

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Коллективные методы ускорения заряженных частиц привлекают ученых в течение многих десятилетий [1—2]. Коллективное ускорение ионов впервые успешно продемонстрировано в Сухумском физико-техническом университете А.Д. Плотно с сотрудниками в 60-х годах. Характерная особенность этих экспериментов — вывод электронного пучка и ионного потока из заполненного плазмой объема, к которому прикладывалось относительно низкое напряжение. Хотя коллективный характер процесса ускорения был признан, однако каких-либо развитых теорий процесса не создано. Дальнейшие экспериментальные исследования коллективных методов ускорения привели к следующим основным результатам: энергия ионов пропорциональна их заряду; энергия ионов слабо зависит от давления газа; длительность ионного импульса на порядок меньше длительности электронного импульса; импульс ионов движется синхронно с импульсом электронного пучка, при этом возрастает энергия ускорительных ионов; интенсивность импульса ионов для тяжелых элементов существенно меньше, чем для водорода.

В настоящее время проведены эксперименты и теоретические работы [3—4] по выяснению модели коллективного процесса ускорения ионов при инъекции сильноточных релятивистских электронных пучков в нейтральный газ. Нами исследован процесс генерации ускоренных ионов в результате развития электрон-ионной волны плотности объемного заряда. Данная волна образуется на нелинейной стадии двухпоточковой неустойчивости, а затем происходит ускорение захваченных ионов при увеличении фазовой скорости волны и росте дрейфовой скорости электронного пучка. Рассмотрим возможность захвата ионов на линейной стадии двухпоточковой электрон-ионной неустойчивости с максимальным инкрементом

$$\delta = 2^{-4/3} \sqrt{3} (\omega_i^2 \omega_e)^{1/3}, \quad (1)$$

которой обладают возмущения с волновым числом $k_0 = \frac{\omega_e}{\omega_{0e}}$. Здесь

$$\omega_{\alpha} = \left(\frac{4\pi n_{\alpha} z_{\alpha}^2 e^2}{\gamma_{\alpha}^3 m_{\alpha}} \right)^{1/2},$$

$$\gamma_{\alpha} = \left(1 - \frac{V_{0\alpha}^2}{c^2} \right)^{1/2};$$
(2)

где

c — скорость света; $n_{\alpha}, V_{0\alpha}, m_{\alpha}, z_{\alpha}$ — плотность, скорость, ионная масса, зарядовое число электронов ($\alpha = e$) или ионов ($\alpha = i$). Реальная часть частоты колебаний для этих возмущений

$$\omega_0 = k_0 V_{0i} + 2^{-4/3} (\gamma_e^2 - 1)^{1/2} \left(\frac{n_i z_i^2 m_e}{n_e m_i} \right)^{1/3} c.$$
(3)

В случае прохождения волны со скоростью V_{Φ} и амплитудой поля E условия захвата нерелятивистских ионов можно приближенно записать в виде [5]

$$\frac{m_i (V_{\Phi} - V_{0i})^2}{2z_i} \leq \frac{eE}{k_0} \leq (\gamma - 1) m_e c^2.$$
(4)

После подстановки в левую часть уравнения (4) выражения (3) получим

$$z_i^{2/3} \left(\frac{n_i}{n_e} \right)^{2/3} \leq z_i^{1/3} \left(\frac{m_e}{m_i} \right) (\gamma_e + 1)^{-1}.$$
(5)

Следовательно, захват ионов возможен только в случае использован частично скомпенсированного электронного пучка.

Если в (5) имеет место неравенство, то захват ионов может быть представлен одномерной моделью, в которой электронный пучок описывается линеаризованными гидродинамическими уравнениями, а ионы — уравнениями движения, электрическое поле волны определяется уравнением Пуассона.

