04;10
©1994 г.

РЕЗИСТИВНАЯ ШЛАНГОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ БАНЧЕЙ

С.С.Захарова, С.Д.Столбецов

Численно исследуется устойчивость сильноточного прерывистого электронного пучка в плазменных каналах с наработкой проводимости, обусловленной эффектами ударной ионизации электронами пучка и лавинной ионизации вторичными плазменными электронами, диссоциативной и ион-ионной рекомбинации, трехтельного прилипания. Показано, что развитие неустойчивости в таких каналах происходит медленнее, чем в канале с фиксированной проводимостью. Более того, скорость роста неустойчивости в каналах с наработкой носит не экспоненциальный, как в каналах с постоянной проводимостью, а степенной характер. Эффект лавинной ионизации вихревыми полями на фронтах банчей проявляется только на первом банче, что способствует его устойчивости.

Введение

Для решения ряда научных и прикладных задач требуется осуществить транспортировку пучка в плазменном канале в трубе дрейфа на дистанции порядка нескольких м. Известно, что в плотной плазме с высокой проводимостью главным препятствием для транспортировки пучка является резистивная шланговая неустойчивость. В связи с этим актуальной является задача поиска способов подавления данной неустойчивости.

Идея о возможности подавления неустойчивости за счет модуляции пучков по току была высказана в работе [1]. В ее основе лежит то обстоятельство, что возникшее в омическом плазменном канале вихревое электрическое поле затухает с разной скоростью для своих аксиально-симметричных и несимметричных компонент. При этом время затухания основной аксиально-симметричной компоненты (так называемое монопольное время t_m) может в несколько раз превосходить время затухания дипольных возмущений t_d [1,2]. В этом случае в прерывистом пучке с банчами длительностью t_b и паузами между ними t_p при выполнении условий $t_d \leqslant t_p \leqslant t_m$ должно наблюдаться существенное ослабление дипольных возмущений полей, ответственных за развитие неустойчивости, и вместе с тем будет сохраняться магнитосвязанность банчей.

Подробное численное исследование устойчивости прерывистых релятивистских электронных пучков в каналах с фиксированной проводимостью показало, что временные и пространственные скорости развития неустойчивости ниже в прерывистом пучке с длительностью банча, меньшей дипольного времени, чем в непрерывном пучке. Если за время развития неустойчивости считать время, за которое смещение центра масс пучка достигает его толщины, то время развития неустойчивости прерывистого пучка с параметрами $t_b < t_d$ и $t_d \leqslant t_p \leqslant t_m$ примерно в десять раз больше аналогичной величины для непрерывного пучка. Следует отметить, что в прерывистых пучках с паузами $t_p \sim t_d$ наблюдалась передача возмущений от банча к банчу в паузах. Если же длительность паузы была порядка монопольного времени, которое много больше дипольного времени, то неустойчивость развивалась апериодически в каждом банче на сильном обратном токе.

Предположение о фиксированной проводимости канала, для которого получены упомянутые выше результаты, является огрублением реальной ситуации, поскольку сильноточный прерывистый релятивистский пучок оказывает существенное влияние на параметры канала транспортировки. Поэтому для ответа на вопрос об его устойчивости требуется провести исследование, учитывающее наработку плазмы пучком. Интересующее нас повышение устойчивости пучка в канале с наработкой возможно по следующим причинам. Во-первых, при значительном изменении проводимости канала при прохождении пучка изменяется область частот, на которых развивается неустойчивость, и частоты, соответствующие в данный момент максимальному инкременту, через некоторое время оказываются в области устойчивости. Во-вторых, ввиду падения концентрации (и проводимости) плазмы в паузах между банчами может происходить более быстрая (в сравнении с фиксированным каналом) релаксация возмущений в паузах. Это позволяет уменьшить скважность пучка, не уменьшая при этом затухания дипольных возмущений в паузах, что приведет к увеличению среднего тока пучка при том же токе в банче и, следовательно, к уменьшению встречного плазменного тока в каждом банче.

В настоящей работе проведено численное исследование устойчивости ленточного прерывистого релятивистского электронного пучка в плазменном канале с учетом эффектов ударной и лавинной ионизации, диссоциативной и ион-ионной рекомбинации, трехтельного прилипания.

Показано, что развитие резистивной шланговой неустойчивости сильноточного прерывистого пучка в плазменном канале с наработкой проводимости при атмосферном давлении происходит медленнее, чем в канале с постоянной проводимостью. Более того, скорость роста неустойчивости в канале с наработкой носит не экспоненциальный, как в канале с фиксированной проводимостью, а степенной характер. Эффект лавинной ионизации вихревыми полями на фронтах банчей проявляется только на первом банче, что способствует его устойчивости.

