

01;09;10

## **Влияние пространственного заряда на неустойчивость в системе электронный поток–электромагнитное поле вблизи границы полосы пропускания замедляющей системы**

© Н.О. Бессуднова, А.Г. Рожнёв

Саратовский государственный университет

Поступило в Редакцию 1 сентября 1999 г.

Исследуется влияние пространственного заряда на режимы генерации и усиления сигнала в системе электронный поток–электромагнитное поле вблизи границы полосы пропускания замедляющей системы. На плоскости параметров получены области с различным характером поведения системы. Показано, что вблизи высокочастотной границы пространственный заряд облегчает генерацию, а вблизи низкочастотной границы — наоборот, затрудняет ее.

Взаимодействие прямолинейного электронного пучка с полем вблизи границы полосы прозрачности замедляющей системы (ЗС) используется для генерации и усиления электромагнитных волн в релятивистских оротронах и мощных лампах бегущей волны. Возникновение полезной или паразитной генерации напрямую связано с механизмами неустойчивости в системе взаимодействующих волн [1], следовательно анализ неустойчивости необходим для полного теоретического описания этих приборов. Впервые такое исследование было проведено в [2] для случая бесконечно малого пространственного заряда (ПЗ), который не характерен для реальных систем. Увеличение ПЗ может изменить характер неустойчивости с абсолютной на конвективную или наоборот, затруднив или облегчив условия генерации. С другой стороны, учет ПЗ делает задачу многопараметрической, что представляет самостоятельный интерес для теории волн. Подобные исследования интенсивно развиваются, например в [3] исследуется неустойчивость в многопараметрической системе химической кинетики с учетом диффузии.

Уравнения взаимодействия пучка с синхронной составляющей продольного электрического поля вблизи границы полосы пропускания ЗС [2] с учетом сил пространственного заряда имеют вид

$$\left(\frac{\partial}{\partial \xi} - iB\right)^2 \tilde{I} = i(\tilde{F} + iq\tilde{I}), \quad \frac{\partial \tilde{F}}{\partial \tau} + i\mu \frac{\partial^2 \tilde{F}}{\partial \xi^2} = -\tilde{I}, \quad (1)$$

где  $\tilde{F}(\xi, \tau)$  и  $\tilde{I}(\xi, \tau)$  — медленно меняющиеся амплитуды высокочастотного поля и тока;  $B$  — параметр рассинхронизма пучка с волной критической частоты;  $q = [\omega_p/(\omega_0\varepsilon)]^2$  — параметр ПЗ, где  $\omega_p$  — частота ленгмюровских колебаний в пучке;  $\omega_0$  — критическая частота;  $\varepsilon$  — параметр взаимодействия. Параметр  $\mu = 1$  для низкочастотной (НЧ) границы и  $\mu = -1$  для высокочастотной (ВЧ) границы полосы пропускания. Вывод и обсуждение уравнений (1) и введенных параметров можно найти в [2].

Дисперсионное уравнение задачи (1) имеет вид

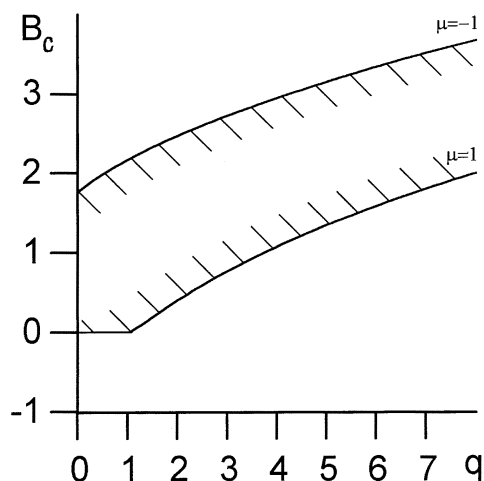
$$\Omega(\beta) = \mu\beta^2 + \frac{1}{(\beta + B)^2 - q}. \quad (2)$$

Частота  $\Omega(\beta)$  является аналитической функцией всюду за исключением двух точек  $\beta_{1,2} = -B \pm \sqrt{q}$ , в которых имеются полюсы первого порядка. Они соответствуют дисперсии электронного потока, не связанного с волной в ЗС. Правила обхода особенностей в интеграле Фурье, который является формальным решением начальной задачи, определяется условием  $\tilde{I}(\xi, \tau) = 0$  при  $\xi \rightarrow -\infty$ , что означает затухание поля в направлении, противоположном направлению распространения электронного потока.

