

[8] П у х В.П. Прочность и разрушение стекла. Л.: Наука, 1973, 155 с.

[9] M a t t h e w s o n M.J., K u r k j i a n C.R., G u l a t i S.T. - J. Am. Ceram. Soc., 1986, v. 69, p. 815-821.

Институт общей
физики АН СССР,
Москва

Поступило в Редакцию
6 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9

12 мая 1988 г.

ПРОБЛЕМА НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАЗМЫ В УСКОРИТЕЛЕ НА БИЕНИЯХ

Л.М. Г о р б у н о в, Р.Р. Р а м а з а ш в и л и

В ускорителе на биениях быстрая ленгмюровская волна возбуждается в плазме двумя параллельными лазерными пучками с различными частотами [1]. Амплитуда возбуждаемой волны, определяющая темп ускорения, максимальна при выполнении резонансного условия, связывающего разность частот лазеров с плазменной частотой. Именно в этом случае размеры ускорителя на биениях, конкурентноспособного по отношению к имеющимся сейчас ускорителям, могут составлять от нескольких метров до нескольких десятков метров.

Неоднородность плазмы приводит к непостоянству плазменной частоты. Из-за этого резонансное условие выполняется только в определенных точках плазмы, при удалении от которых амплитуда ленгмюровской волны уменьшается, и темп ускорения снижается. Однако для ускорения еще более существенным является возникающее из-за неоднородности плазмы изменение фазы ленгмюровской волны в окрестности резонансной точки. Как показано ниже, даже небольшое изменение плотности плазмы может настолько изменить фазу волны, что частица в результате из ускоряющей фазы попадает в фазу торможения.

Чтобы проиллюстрировать сказанное выше и получить количественные оценки, рассмотрим возбуждение ленгмюровской волны двумя высокочастотными электромагнитными волнами с амплитудами E_i ($i = 1, 2$), частотами ω_i и волновыми векторами k_i . Пондеромоторная сила, действующая на электроны плазмы, равна [2]:

$$f = -\frac{kmc^2}{2} \alpha_1 \alpha_2 \sin(\omega t - kx - \varphi), \quad (1)$$

где $k = k_1 - k_2$, $\omega = \omega_1 - \omega_2$, $\alpha_i = eE_i / mc\omega_i$, φ - начальная фаза. Под действием силы (1) в плазме возникает поле разделения

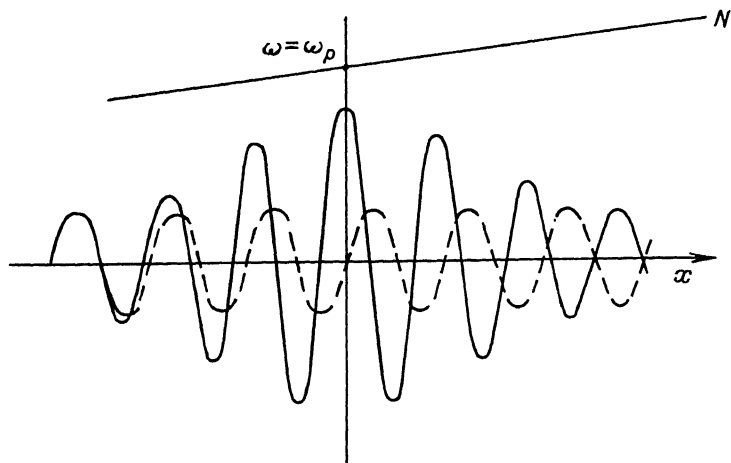


Рис. 1.

зарядов с напряженностью E . Уравнение для поля в линейном приближении и в пренебрежении тепловым движением частиц [3, 4] имеет решение

$$E = -\frac{km c^2}{2e} \alpha_1 \alpha_2 A(x) \sin(\omega t - kx - \varphi - \Phi(x)), \quad (2)$$

где $\omega_p = (4\pi e^2 N(x)/m)^{1/2}$ — плазменная частота, $N(x)$ — концентрация электронов, ν — частота столкновений электронов.

$$A(x) = \frac{\omega_p^2(x)}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_p^2(x))^2 + \nu^2 \omega^2}}, \quad \operatorname{tg} \Phi(x) = \frac{\omega \nu}{\omega^2 - \omega_p^2(x)}. \quad (3)$$

Формулы (3) аналогичны известным в механике [5] выражениям для амплитуды и фазы вынужденных колебаний линейного осциллятора.

На рис. 1 показано изменение в пространстве ponderomotive силы (1) (пунктир) и поля ленгмюровской волны (2) (сплошная линия) для некоторого момента времени при линейном законе изменения плотности плазмы.

В однородной плазме ленгмюровская волна ускоряет частицы, инжектируемые со скоростью (ω/k) в направлении ее распространения и попавшие в ускоряющую фазу, где направления действия силы и движения частицы совпадают. Набирая энергию, частица смещается относительно волны и постоянно выходит из ускоряющей фазы. Это ограничивает размер ускорителя и максимальную энергию частицы.

Неоднородность плазмы в зависимости от величины и масштаба изменения концентрации может привести к различным результатам.