Описание модели

Для описания динамики ленточного релятивистского электронного пучка, распространяющегося вдоль оси z плазменного канала с постоянной скоростью $v_z \approx c$, применяется метод крупных частиц. Пучок

бесконечен и однороден вдоль оси y и имеет беннетовское распределение по оси x [3].

В модели использовались уравнения движения крупных частиц

$$v_z^2 \frac{d^2x}{dz^2} = -\frac{ev_z B_y}{\gamma mc},$$

уравнения для полей

$$\frac{\partial B_y}{\partial x} = \frac{4\pi}{c}(J_b + J_p), \quad J_p = \sigma E_z, \quad \frac{c^2}{4\pi}\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \frac{\partial \sigma E_z}{\partial \tau} + \frac{\partial J_b}{\partial \tau}$$

и уравнения, описывающие наработку проводимости,

$$\frac{dn_e}{d\tau} = QJ_b - \alpha n_e n^+ + K_i n_a n_e - \nu_{\text{пр}} n_e,$$

$$\frac{dn^+}{d\tau} = QJ_b - \alpha n_e n^+ + K_i n_a n_e - \beta n^+(n^+ + n_e).$$

Здесь e и m — заряд и масса электрона, γ — релятивистский фактор, E_z и B_y — компоненты электрического и магнитного полей, J_b и J_p — плотности токов пучка и плазмы, n_e и n^+ — концентрации электронов пучка и плазмы, n_a — концентрация атомов газа, Q — коэффициент ударной ионизации газа электронами пучка, α и β — коэффициенты диссоциативной и ион-ионной рекомбинаций, $\nu_{\text{пр}}$ — частота трехтельного прилипания, K_i — скорость реакции лавинной ионизации

$$\lg K_i = -(8.3 + 36.5/\bar{\varepsilon}), \quad \bar{\varepsilon} = |E|/\left(n_a \cdot 10^{-16}\right), \quad \text{В} \cdot \text{см}^2.$$

На фронтах банчей прерывистого пучка могут возникать вихревые электрические поля, достигающие пробойных значений, что приводит к лавинной ионизации в плазменном канале. Последнее обстоятельство может привести к дополнительному увеличению отношения проводимостей плазмы в банче и в паузе. Поэтому в работе рассматриваются и сравниваются результаты расчетов, полученные с использованием одной из двух моделей наработки плазмы [4]: с учетом эффекта лавинной ионизации плазмы и без него.

Уравнения решались в переменных x, z, $\tau = t - z/v_z$ на координатной сетке, имеющей размеры $0 \leqslant z \leqslant 60\lambda\!\!\!^{-}_\beta$, где $\lambda\!\!\!^{-}_\beta = \sqrt{I_A/(2\pi J_{b0})}$ — длина волны бетатронных колебаний пучка, I_A — альфеновский ток, J_{b0} — плотность тока на оси пучка.

В плоскости инжекции пучку задавались поперечные смещения с амплитудой A_0, много меньше полуширины пучка a.

Как указывалось выше, ослабление неустойчивости в плазме возможно за счет изменения ее проводимости как в самих банчах, так и в паузах между ними. Будем рассматривать пучки, существенно влияющие на проводимость плазмы в канале, такие что $n_1/n_0 > 2$, где n_0 и n_1 — концентрации электронов плазмы до и после прохождения банча. Кроме того, должны удовлетворяться требования магнитосвязанности

банчей в пучке и затухания несимметричных компонент неустойчивости в паузах $t_b \ll t_m(n_0)$, $t_d \leqslant t_p \leqslant t_m(n_0)$. Для беннетовских пучков в каналах с беннетовским профилем проводимости монопольное время t_m совпадает со скиновым временем

$$t_s = \frac{4\pi\sigma(n_0)a^2}{c^2}.$$

Проводившиеся оценки показали, что перечисленным условиям при давлении $p \sim 1$ атм, $a \sim 1$ см удовлетворяют пучки с параметрами

$$J_{b0} \geqslant 10\,\text{кА/см}^2, \quad 1\,\text{нс} \leqslant t_b \leqslant 5\,\text{нс}, \quad t_b \leqslant t_p \leqslant 5t_b. \qquad (1)$$

Расчеты проводились для соответствующего оценкам (1) пучка с плотностью тока на его оси $J_{b0} = 26\,\text{кА/см}^2$ и банчам следующей формы: время переднего и заднего фронтов $t_f = 0.5$ нс, время импульса $t_i = 1$ нс и паузой между банчами $t_p = 8$ нс, полуширина пучка $a = 1$ см.

