

## О ЗАТУХАНИИ И УСИЛЕНИИ ЛЕНГМЮРОВСКОГО СОЛИТОНА

*С.М.Криворучко, Я.Б.Файнберг, В.Д.Шапиро*

*В.И.Шевченко*

В работе теоретически и экспериментально исследовано затухание высокочастотного ленгмюровского солитона в максвелловской плазме и усиление такого солитона электронным пучком.

В плазме, помещенной в магнитное поле возможен высокочастотный ленгмюровский солитон, распространяющийся под углом к полю ( $k_{\perp} \neq 0$ )

с фазовой скоростью  $v_{\Phi} > v_{\Phi}^{KP} = \omega_{pe} / k_{\perp} \left( 1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{He}^2} \right)$  [1-3].

В настоящей статье экспериментально исследуется резонансное взаимодействие такого солитона с частицами плазмы, приводящее к адиабатическому изменению его амплитуды. В максвелловской плазме за счет взаимодействия с частицами, отражающимися от "горба" потенциала, имеет место затухание амплитуды солитона по степенному закону [4].

$$a(z) = \frac{a(0)}{\left(1 + \sqrt{\frac{a(0)}{6\pi}} \frac{\gamma_L z}{v_\phi}\right)^2}, \quad \gamma_L = -\frac{\omega_{pe}}{n_0} v_\phi^2 \frac{df_0}{dv_\phi}, \quad (1)$$

$f_0(v)$  – равновесная функция распределения частиц плазмы,  $a = e|\phi_0|/mv_\phi^2$ ,  $\phi_0$  – амплитуда потенциала; условия применимости формулы (1)

$$\sqrt{\frac{e|\phi_0|}{m}} v_\phi \ll v_{Te}^2 \text{ и } \omega_{pe} \ll \omega_{He}.$$

При наличии в плазме пучка, движущегося быстрее солитона  $v_0 > v_\phi$ , тот же механизм взаимодействия с резонансными частицами приводит к усилению солитона. Для пучка с размытым распределением по скоростям  $\frac{\Delta v}{v} \gg \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^{1/3}$  ( $n_1, n_0$  – соответственно, плотности пучка и плазмы) имеет место адиабатическое усиление солитона без изменения его формы. Рост амплитуды солитона находится тогда из формулы:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\sqrt{\Delta}} \ln \left[ \frac{\sqrt{\Delta} - \sqrt{a(0)}}{\sqrt{\Delta} - \sqrt{a}} \frac{\sqrt{\Delta} + \sqrt{a}}{\sqrt{\Delta} + \sqrt{a(0)}} \right] + \frac{1}{\sqrt{a(0)}} - \frac{1}{\sqrt{a}} = \\ & = \frac{16}{3^{3/2}\pi^2} \frac{\omega_{pe} z}{(\Delta v)^3} \frac{n_1}{n_0} v_\phi^2, \quad \Delta = \frac{3\pi}{4} \frac{v_0 - v_\phi(0)}{v_\phi(0)} \end{aligned} \quad (2)$$

Амплитуда потенциала в солитоне возрастает до величины:

$$\phi_0^{max} = \frac{mv_\phi^2}{e} \Delta \lesssim \frac{3\pi}{4} \sqrt{\frac{mv_\phi^2}{e}} \phi_0(0), \quad (3)$$

что соответствует максимальному значению плотности энергии электрического поля

$$\frac{E_{\perp max}^2}{4\pi} \approx \frac{9\pi^2}{16} n_0 m (v_0 - v_\phi(0))^2 \quad (4)$$

в  $(n_0/n_1)^{2/3}$  раз большей, чем при возбуждении монохроматической волны электронным пучком. Увеличение связано с тем, что в случае солитона отсутствует механизм нелинейной стабилизации неустойчивости в результате фазового "размешивания" резонансных частиц (см. [4]).

Отметим, что захват ионов полем высокочастотного ленгмюровского солитона приводит к образованию сгустков заряда, устойчивых в радиальном и продольном направлениях, которые могут ускоряться вместе с солитоном. Такой метод ускорения был предложен еще в [5]. Возможно, что импульс ускоренных ионов, который наблюдался в эксперименте [6], возникает за счет действия такого механизма.

