

## КВАЗИСОЛИТОННЫЕ ЛЕНГМЮРОВСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ЛОКАЛИЗУЮЩИЕСЯ В "ЯМКАХ" ПЛОТНОСТИ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ

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

В опытах по раскâчке ленгмюровских колебаний внешним электрическим полем в искусственно созданных "ямках" плотности замагниченной бесстолкновительной плазмы обнаружены локализующиеся образования типа одномерного ленгмюровского солитона размером  $\sim 25$  дебаевских радиусов, существующие  $\sim 10^4$  периодов колебаний.

Здесь излагаются результаты первой стадии экспериментов, направленных на создание одномерного ленгмюровского солитона [1, 2] внешним ВЧ электрическим полем и исследование его динамики в замагниченной плазме. Исходя из требований слабого столкновительного затухания колебаний и возможности наблюдения ленгмюровских солитонов, неподвижных или остановившихся относительно плазмы, мы выбрали для экспериментов режим текущей бесстолкновительной плазмы. В экспериментальной установке (рис. 1, а) такой режим создавался пропусканьем импульсного ( $\sim 20$  мксек) электронного пучка через рядную камеру, импульсно заполнявшуюся водородом. Образовавшаяся плазма, минуя линию 3 задержки нейтрального газа [3], распространялась с ионно-звуковой скоростью  $v_s = 2 \cdot 10^6$  см/сек вдоль однородного магнитного поля  $H = 1,5 - 2 \cdot 10^3$  э, проходя через рабочий объем и попадая на коллектор 8.

Рабочие параметры плазмы: плотность электронов  $n_e = 3 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>, температура  $T_e = 10$  эв, диаметр плазменного шнура 4 см, давление нейтрального газа  $p \lesssim 5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст., рабочий газ - водород. Раскâчка ленгмюровских колебаний производилась продольным (по отношению к H) ВЧ электрическим полем на частоте  $f_E = 495$  Мц, возбуждавшимся в четвертьволновом резонаторе накачки 4 генератором с длительностью импульса 1 мксек; торцы резонатора были затянуты сетками с прозрачностью каждой 95%, зазор между сетками составлял 2 мм. Чтобы колебания на частоте накачки  $f_E$  могли быть заперты в плазме, исходная плотность выбиралась из условия  $f_p > f_E$ , где  $f_p = (n_e e^2 / \pi m)^{1/2}$  - частота электронных ленгмюровских колебаний. Чтобы при этом электрическое поле на частоте  $f_E$  могло проникнуть в плазму, в момент накачки в зазоре резонатора 4 создавалась "ямка" плотности плазмы при помощи импульса напряжения (отрицательной полярности) длительностью 5 мксек, подававшегося на пару сеток 6, расположенную непосредственно перед сетками резонатора, на расстоянии 0,5 см. Передний фронт этого импульса приблизительно совпадал с моментом включения генератора накачки. Мощность накачки в плазму составляла несколько ватт. "Ямка" плотности распространя-

лась вдоль  $H$  со скоростью  $\sim c_s = 2 \cdot 10^6$  см/сек. Таким образом, в момент накачки местная (в зазоре резонатора) ленгмюровская частота сканировалась во времени от величины  $f_{p1} > f_E$  до величины  $f_{p2} < f_E$ ; как видно из полученных результатов (см. ниже), накачка осуществлялась при  $f_p \approx f_E$  ( $n_e \approx 3 \cdot 10^9$  см $^{-3}$ ), и возбужденное в "ямке" плотности плазмы ленгмюровское колебание оказывалось "запертым" между передним и задним фронтами "ямки" – рис. 1, б. Далее полученное образование – "ямка" плотности и локализованный в ней пакет ленгмюровских волн – проходило мимо ВЧ ленгмюровского зонда 7 (из сетки  $\phi$  2 см с прозрачностью 90%), выведенного на перестраиваемый импульсный приемник с выходом огибающей на осциллограф, и диагностический резонатор 5. Последний был в принципе аналогичен резонатору накачки, но работал на более высокой частоте; он запитывался от слабого генератора непрерывного действия и был настроен так, что при соответствующей плотности и в момент прохождения "ямки" давал (продетектированный) импульс. Ленгмюровский зонд и диагностический резонатор были механически скреплены вместе (расстояние между ними составляло 3 см) и во время опытов могли перемещаться вдоль установки.