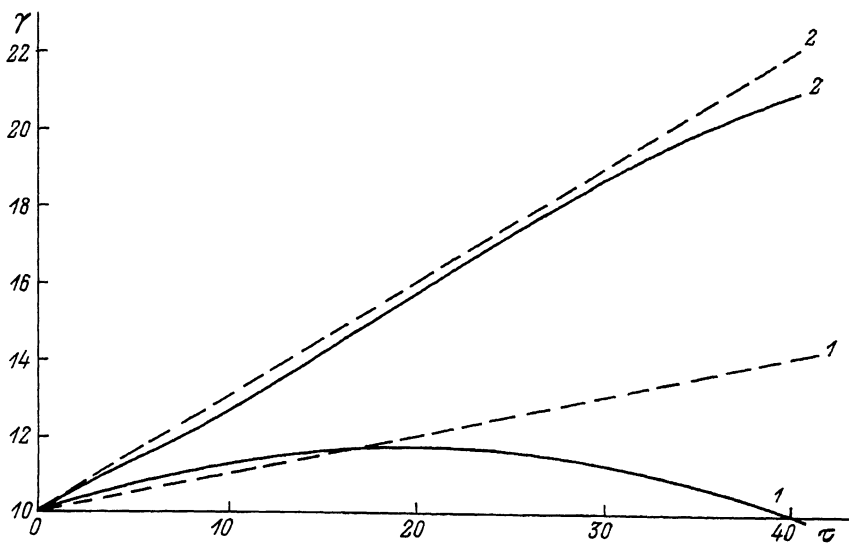


Рис. 2.

Если вариации плотности $\Delta N(x)$ происходят на малых размерах по сравнению с длиной ускорения, то расфазировка между волной и частицей связана в основном с зависимостью от координат фазы ленгмювской волны. При $(\Delta N / N_0) > (\gamma / \omega)$ ($N_0 = m\omega^2 / 4\pi e^2$ — резонансная концентрация) фаза (3) изменяется на величину, близкую к π , и после прохождения одной резонансной точки практически все ускоряемые частицы попадут в фазу торможения. При большом числе резонансных точек (флуктуации плотности) смена процессов ускорения и торможения может происходить многократно, и представление о регулярном ускорении частицы потеряет смысл. Для постоянства фазы (3) и регулярного ускорения частицы требуется, чтобы вариации концентрации были достаточно малы: $(\Delta N / N_0) < (\gamma / \omega)$.

В ускорителях на биениях амплитуда ленгмювской волны обычно определяется не диссипацией, а релятивистским увеличением массы электронов и равна [6] $E = \frac{m\omega c}{e} \left(\frac{16}{3} \alpha_1 \alpha_2\right)^{1/3}$. Сопоставляя это выражение с резонансной амплитудой в формуле (2), найдем соответствующую эффективную частоту столкновений и запишем условие регулярного ускорения частицы:

$$\frac{\Delta N}{N_0} < 0.25 (\alpha_1 \alpha_2)^{2/3}. \quad (4)$$

Для $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.1$ отсюда следует $(\Delta N / N_0) < 10^{-2}$. Ограничение (4) для допустимых вариаций плотности является более жестким, чем приведенное в докладе [2] на основании качественных соображений о постоянстве амплитуды ленгмювской волны.

В качестве иллюстрации на рис. 2 показано изменение со временем $\tau = \omega t$ энергии электрона $\mathcal{E} = \mathcal{E} / mc^2$ в поле ленгмюровской волны (2), распространяющейся в слабонеоднородной плазме с линейным законом изменения концентрации $N = N_0(1 + x/L)$. В стартовой точке скорость электрона равна ω/k ($\mathcal{E} = 10$) и концентрация на 2% меньше резонансной ($(\Delta N / N_0) = 0.02$). В момент времени $\tau = 20$ электрон проходит резонансную точку ($kL = 10^3$, $v/\omega = 3 \cdot 10^{-2}$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 10^{-2}$). Кривым 1 и 2 соответствуют начальные фазы $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ и $\varphi = -\pi$. Видно, что при начальной фазе $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ малого изменения фазы $\Phi \sim 0.2$ достаточно для того, чтобы электрон перешел из фазы ускорения в фазу торможения. Для $\varphi = -\pi$ изменение Φ практически не влияет на ускорение электрона. Для сравнения пунктиром показано изменение энергии электрона в однородной плазме с концентрацией, отличающейся на 1% от резонансной.

Крупномасштабные неоднородности плазмы (в отличие от мелко-масштабных) могут сыграть положительную роль, позволяя увеличить энергию частиц. Для этого нужно, чтобы изменение концентрации на величину $(\Delta N / N_0) \approx (\alpha_1 \alpha_2)^{2/3}$ и связанное с этим изменение фазы ленгмюровской волны компенсировало ту расфазировку, которая возникает из-за изменения энергии частицы. В результате фаза частицы относительно волны будет постоянна и ускорение может оказаться более эффективным.

Л и т е р а т у р а

- [1] T a j m a T., D a w s o n J.M. - Phys. Rev. Lett., 1979, v. 43, N 4, p. 267-270.
- [2] K a t s o u l e a s T., J o s h i C., D a w s o n J.M., C h e n F.F., C l a y t o n C.E., M o r i W.B., D a r r o w C., U m s t a d t e r D. In Laser Acceleration of Particles, A.I.P. Conf. Proc., N 130, ed by C.Joshi and T.Katsouleas (American Institute of Physics, New York, 1985), p. 63-98.
- [3] Л и т в а к А.Г. - Радиофизика, 1964, т. 7, № 3, с. 562-564.
- [4] F e d e l e R., d e A n g e l e s U., K a t s o u l e a s T. - Phys. Rev., 1986, v. A33, N 6, p. 4412-4414.
- [5] Л а н д а у Л.Д., Л и ф ш и ц Е.М. Механика, М.: Наука, 1973, 208 с.
- [6] R o s e n b l u t h M.N., L i u C.S. - Phys. Rev. Lett., 1972, v. 29, N 11, p. 701-705.

Физический институт
им. П.Н. Лебедева АН СССР,
Москва

Поступило в Редакцию
11 декабря 1987 г.