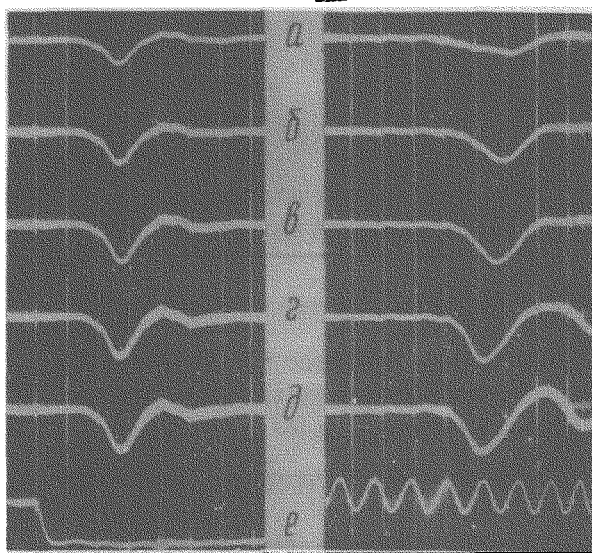


Рис. 1. Осциллограммы адиабатического затухания ленгмюровского солитона в плазме и усиления его пучком электронов:  $a$  — затухание солитона по длине:  $z = 0; z = 20$  см.  $b-d$  — усиление солитона по длине:  $z = 0; z = 20$  см ( $b - v_0 = 1,9 \cdot 10^8$  см/сек;  $c - v_0 = 2,3 \cdot 10^8$  см/сек;  $d - v_0 = 3 \cdot 10^8$  см/сек;  $e - v_0 = 4 \cdot 10^8$  см/сек  $e$  — отрицательный потенциал на сетке и метки времени,  $f = 20$  МГц

Эксперименты проводились на проточной плазме с плотностью  $n_0 = (1 \div 2) \cdot 10^7$  см<sup>-3</sup>, температурой электронов  $T_e \lesssim 4$  эВ помещенной в сильное магнитное поле напряженностью  $1 \div 3$  кэ ( $\omega_{He} \gg \omega_{pe}$ ). Так же как и в [2] высокочастотный ленгмюровский солитон возбуждался с помощью сетки, на которую подавался отрицательный потенциал с фронтом нарастания  $\sim 10$  нсек, и исследовалось распространение такого солитона в плазменном волноводе с длиной однородного участка магнитного поля 40 см. Расходящееся магнитное поле на концах установки в значительной степени снижало отражение волн на торцах. Направления распространения волн и дрейфа плазмы были противоположными, причем, скорость дрейфа  $v_{др} < v_{\phi}$ , так что при наличии дрейфа не приводило к существенному изменению дисперсионных характеристик плазменных волн. Исследование этих характеристик при малых амплитудах возбуждающего сигнала показало, что в системе распространяется первая радиальная гармоника ленгмюровских колебаний замагниченной плазмы с максимальным значением фазовой скорости

$$v_{\phi}^{кр} = \frac{\omega_{pe}}{k_{\perp}} \approx 1,2 \cdot 10^8 \text{ см/сек.}$$

При подаче на возбуждающую сетку ступеньки отрицательного потенциала напряжением больше 5 в в системе возбуждался уединенный импульс отрицательной полярности, ширина которого в соответствии с теоретическими оценками [1-4] определяется соотношением:

$$\frac{\Delta k_{\perp}}{2} = (1 - M^{-2})^{-1/2}, \quad M = \frac{v_{\phi} k_{\perp}}{\omega_{pe}}, \quad M - \text{число Маха.} \quad (5)$$