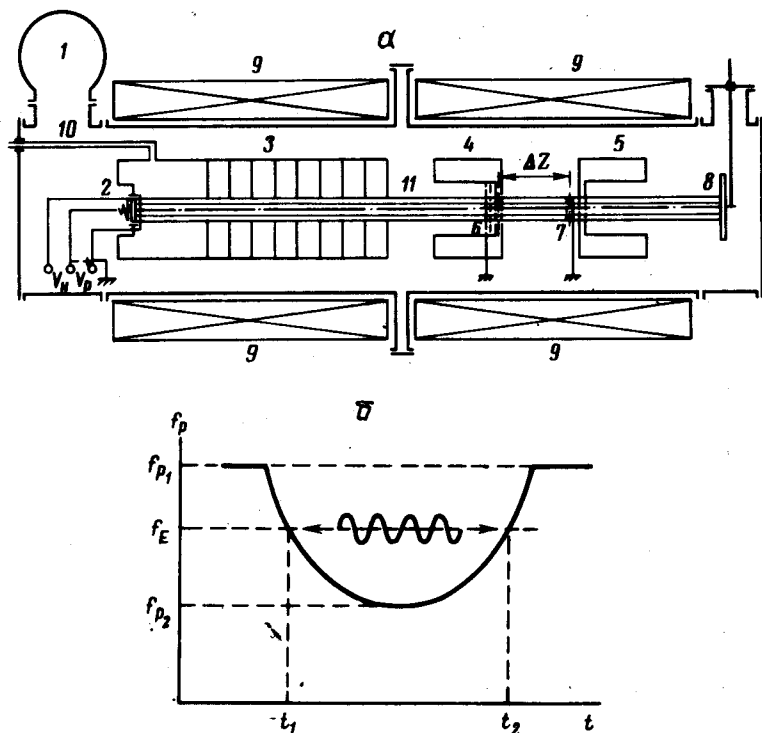


Рис. 1. а – Экспериментальная установка: 1 – вакуумный насос, 2 – электронная пушка, 3 – газовая линия задержки, 4 – резонатор накачки, 5 – диагностический резонатор, 6 – возбуждающие сетки, 7 – ленгмюровский зонд, 8 – коллектор, 9 – катушки магнитного поля, 10 – подача газа, 11 – плазменный шнур; б – ленгмюровское колебание, запертое в "ямке" плотности плазмы;  $t_1$ ,  $t_2$  – моменты закачки и отражения волны от барьера плотности.

Наиболее общий результат опытов представлен на рис. 2, где 1 — импульс резонатора накачки на частоте  $f_E = 495 \text{ МГц}$ , 2 и 3 — импульсы (пакеты) ленгмюровских колебаний на частоте  $492 \text{ МГц}$ , регистрируемые на расстоянии  $15 \text{ см}$  от места накачки, 4 — "ямка" плотности плазмы. Видно, что пакеты 2 и 3 приходятся на передний и задний фронты "ямки", что качественно соответствует характеру пространственного распределения напряженности ВЧ поля волны, запертой в "потенциальной яме" [4] (рис. 1, б). (Различие скоростей переднего и заднего фронтов "ямки" связано с ее расплыванием вперед и назад со скоростью  $\sim c_s$ )<sup>1)</sup>. Особенно обращает на себя внимание тот факт, что пакет 3 "живет" в плазме  $\sim 20 \text{ мксек}$ , что составляет  $10^4$  периодов плазменных колебаний, и имеет пространственную ширину не более  $0,7 \text{ см}$ , что по крайней мере в шесть раз меньше диаметра плазменного шнура. Пакет 2 движется  $\sim$  в пять раз быстрее пакета 3 и имеет ширину  $3 + 4 \text{ см}$ , сравнимую с диаметром плазменного шнура.

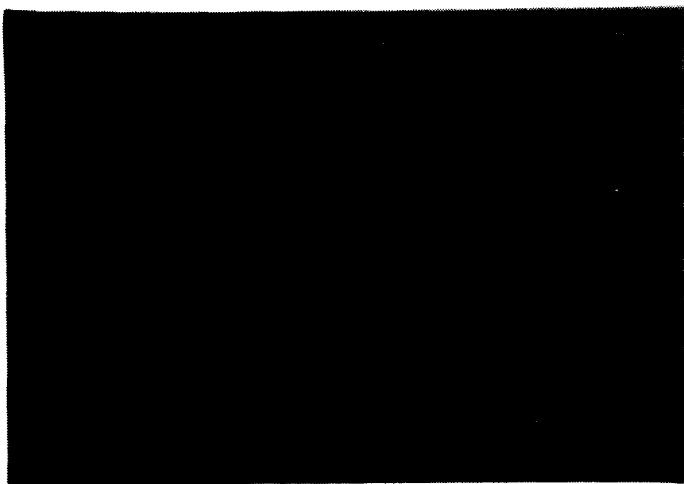


Рис. 2. Осциллограммы пакетов ленгмюровских волн и "ямки" плотности плазмы; развертка  $10 \text{ мксек/дел}$