Рассмотрим задачу о развитии во времени возмущения, заданного в пространстве в некоторый начальный момент времени, т.е. исследуем систему на возможность возникновения в ней абсолютной неустойчивости. Используя метод, развитый в [2], приходим к выводу, что в системе реализуется абсолютная неустойчивость, если на комплексной плоскости волнового числа  $\beta$  существуют седловые точки  $\beta_s$ , удовлетворяющие уравнению

$$d\Omega/d\beta = 0, \quad (3)$$

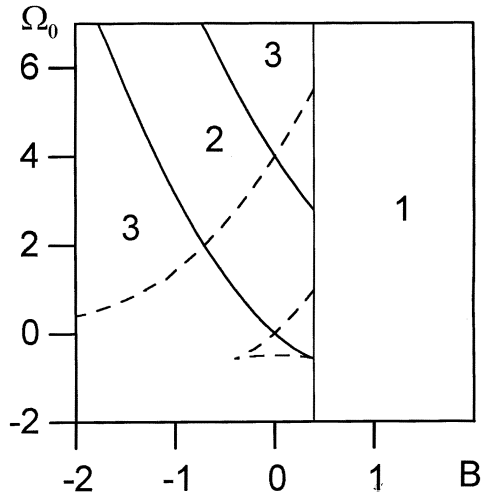
для которых выполняются два условия:  $\text{Im } \Omega(\beta_s) < 0$  и  $\text{Im } \beta_s > 0$ . Первое означает, что малое начальное возмущение с волновым числом  $\beta_s$



**Рис. 1.** Зависимость  $V_c(q)$  для низкочастотной ( $\mu = 1$ ) и высокочастотной ( $\mu = -1$ ) границ полосы пропускания. Штриховкой обозначена область абсолютной неустойчивости.

нарастает, а второе вытекает из правила обхода особенностей. Расчет показывает, что абсолютная неустойчивость в системе реализуется при значениях параметра  $B$ , больших некоторого критического значения  $B_c$  для НЧ границы полосы пропускания, и при  $B$ , меньших некоторого критического значения  $B_c$  для ВЧ границы. Эти зависимости  $V_c(q)$  представлены на рис. 1. Из рисунка следует, что для ВЧ границы при  $B > 1.755$  увеличение ПЗ в системе приводит к появлению в системе абсолютной неустойчивости. Для НЧ границы, наоборот, при  $B > 0$  увеличение ПЗ приводит к подавлению абсолютной неустойчивости. Таким образом, вблизи ВЧ границы ПЗ облегчает генерацию, а вблизи НЧ границы — затрудняет ее.

Возможна другая постановка задачи, когда возмущение создается в некотором участке пространства по заданному временному закону. В этом случае можно рассматривать задачу об усилении волн средой (или конвективной неустойчивости) при их распространении от источника с заданной частотой  $\Omega_0$  [1]. Если в системе отсутствует абсолютная неустойчивость, границы областей, в которых реализуются различные



**Рис. 2.** Карта параметров  $(B, \Omega_0)$  для низкочастотной границы полосы пропускания ( $\mu = 1$ ). Параметр  $q = 2$ . 1 — область абсолютной неустойчивости, 2 — область конвективной неустойчивости, 3 — область пропускания.

режимы, а именно усиления и пропускания, в пространстве параметров  $(B, \Omega_0, q)$  будут определяться системой уравнений [2,3]  $\Omega_0 = \Omega(\beta)$ ,  $d\Omega/d\beta = 0$ , что дает применительно к дисперсионному уравнению (2)

$$\Omega_0 = \mu\beta^2 + \frac{1}{(\beta + B)^2 - q} = 0, \quad \mu\beta - \frac{B + \beta}{[(B + \beta)^2 - q]^2} = 0. \quad (4)$$

Заметим, что линии, определяемые (4), разделяют области, где мнимые части корней уравнения  $\Omega_0 = \Omega(\beta)$  сохраняют знак. Характер поведения системы в каждой из таких областей можно определить, используя критерий различения конвективной неустойчивости и непропускания [1] в одной характерной точке.

Расчет карт параметров  $(B, \Omega_0)$ , соответствующих различным видам решения, был проведен для НЧ и ВЧ границ полосы пропускания замедляющей системы в диапазоне значений параметра пространственного заряда  $q$  от 0 до 10. На рис. 2 представлена плоскость параметров  $(B, \Omega_0)$ , рассчитанная для НЧ границы и  $q = 2$ . Цифрой 1

обозначена область абсолютной неустойчивости, области конвективной неустойчивости и пропускания — цифрами 2 и 3 соответственно. Линии, разделяющие области с различными типами решений, а именно усиления и пропускания, и пунктирные линии соответствуют случаю резонанса в системе  $\Omega_0 = \Omega_s$ , где  $\Omega_s = \Omega(\beta_s)$  — частота, при которой сливаются корни (2). Можно показать, используя аналогию с прохождением пучка в среде с реактивной проводимостью, что во внеполосной области  $\Omega_0 < 0$  реализуется режим пропускания. Действительно, полагая, что  $|\Omega| \gg 1$ , волновые числа для волн тока можно приближенно считать равными:  $\beta \approx -B \pm \sqrt{q - 1/(B^2 + |\Omega|)}$ . При сделанных предположениях они действительны и система прозрачна. Таким образом, распространение возмущений происходит за счет волн пространственного заряда в электронном потоке.

Авторы благодарны Д.И. Трубецкову за поддержку работы.

Работа выполнена при финансировании Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 97-02-16546).

## Список литературы

- [1] Лившиц Е.М., Питаевский Л.П. Физическая кинетика. М.: Наука, 1979. С. 528.
- [2] Кузнецов А.П., Кузнецов С.П. // Изв. вузов. Радифизика. 1980. Т. 23. № 9. С. 1104–1112.
- [3] Kuznetsov S.P., Mosekilde E., Dewel G. et al. // J. Chem. Phys. 1997. V. 108(18). P. 7609–7616.