

## О РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СЛАБОИОНИЗОВАННОМ ГАЗЕ ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

*С. И. Крашенинников, В. В. Филлюшкин*

Рассматривается релаксация электронного пучка в молекулярном слабоионизованном газе повышенной плотности. С учетом зависимости концентрации электронов и инкремента неустойчивости от энергии ленгмюровских колебаний найдена длина релаксации пучка.

При исследовании процесса релаксации электронного пучка обычно рассматривают полностью ионизованную бесстолкновительную плазму. В этом случае интенсивность ленгмюровских колебаний, находящихся в резонансе с электронами пучка, может определяться различными нелинейными механизмами перекачки волн по спектру [1]. С другой стороны, при инжекции электронного пучка в слабоионизованный газ повышенной плотности, где концентрация электронов  $n$  определяется энергией ленгмюровских колебаний  $W_0$ , эффект стабилизации пучковой неустойчивости может быть связан с зависимостью инкремента неустойчивости  $\gamma \sim 1/\sqrt{n}$  от  $W_0$ .

При достаточно большой плотности нейтрального газа  $N$ , когда диффузия электронов не играет существенной роли, концентрация электронов определяется локальным значением  $W_0$  и может быть найдена из кинетического уравнения [2]:

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} = \frac{W_0}{n} \hat{D}_\epsilon (f_e) - \hat{S}t (f_e) - \hat{D} (f_e), \quad (1)$$

где  $f_e(\epsilon)$  — функция распределения электронов плазмы по энергиям; первый член в правой части (1) описывает нагрев электронов в поле ленгмюровских колебаний при столкновении с частицами слабоионизованного газа; второй — упругое и неупругое взаимодействие электронов со слабоионизованным газом; третий — процессы гибели электронов.

Однако в случае молекулярного газа, когда большая доля энергии электронов идет на возбуждение колебательных степеней свободы молекул, зависимость концентрации электронов от  $W_0$  имеет более простой вид [3]:

$$W_0 \nu_{en} = n \hbar \omega \nu_{ev}, \quad (2)$$

где  $\nu_{en}$ ,  $\nu_{ev}$  — частоты упругого столкновения и колебательного возбуждения молекул соответственно;  $\hbar \omega$  — колебательный квант молекулы.

Поскольку  $\nu_{en}$  и  $\nu_{ev}$  имеют слабую зависимость от средней энергии электронов, то этой зависимостью мы будем в дальнейшем пренебрегать.

Таким образом, как следует из (2) в слабоионизованном газе повышенной плотности стабилизация пучковой неустойчивости может быть связана с уменьшением инкремента  $\gamma \sim 1/\sqrt{n}$ . Считая релаксацию одномерной, рассмотрим систему квазилинейных уравнений:

$$v_g \frac{\partial W_k}{\partial x} - \frac{\partial \omega_{pe}}{\partial x} \frac{\partial W_k}{\partial k} = 2 \gamma_k W_k - \nu_{en} W_k, \quad (3)$$

$$v \frac{\partial f_b}{\partial x} = 4 \pi^2 \left( \frac{e}{m} \right)^2 \frac{\partial}{\partial v} \frac{W_k}{v} \frac{\partial f_b}{\partial v}, \quad (4)$$

где  $f_b(v)$  — функция распределения электронов пучка по скоростям;  $W_k$  — спектральная плотность энергии ленгмюровских колебаний;  $k$  — волновое число;  $v_g \equiv \partial \omega_k / \partial k$ ;  $\omega_{pe} = (4 \pi n e^2 / m)^{1/2}$ ;  $e$ ,  $m$  — заряд и масса электрона;  $\gamma_k$  — инкремент неустойчивости для волнового числа  $k$ . Поскольку групповая скорость ленгмюровских колебаний  $v_g$  мала, то если вычислить интенсивность ленгмюровских колебаний  $W_0$  в предположении, что  $2 \gamma_k > \nu_{en}$ , для практически интересных концентраций электронов пучка она оказывается столь велика, что, принимая во внимание соотношение (2), условие  $2 \gamma_k > \nu_{en}$  сильно нарушается. Тогда, пренебрегая в (3) левой частью и найдя функцию  $f_b(v)$ :

$$f_b(v) = 2 \frac{v_0}{v} \frac{(v - v_m)}{(v_0 - v_m)}, \quad (5)$$

где  $v_m : f_b(v_m) = 0$ ,  $v_m < v_0$ ; после ее подстановки в (4) с учетом (2) получаем уравнение для скорости релаксации

$$\frac{du_m}{d\xi} = \frac{u_m^2}{(1 - u_m)^4} \frac{2}{(1 + u_m)}, \quad (6)$$

$$\text{где } u_m = \frac{v_m}{v_0}, \quad \xi = 6\pi^2 \frac{\hbar\omega}{1/2 mv_0^2} \frac{\nu_{ev}}{\nu_{en}} \frac{\omega_{pb}^2}{\nu_{en} v_0} x.$$

В случае  $\Delta v/v_0 \lesssim 1$  имеем оценку длины релаксации

$$L_{\Delta v} \approx \frac{1}{30\pi^2} \frac{1/2 mv_0^2}{\hbar\omega} \frac{\nu_{en} v_0}{\omega_{pb}^2} \frac{\nu_{en}}{\nu_{ev}} \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^5. \quad (7)$$

Для характерных значений энергии пучка  $\sim 3$  кэВ, концентрации электронов пучка  $n_b = 2 \cdot 10^9$ , давления нейтрального газа порядка 0,1 тор длина релаксации оказывается примерно равной 10 см, что находится в хорошем согласии с результатами эксперимента [4]. Следует отметить, что зависимость  $L_{\Delta v}$  от  $v_0$  и  $n_b$  также хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Выражение (7) для длины релаксации получено в пренебрежении левой частью уравнения (3) — учет перекачки по спектру из-за неоднородности плазмы существенно не повлияет на процесс релаксации, если выполнено условие:

$$\frac{1}{6\pi^2} \frac{\nu_{en}^3}{\nu_{ev} \omega_{pb}^2} \frac{1/2 mv_0^2}{\hbar\omega} \gg 1. \quad (8)$$

Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию  
27 июня 1980 г.

### Литература

- [1] А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев, В.Д.Шапиро, В.И.Шевченко. ЖЭТФ, 72, 507, 1977.
- [2] А.А.Иванов, Т.К.Соболева, П.Н.Юшманов. Физика плазмы, 3, 152, 1977.
- [3] A.A.Ivanov, S.I.Krasheninnikov, V.V.Starykh, V.V.Phylushkin, I.Wilhelm, R.Winkler. 4<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Chemistry, Zurich, August 27—September 1, 1979, Proceeding, p.421.
- [4] A.M.Alecseev, V.M.Atamanov, E.M.Erastov, A.A.Ivanov, S.I.Krasheninnikov, G.B.Levadny, Yu.F.Nasedkin, V.A.Nickiforov, Yu.M.Pustovoit, V.V.Shapkin, T.K.Soboleva, E.P.Tsvetkov. 4<sup>th</sup> ISPC, p.427.