Электронный пучок можно описывать уравнением непрерывности, уравнением движения и уравнением Пуассона. Следовательно, система уравнений будет иметь вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho V = 0;$$
(6)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)\vec{V} = \frac{e}{m}\vec{E}; \quad (7)$$

$$\operatorname{div}E = 4\pi\rho, \quad (8)$$

где $\rho = ne$.

Будем считать, что все параметры пучка на малую величину отличаются от равновесного значения:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 + \tilde{\rho}; \\ \vec{V} &= \vec{V}_0 + \tilde{\vec{V}}; \\ \vec{E} &= \vec{E}_0 + \tilde{\vec{E}}. \end{aligned} \quad (9)$$

где $\rho_0, \vec{V}_0, \vec{E}_0$ — равновесные значения пространственного заряда, скорости и электрического поля соответственно.

Линеаризованные гидродинамические уравнения для одномерного случая записываются так:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial V}{\partial z} + V_0 \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial V}{\partial t} + V_0 \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{e}{m} E; \\ \frac{\partial E}{\partial z} = 4\pi\rho. \end{cases}$$

Система уравнений описывает электронный пучок. Поле волны ищем в виде

$$E(t, z) = E(t) \sin[k_0 z + \varphi(t)].$$

Полученные выражения необходимо дополнить уравнением движения ионов, которые в поле волны можно записать как

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = \frac{z_i e}{m_i} E.$$

Предложенные уравнения представляют собой одномерную модель, которая описывает захват ионов. При этом предполагается, что постоянное электрическое поле скомпенсировано неподвижными ионами.

Данная система уравнений решалась методом крупных частиц, с использованием численного метода Эйлера. При возникновении мало-

го возмущения поле будет взаимодействовать с ионами, приводя их в движение. Координаты ионов изменятся, что вызовет изменение плотности пространственного заряда, а следовательно, система станет неустойчивой и возмущение электрического поля будет нарастать. Нелинейное ограничение амплитуды поля связано с захватом ионов в потенциальные ямы, образующиеся в результате нарастания неустойчивости, которое приведет к процессам нелинейного насыщения амплитуды и захвата ионов при двухпотоковой неустойчивости частично скомпенсированного электронного пучка.

В результате проведенного траекторного анализа 40 частиц был зафиксирован захват волной большой амплитуды около 80 % ионов. Скорость захваченных ионов примерно равнялась V_{ϕ} волны, определяемой (3), а их энергия была меньше энергии электронного пучка. Кроме того, выявилось, что захват ионов волной плотности заряда приводит к существенному насыщению неустойчивости.

Рассмотренный механизм коллективного ускорения ионов позволяет объяснить некоторые эффекты, наблюдающиеся при инъекции сильноточных пучков релятивистских электронов в нейтральный газ.

В частности, энергия ионов $W_i \approx V_{\phi}^2$ исходя из (3) должна быть пропорциональна $(\gamma^2 - 1)n_e^{2/3}$, что согласуется с результатами эксперимента [6].

Список литературы: 1. *Миллер Р.* Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 255 с. 2. *Абрамян Е.А., Альтеркоп Б.А., Кулешов Г.Д.* Интенсивные электронные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984. 280 с. 3. *Виноградов С.В., Никулин М.Г., Розанов Н.Е.* Коллективное ускорение ионов при бунемановской неустойчивости сильноточных электронных пучков, инжектируемых в нейтральный газ низкого давления // ЖТФ. 1986. Т. 56, вып. 3. С. 163—169. 4. *Александр Н.Ф., Хантре Е., Зимрот П.* Простая модель ускорения ионов сильноточным релятивистским электронным пучком // ЖЭТФ. 1974. Т. 141, вып. 1. С. 181—226. 5. *Виноградов С.В., Никулин М.Г., Розанов Н.Е.* О захвате и ускорении ионов при бунемановской неустойчивости нескомпенсированного пучка // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 10, № 3. С. 168—172. 6. *Незлин М.В.* Динамика пучков в плазме. М.: Энергия, 1979. 408 с.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редакцию 03.11.97