспериментах электронов с большой поперечной энергией воспользуемся качественными соображениями^{2,3}, в основу которых положены результаты аналитического и численного анализа коллапса ленгмюровских волн⁵. Основанием для подобных аналогий явилось формальное сходство физических процессов, сопровождающих формирование ленгмюровских и циклотронных солитонов, обусловленное универсальным нелинейным механизмом выдавливания "ямок" плотности (ленгмюровский солитон) или магнитного поля (циклотронный солитон), связанным с воздействием на плазму пондеромоторной силы циклотронных волн.

Амплитуда электрического поля циклотронных волн, локализованных в магнитной яме, возрастает до значительных величин. Взаимодействующие с ансамблем циклотронных солитонов электроны плазмы приобретают большую поперечную энергию вследствие резонанса между частотой циклотронного вращения электронов и частотой электрического поля в солитоне⁶ (в случае изотропной плазмы ускорение электронов обусловлено затуханием Ландау⁵). Часть энергии циклотронных волн "высвечивается" из плазмы в виде электромагнитного излучения вследствие линейной и нелинейной трансформации потенциальных циклотронных волн в электромагнитные волны.

В заключение отметим, что для количественного сопоставления экспериментальных и теоретических результатов необходимо учесть ряд факторов, не учтенных в численном эксперименте⁴ (в частности, неоднородность плотности плазмы и статического магнитного поля⁷) и провести детальное теоретическое исследование коллапса циклотронных волн в плазме.

Авторы благодарны В.И.Петвиашвили и К.Н.Степанову за обсуждение результатов.

Литература

1. Аликаев В.В. ВЧ и СВЧ методы нагрева плазмы. В кн.: Итоги науки и техники, сер. Физика плазмы, М.: ВИНТИ, 1981, 1, 80.
2. Петвиашвили В.И. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, 682.
3. Некрасов А.К., Петвиашвили В.И. ЖЭТФ, 1979, 77, 605.
4. Бородачев Л.В., Некрасов А.К., Сигов Ю.С. Препринт ИПМ АН СССР, №23, 1981.
5. Sigov Yu.S., Zakharov V.E. J. Phys., 1979, 40, 7, 63.

6. Тимофеев А.В. УФН, 1973, 110, 329.

7. Бражник В.А., Гришаев В.И., Демченко В.В., Омельченко А.Я., Павлов С.С., Панченко В.И. Физика плазмы, 1981, 7, 163.

Харьковский физико-технический институт
Академии наук : Украинской ССР

Поступила в редакцию
28 января 1982 г.