Известно, что в каналах с фиксированным беннетовским профилем проводимости максимальная скорость роста неустойчивости достигается на частотах $\omega \sim 1/t_s$ [3], однако в каналах с наработкой проводимости величина скорости роста неустойчивости меняется с изменением проводимости, соответственно могут меняться и характерные частоты. Для выбранного нами пучка проводимость плазмы на оси канала при $Z = 0$ изменяется в течение банча примерно в три раза, поэтому мы рассчитывали варианты с тремя различными частотами возмущений ω_1, $\omega_2 = 2\omega_1$, $\omega_3 = 3\omega_1$, соответствующими обратному скиновому времени в начале, середине и конце банча, и, кроме того, возмущение вида $A_0(\sin(\omega_1\tau) + \sin(\omega_2\tau) + \sin(\omega_3\tau))$, являющееся суперпозицией возмущений на этих частотах.

Обсуждение результатов

Результаты расчетов представлены на рисунках. На рис. 1 приведены смещения центров масс трех пучков в зависимости от τ на различных дистанциях по Z. Видно, что в отсутствие лавины (кривые *1* и *2*) первый банч испытывает сильное апериодическое смещение при взаимодействии со встречным током, в дальнейшем неустойчивость выходит на периодический режим колебаний относительно первоначальной оси канала. При учете лавинной ионизации (кривая *3*) первый банч, на фронте которого развивается лавина, распространяется устойчиво. В последующих банчах из-за достаточно высокой проводимости плазмы поля не достигают пробойных значений, т.е. лавины не происходит, и возмущения в системе нарастают. Сопоставление кривых *1* и *2* показывает, что характерные особенности РШН для возмущений на разных частотах практически совпадают. Отметим, что если на малых дистанциях по Z периоды колебаний центра масс пучка пропорциональны обратным частотам, то при $Z \sim 30\lambda_\beta$ периоды колебаний при различных частотах возбуждения выравниваются и частота колебаний соответствует соотношению $\omega \sim 1/t_s$, где $t_s \approx 10$ нс определяется по характерной проводимости в середине банча.

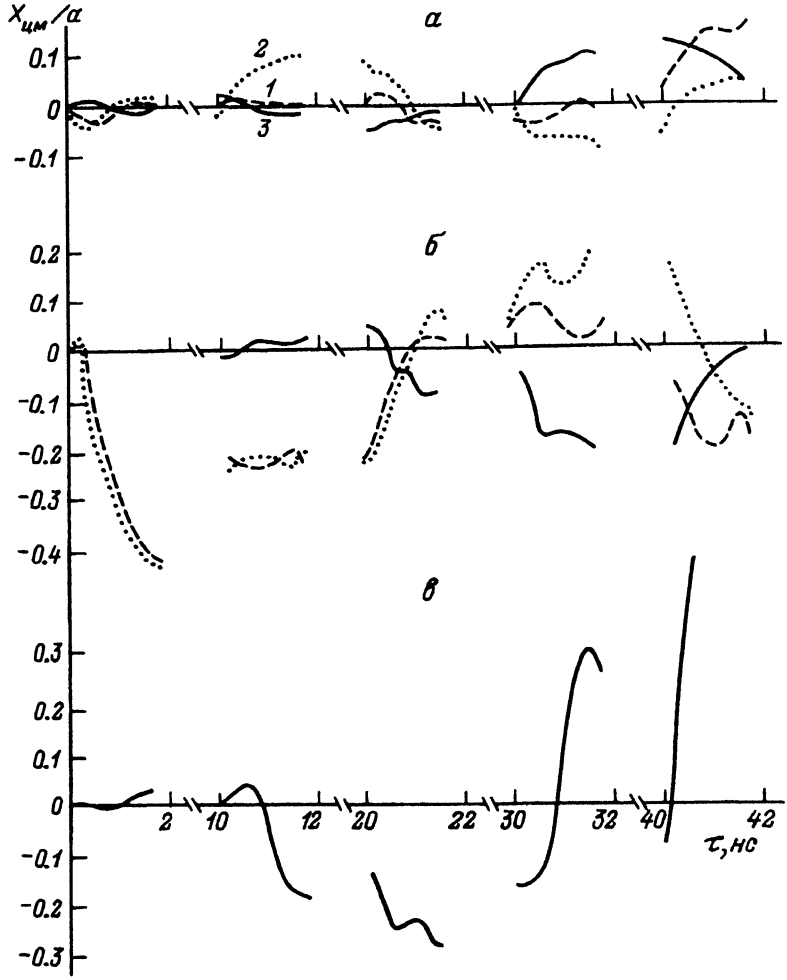

Рис. 1. Смещение центров масс трех пучков $X_{цм}$ в зависимости от τ на разных дистанциях по Z.
а — $Z = 20\lambda_\beta$, *б* — $30\lambda_\beta$, *в* — $50\lambda_\beta$; *1* — начальное возмущение на частоте $f = 0.03\,\tau_s^{-1}$, *2* — начальное возмущение как сумма возмущений на трех частотах $f = (0.01, 0.02, 0.03)\,\tau_s^{-1}$; *3* — начальное возмущение на частоте $f = 0.03\,\tau_s^{-1}$ при учете лавинной ионизации.

