

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕНГМЮРОВСКИХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

С.В. Антипов, М.В. Незлин, Е.Н. Снежкин,
А.С. Трубников

Экспериментально показано, что ленгмюровские волны в замагниченной бесстолкновительной плазме, раскачиваемые электронным пучком, испытывают модуляционную неустойчивость, приводящую к образованию солитонов. Солитоны большой амплитуды имеют ширину не более $25 \div 30$ электронных дебаевских радиусов и самосогласованную ямку плотности $\delta n/n \approx (5 \div 10) \cdot 10^{-2}$.

Как уже сообщалось [1], нами ведутся опыты по исследованию возникновения и поведения ленгмюровских солитонов в плазме. В отличие от нашей первой работы [1] (а также [2, 3]) в данной работе мы для раскачки в плазме ленгмюровских волн (из которых образуются солитоны) используем не внешнее ВЧ электрическое поле, а электронный пучок; такой способ создания солитонов представляется значительно более естественным и эффективным.

В экспериментальной установке имеются два пучка: первый, как и прежде [1], для создания плазмы и второй — для возбуждения в ней ленгмюровских волн. Оба пучка создаются одной и той же пушкой, на которую подаются два независимых импульса ускоряющего напряжения отдельно регулируемой величины. Плазма, созданная первым пучком, движется вдоль магнитного поля по оси установки (очищаясь при этом от нейтрального газа в "линии задержки" [1]) и приходит в рабочий объем спустя ~ 50 мксек после выключения первого пучка. Второй пучок включается на все время существования плазмы в рабочем объеме. Плотность плазмы $n \approx 3 \cdot 10^9$ см⁻³ (ленгмюровская частота $f_p \approx \approx 500$ МГц), температура электронов $T_e \approx 10$ эВ, диаметр плазменного столба — $3 \div 4$ см, напряженность продольного магнитного поля $H \approx \approx 2000$ э, рабочий газ — водород, давление газа в рабочем объеме $p \approx 3 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.

Указанные экспериментальные условия принципиально отличаются от условий работ других авторов [2 — 5]: в наших опытах плазма является, во-первых, бесстолкновительной (за счет на два порядка меньшего давления нейтрального газа), и, во-вторых, замагниченной (лармовская электронная частота $\frac{eH}{2\pi mc} \gg f_p$).

Основной экспериментальный факт, являющийся предметом данной статьи, состоит в следующем. Когда сила тока второго пучка превышает некоторый порог (~ 3 ма при энергии электронов пучка ~ 100 эВ), ленгмюровские колебания, возбуждаемые в плазме пучком, приобретают характер сравнительно редких, но очень мощных импульсов (сгустков) электрического поля на частоте 500 МГц. Одновременно возника-

ет четко выраженная пространственная модуляция плотности плазмы: в местах локализации волновых сгустков появляются "ямки" плотности, в которых концентрация электронов оказывается заметно пониженной — до $5 \div 10\%$ от плотности окружающей плазмы.

Обнаруживается это следующим образом. Поскольку вся плазма движется относительно диагностической аппаратуры (со скоростью $1 \div 2 \times 10^6$ см/сек), мы наблюдаем пространственно-временную развертку колебаний и плотности плазмы. Это показано на рис. 1, где верхняя осциллограмма — огибающая электрического поля ленгмюровских колебаний на частоте $f = 500$ МГц $\approx f_p$ (измеряемого в относительных единицах ВЧ сетчатым зондом), нижняя осциллограмма — временной ход плотности плазмы (измеряемый диагностическим резонатором) [1]. Видно, что сгустки поля ленгмюровских волн локализованы в ямках плотности плазмы, глубина которых δn достигает довольно большой величины:

$\delta n/n \approx 0,05 \div 0,1$. Ширина волновых сгустков (на уровне половины амплитуды) тем меньше, чем больше их интенсивность (или глубина ямки).

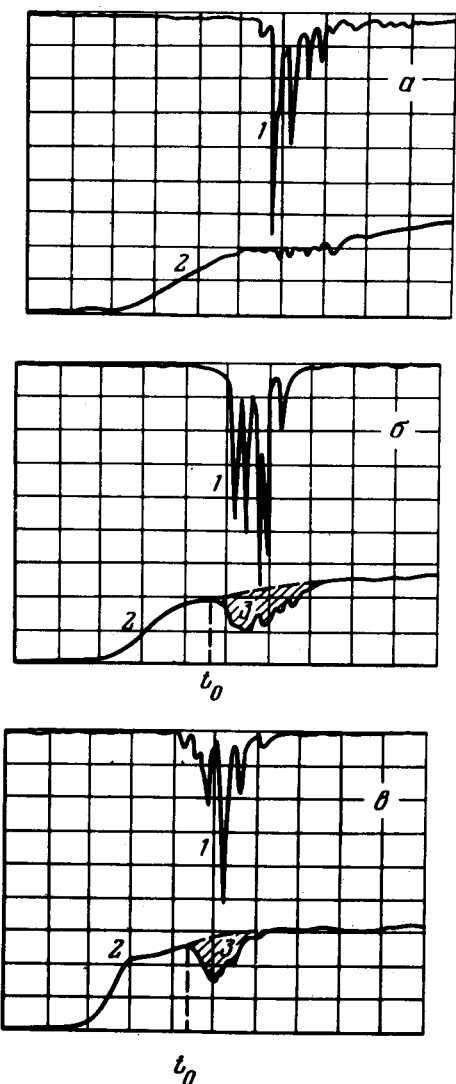


Рис. 1. 1 — импульс электрического поля ленгмюровских волн, 2 — ямки плотности плазмы, 3 — (заштриховано) — область пониженной плотности; а, б — $z = 30$ см, в — $z = 10$ см. Координата z измерительных устройств отсчитывается от "модулирующих" сеток. Развертка — 10 мксек/см

