

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

А. И. АХИЕЗЕР и Я. Б. ФАЙНБЕРГ

**О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
С ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛАЗМОЙ**

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 28 IX 1949)

Если через неограниченную плазму проходит немодулированный параллельный пучок электронов, невозмущенная скорость которых превосходит среднюю тепловую скорость электронов плазмы, то в последней возбуждаются продольные электрические волны с экспоненциально нарастающей амплитудой; состояние пучка при этом становится неустойчивым, и существующие в нем флуктуации плотности и скорости также распространяются в виде продольных волн с нарастающей амплитудой, иными словами, в пучке естественно возникают сгущения и разрежения плотности, распространяющиеся в виде волн с растущей амплитудой.

Эти утверждения справедливы, если не учитывать роли соударений электронов плазмы с положительными ионами и с электронами пучка и считать, что отклонения различных величин от их равновесных значений малы.

Линеаризованная система уравнений, описывающих взаимодействие плазмы с пучком заряженных электронов, в которой не учитываются столкновения частиц, имеет следующий вид (¹, ²):

$$\frac{df}{dt} + u \frac{df}{dx} + \frac{e}{m} E \frac{df_0}{du} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = 4\pi e \int_{-\infty}^{\infty} f du + 4\pi\rho; \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v_0 \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{e}{m} E; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} + v_0 \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

где f — отклонение функции распределения электронов плазмы от равновесной функции f_0 ; u — проекция скорости электронов плазмы на ось x , в направлении которой движутся электроны пучка; E — электрическое поле; ρ и v — отклонения плотности заряда пучка и скорости его частиц от равновесных значений ρ_0 и v_0 ; e и m имеют обычный смысл. Отклонения всех величин от равновесных значений предполагаются малыми по сравнению с самими равновесными значениями.

Решение системы (1)–(4) ищем в виде плоских волн вида $\text{const } e^{i(\omega t - kx)}$; если $|ka| \ll 1$, где $a = (\theta / 4\pi n_0 e^2)^{1/2}$ (θ — абсолютная температура, n_0 — плотность электронов плазмы), то связь между ω и k — так называемое дисперсионное уравнение — имеет вид

$$(\omega^2 - v_T^2 k^2) \left\{ 1 - \frac{\Omega^2}{\omega - v_0 k} \right\} = \omega_0^2 \quad (5)$$

где $\omega_0^2 = 4\pi e^2 n_0 / m$, $\Omega^2 = 4\pi e \rho_0 / m$, $v_T = (3\theta / m)^{1/2}$.

Если скорость пучка v_0 превосходит среднюю тепловую скорость частиц плазмы v_T , то соотношение (5), рассматриваемое как уравнение относительно k , при заданной частоте ω имеет комплексные корни. Это значит, что поле E , так же как и отклонение плотности пучка от равновесного значения ρ , имеют вид волн, амплитуда которых растет экспоненциально с x . Отсюда следует, что при движении пучка через плазму в последней возможно генерирование и усиление колебаний высокой частоты.

Максимальное значение модуля мнимой части k , как функции частоты ω , достигается при $\omega = \omega_0 / \sqrt{1 - (v_T / v_0)^2}$ и равняется

$$\Gamma_{\max} = \frac{3^{1/2}}{2^{1/2}} \frac{\omega_0}{v_T} \left(\frac{v_T}{v_0} \right)^{1/2} \left(\frac{v_0^2}{v_T^2} - 1 \right)^{1/2} \left(\frac{\Omega}{\omega_0} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Эта величина достигает, в свою очередь, максимума при $v_0 = \sqrt{2} v_T$, что соответствует максимально усиливаемой частоте, равной $\sqrt{2} \omega_0$.

Остановимся на вопросе о генерировании микрорадиоволн с помощью электронной плазмы. Обычно делается вывод⁽³⁾ о невозможности генерирования сверхвысоких частот с помощью плазмы на том основании, что период колебаний плазмы $T \sim n_0^{1/2}$ (n_0 — плотность электронов плазмы), а время между двумя соударениями $\tau \sim n_0^{-1}$; поэтому при увеличении n_0 , необходимом для получения микрорадиоволн, сильно возрастает роль соударений электронов с положительными ионами, которые выводят электроны из процесса колебаний.

Мы хотели бы здесь подчеркнуть, что эти соображения, строго говоря, не применимы к тому случаю, когда возбуждение колебаний плазмы производится пучком заряженных электронов, так как в этом случае генерируемая частота определяется, помимо плотности электронов плазмы, также отношением скоростей v_0 и v_T .

В заключение заметим, что при прохождении немодулированного пучка заряженных частиц через волновод, заполненный диэлектриком, или через цепочку связанных эндовибраторов также возникают при определенных условиях нарастающие волны поля и плотности заряда пучка, имеющие такой же характер, как и в случае плазмы. Во всех этих случаях получается дисперсионное уравнение вида (5); в случае волновода роль тепловой скорости v_T играет фазовая скорость распространения электромагнитных волн в неограниченном диэлектрике, и условие неустойчивости пучка и создания в нем распространяющихся „сгустков“ заряда совпадает с условием возможности излучения Черенкова при движении в диэлектрике отдельного заряда, скорость которого равна v_0 .

Физико-технический институт
Академии наук УССР
Харьков

Поступило
20 VIII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Власов, ЖЭТФ, 8, 291 (1938). ² Л. Ландау, ЖЭТФ, 18, 574 (1946).
³ Р. Ромпе и М. Штеенбек, Усп. физ. наук, в. 3, 310 (1941).