На рис. 2 показаны пространственные скорости роста неустойчивости РЭП в каналах с наработкой проводимости и в каналах с фиксированной проводимостью, построенные по максимальным отклонениям центров масс соответствующих банчей. Пространственные скорости роста возмущений в одномодовом и многомодовом режимах близки друг к другу, поэтому сплошные кривые на рис. 2, соответствующие распространению РЭП в каналах с наработкой проводимости, приведены лишь для многомодового режима начальных возмущений. Параметрами кривых являются номера банчей, отсчитываемые от головы пучка. Видно, что в канале с фиксированной проводимостью (штриховые кривые) пространственные скорости роста неустойчивости уже во 2-м и 3-м банчах имеют экспоненциальный рост, а в канале с нара-

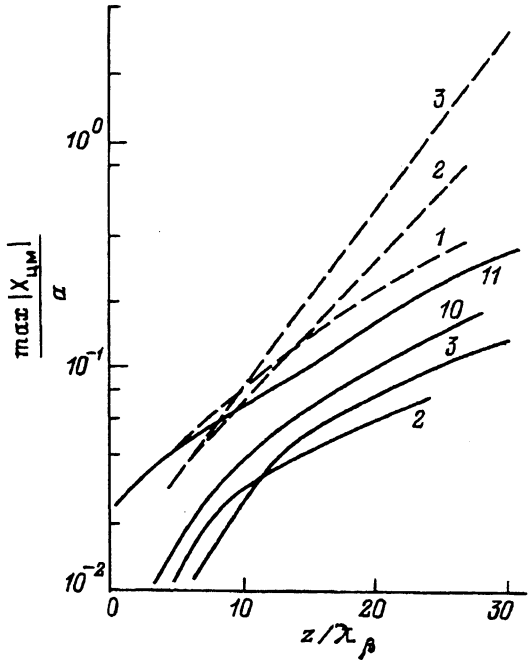

Рис. 2. Скорости роста неустойчивости, построенные по максимумам отклонений центров масс соответствующих банчей пучка в канале с наработкой проводимости (сплошные кривые) и для пучка в фиксированном канале (пунктир). Цифры у кривых — номера банчей.

боткой проводимости не только первые банчи, но и значительно более поздние имеют степенной рост. Этим объясняется и тот факт, что в канале с наработкой проводимости пространственные скорости роста возмущений заметно меньше, чем в канале с фиксированным значением проводимости в аналогичном пучке.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Развитие резистивной шланговой неустойчивости в пучке с параметрами $J_{b0} = 25\,\text{кА/см}^2$, $t_p = 8\,\text{нс}$, $t_b = 2\,\text{нс}$, удовлетворяющими критериям (1), в канале с наработкой проводимости, обусловленной эффектами ударной ионизации электронами пучка и лавинной ионизации вторичными плазменными электронами, диссоциативной и ион-ионной рекомбинации, трехтельного прилипания, происходит с меньшей скоростью, чем в канале с постоянной проводимостью. Более того, пространственные скорости роста неустойчивости в канале с наработкой меняются не по экспоненциальному закону, а по более медленному — степенному. На дистанциях $Z \leqslant 40\lambda_\beta$ поперечное смещение пучка не превышает $0.5a$ при амплитуде начального возмущения пучка $A_0 = 0.02a$.

2. Эффект лавинной ионизации вихревыми полями на фронтах первого банча способствует его устойчивости. В последующих банчах из-за достаточно высокой проводимости плазмы в канале вихревые поля не достигают пробойных значений, и эти банчи оказываются неустойчивыми.

3. Можно подобрать параметры прерывистого релятивистского электронного пучка, позволяющие значительно уменьшить скорость

развития резистивной шланговой неустойчивости за счет изменения проводимости плазмы в канале, однако полностью подавить эту неустойчивость при атмосферном давлении не удается.

В заключение авторы выражают признательность М.Г.Никулину за помощь в работе.

Список литературы

[1] *Prono D.S.* // Phys. Fluids. 1974. Vol. 17. N 9. P. 1727–1737.
[2] *Kiuttu G.F., Adler R.J.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 54. N 15. P. 1668–1670.
[3] *Андреев С.И., Столбецов С.Д.* // ТВТ. 1988. Т. 26. С. 234–238.
[4] *Сопин П.И.* // ТВТ. 1985. Т. 23. С. 235–239.

Московский радиотехнический институт

Поступило в Редакцию
29 июня 1993 г.