В результате резонансного взаимодействия с частицами плазмы солитон затухает по мере своего распространения в системе. Затухание является адиабатическим, так что соотношение (5) приближенно выполняется при всех значениях амплитуды. Динамика солитона в процессе его распространения в системе исследовалась с помощью высокочастотных емкостных зондов, сигналы с которых через интегрирующую ячейку и широкополосный усилитель регистрировались осциллографом. Для этого использовались согласованные емкостные зонды, расположенные на расстоянии 10 см друг от друга вдоль установки и ориентированные на поперечную компоненту высокочастотного электрического поля. На рис. 1 представлена серия осциллограмм для случая затухания солитона (осциллограммы *a*) и его усиления пучком электронов (осциллограммы *b* – *d*). Пучок током 10 мкА и энергией до 100 эВ создавался с помощью двухэлектродной электронной пушки, расположенной на расстоянии нескольких сантиметров от возбуждающей сетки. На левой серии осциллограмм показан солитон, регистрируемый зондом, расположенным на расстоянии 5 см от возбуждающей сетки. На правой серии представлены осциллограммы солитона после прохождения им расстояния в 20 см вдоль системы. Параметром на осциллограммах (*b* – *d*) является скорость электронов пучка  $v_0$ . Обработка такого типа осциллограмм позволила определить пространственное распределение амплитуды солитона. На рис. 2 представлена соответствующая зависимость для случая затухания солитона и для сравнения показана также теоретическая зависимость, полученная из формулы (1) (нормировка произведена в точке  $z = 0$ ).

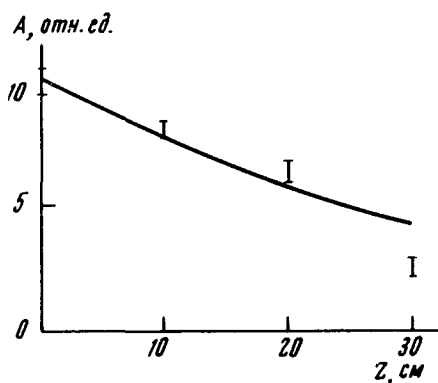


Рис. 2. Изменение амплитуды солитона по длине

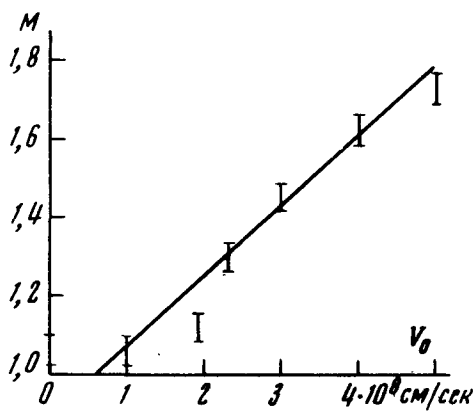


Рис. 3. Зависимость скорости солитона от скорости пучка

Наличие в плазме пучка электронов приводит к усилению солитона. Солитон усиливается до тех пор, пока его фазовая скорость не превысит скорость пучка. В соответствии с этим в эксперименте наблюдалась пропорциональность максимального значения числа Маха  $M_{max}$  скорости пучка (см. рис. 3). Были получены также кривые, определяющие пространственное распределение амплитуды усиливаемого пучком солитона при различных значениях плотности пучка и фиксированной его энергии. При малых плотностях пучка  $n_1 \ll n_0$  эти кривые качественно

согласуются с теоретическими, полученными из формулы (2). При больших плотностях пучка  $n_1 \sim n_0$  пучок изменяет параметры плазмы, в которой распространяется солитон, и пространственный инкремент нарастания амплитуды более медленно, чем в (2) увеличивается с ростом плотности пучка.

Авторы признательны А.Н. Антонову за помощь в проведении эксперимента.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
14 февраля 1973 г.

### Литература

- [ 1 ] Б.Н. Руткевич, А.В. Пашенко, В.Д. Федорченко, В.Н. Муратов. ЖТФ, 42, 1972
- [ 2 ] Н. I .Ikezi, P. J .Barret, R. B. White, A. Y. Wong, Phys. Fl., 14, 1997, 1971.
- [ 3 ] С.М. Криворучко, Я.Б. Файнберг, В.Д. Шапиро, В.И. Шевченко. Ядерный синтез, 12, №6, 1973.
- [ 4 ] В.Д. Шапиро, В.И. Шевченко. Письма в ЖЭТФ, 16, 487, 1972.
- [ 5 ] Я.Б. Файнберг. Атомная энергия, 11, 313, 1961.
- [ 6 ] Е.Д. Короп, А.А. Плутто. ЖТФ, 40, 2534, 1970.