Время жизни волновых пакетов, локализованных в плазме, ограничивается только условием их запираия:  $f_p > f_E$ , где  $f_p$  — ленгмюровская частота плазмы вне "ямки" плотности. В наших опытах плотность плазмы, по мере ее распространения от места создания, уменьшается (вследствие продольного расплывания), и указанное условие запираия перестает выполняться. При этом пакеты ленгмюровских волн "выскакивают" из "ямок" и достигают ленгмюровского зон-

<sup>1)</sup> Расплывание "ямки" было обусловлено тем, что начальная плотность энергии ленгмюровских волн, возбужденных в "ямке", была недостаточна для уравнивания разницы теплового давления плазмы извне и внутри "ямки"; относительная глубина "ямки" плотности  $\delta n_e / n_e$  составляла несколько процентов.

да практически мгновенно. В зависимости от первоначального запаса с которым условие  $f_p > f_E$  выполнялось в районе резонатора накачки, "длина пробега" ленгмюровского пакета вместе с "ямкой", естественно, оказывалась различной. Это показано на рис. 3, где начальная плотность в случае 2 выше, чем в случае 1. Соответственно, в случае 2 ленгмюровский пакет пробегает вместе с "ямкой" (со скоростью ее переднего фронта  $\sim 2c_s$ ) около 30 см, а в случае 1 — только  $\sim 5$  см.

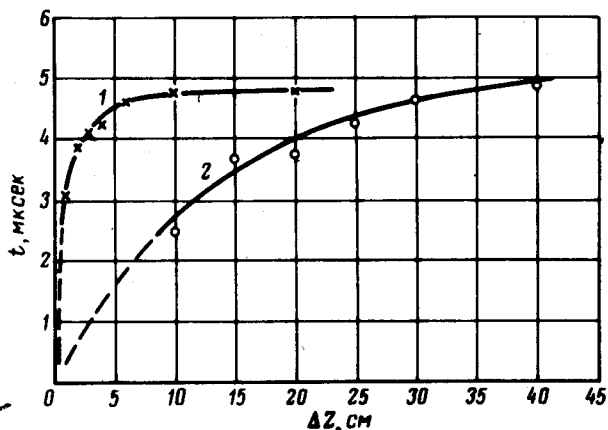


Рис. 3. Зависимость задержки (относительно момента накачки) прихода волнового пакета, связанного с передним фронтом "ямки", от расстояния между ленгмюровским зондом и резонатором накачки

Наиболее важный, на наш взгляд, результат состоит в том, что, хотя внешняя накачка колебаний производится только на переднем фронте "ямки", колебания обнаруживаются преимущественно на ее заднем фронте, где они существуют в течение времени более 20 мксек после импульса накачки (рис. 2), когда переднего барьера плотности для колебаний уже нет (поскольку, согласно рис. 3, он существует не более 6 мксек). Это дает основание считать, что указанные колебания локализируются в "собственной ямке" плотности, образуемой давлением их электрического поля, т.е. представляют собой образование типа квази-одномерного ленгмюровского солитона размером  $\sim 25$  дебаевских радиусов, живущего более  $10^4$  периодов колебаний. Для наблюдения собственной "ямки", самосогласованной с запертым электрическим полем, необходимо увеличить чувствительность диагностического резонатора.

Авторы благодарят Б.Б.Кадомцева за интерес к работе и ее поддержку, В.И.Петвиашвили, В.В.Горева, А.М.Рубенчика и В.Н.Цытовича за полезные обсуждения.

Поступила в редакцию  
20 апреля 1976 г.

### Литература

- [1] Л.И.Рудаков. ДАН СССР, 207, 821, 1972.
- [2] Л.М.Дегтярев, В.Е.Захаров, Л.И.Рудаков. ЖЭТФ, 68, 115, 1975.
- [3] Г.С.Воронов, А.П.Попрядухин, И.С.Шпигель. ПТЭ, № 3, 200, 1964.
- [4] В.Г.Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме, М., изд. Наука, 1967, § 32.