При $\delta n/n \approx 0,1$ эта ширина заведомо не превышает 1 см, т. е. $25 \div 30$ электронных дебаевских радиусов r_D , причем эта оценка включает в себя разрешающее время (1 мксек) приемника ВЧ колебаний (П5-20) и поэтому является оценкой сверху. Модуляция плотности плазмы оказывается значительно более сильной, если в плазме искусственно (подачей короткого импульса напряжения на пару "модулирующих" сеток в начале рабочего объема [1]) создается область пониженной плотности (рис. 1). Такая область, возможно, является резонатором, в котором ионно-звуковые волны, формирующие ямки плотности плазмы, раскачиваются до большей амплитуды, чем в ее отсутствие. Она же является той "меткой", по которой измеряется скорость движения плазмы.

При смещении диагностической аппаратуры вдоль рабочего объема наблюдаемая картина ленгмюровских сгустков и связанных с ними ямок плотности существенно изменяется. Если на сравнительно больших расстояниях (z) от "модулирующих" сеток наблюдается развитая модуляция плотности плазмы с четко выраженными ионно-звуковыми волнами и сравнительно большим количеством ленгмюровских сгустков (рис. 1 а, б, $z = 30$ см), то на малых расстояниях ионно-звуковая модуляция плотности еще не развита в достаточной мере, и наблюдаются лишь отдельные ленгмюровские сгустки (один, два) – рис. 1, в. Это означает, что характерная длина эволюции волновых сгустков имеет порядок 10 – 20 см, т. е. характерное время $\sim 10^{-5}$ сек (несколько тысяч ленгмюровских периодов).

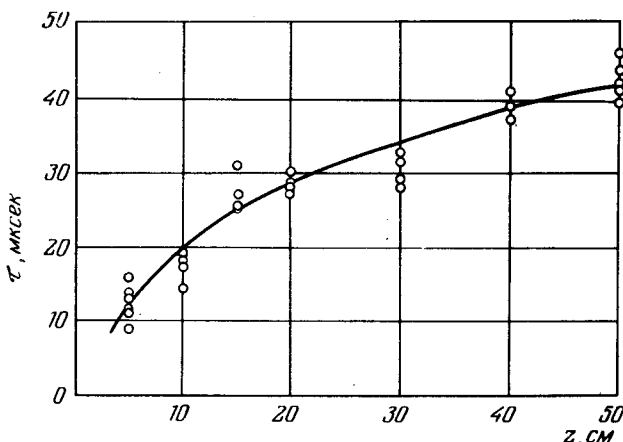


Рис. 2

Измерения показали, что волновые сгустки, локализованные в ямках плотности плазмы, движутся вместе с плазмой, с одной и той же скоростью, т. е. являются неподвижными относительно плазмы. Этот факт следует уже из сравнения рис. 1, б, в, а также иллюстрируется рис. 2, на котором показана зависимость задержки τ прихода сигналов на ВЧ зонд и диагностический резонатор от смещения этих устройств вдоль рабочего объема. Видно, что волновые сгустки свободно пробегают в установке не менее 50 см, затрачивая на это $25 \div 40$ мксек; иными словами, время жизни сгустков составляет по меньшей мере $2 \cdot 10^4$ перио-

дов электронных плазменных колебаний. Сгустки, наблюдаемые на больших расстояниях от начала рабочего объема, обычно оказываются большими по величине и более узкими. По всем признакам и свойствам изучаемые сгустки электрического поля ленгмюровских волн, "запертые" в ими же созданных ямках плотности плазмы, могут быть идентифицированы как ленгмюровские солитоны [6]. В условиях наших опытов солитоны оказываются в первом приближении неподвижными относительно плазмы.

Таким образом, в данной работе впервые наблюдалась модуляционная неустойчивость ленгмюровских волн, возбуждаемых электронным пучком в бесстолкновительной замагниченной плазме. Неустойчивость приводит к пространственному перераспределению энергии колебаний. Возникающие при этом волновые сгустки образуют в плазме "ямки" плотности и локализуются в них, формируя ленгмюровские солитоны, приблизительно неподвижные относительно плазмы. Солитоны большей амплитуды имеют меньшую ширину. Соотношение между относительной глубиной ямки плотности (5 – 10%) и шириной солитона (не превышающей $(25 \div 30)r_D$) близко к теоретическому [6]. Время жизни солитонов – не менее $30 \div 40$ *мксек*, т. е. составляет по меньшей мере несколько десятков тысяч периодов ленгмюровских колебаний.

Авторы выражают благодарность Б.Б.Кадоццу за постоянный интерес к данной работе.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
28 декабря 1976 г.

Литература

- [1] С.В.Антипов, М.В.Незлин, Е.Н.Снежкин, А.С.Трубников. Письма в ЖЭТФ, 23, 613, 1976.
- [2] Н.С. Kim, R. Stenzel, A. Y. Wong. Phys. Rev. Lett., 33, 886, 1974.
- [3] Н. Ikezi, K. Nishikawa, K. Mima. J. Phys. Soc. Japan, 37, 766, 1974.
- [4] A. Y. Wong, B. N. Quon. Phys. Rev. Lett., 34, 1499, 1975.
- [5] Н. Ikezi, R. P. H. Chang, R. A. Stern. Phys. Rev. Lett., 36, 1047, 1976.
- [6] Л. И. Рудаков, ДАН СССР, 207, 821, 1972; Л. М. Дегтярев, В. Е. Захаров, Л. И. Рудаков. ЖЭТФ, 68, 115, 1975.