

- [2] Suzuki M., Fujii T., Mori K., Muta K., Watari T. // Jap. J. Appl. Phys. 1988. V. 27. N 10. P. 2003-2004.
- [3] Curvitch M., Valles J.M., Cuccolo Jr. A.M., Dynes R.C., Garno J.P., Schneemeyer L.F. // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 63. N 9. P. 1008-1011.
- [4] Jin J., Davis T.H., Tietel R.B., Van Dover R.C., Sherwood R.C., O'Bryan H.M., Kammbt G.W., Fastnacht R.A. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. N 25. P. 2605-2607.
- [5] Akoh H., Kasahara T., Yamano K., Takada S. Tokyo: ISEC - 89. P. 525-528.
- [6] Wiesck A.D. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. N 13. P. 1216-1218.
- [7] Венгалис Б., Вапацка К., Шикторов Н., Юкна А. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 7. С. 1999-2002.

Институт физики полупроводников
АН Литвы

Поступило в Редакцию
1 ноября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 8

26 апреля 1991 г.

01;04

© 1991

О СЕРФИНГЕ ЗАРЯДОВ НА ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЕ В ПЛАЗМЕ БЕЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова,
Л.А. Михайловская

Ранее [1] было показано, что в релятивистской теории возможно неограниченное ускорение заряженных частиц, захваченных продольной волной, которая распространяется в однородной плазме поперек внешнего магнитного поля H_0 с фазовой скоростью $v_\phi \equiv c\beta_\phi < c$. Для реализации этого эффекта необходимо, чтобы амплитуда электрического поля продольной волны E_0 превышала пороговое значение $E_{th} = \gamma_\omega H_0$ (где $\gamma_\omega = 1/(1-\beta_\phi^2)^{1/2}$, соответствующее возникновению вечного удержания захваченных частиц в потенциальной яме, создаваемой ускоряющей волной. Для поперечной волны, распространяющейся с $\beta_\phi < 1$ в газе, находящемся в магнитном поле, неограниченное ускорение было рас-

смотрено в [2]. Создалось впечатление, что этот эффект обусловлен присутствием внешнего магнитного поля. Ранее (например, в работе [3]) отмечалась возможность увлечения зарядов продольной волной с переменной фазовой скоростью. Ситуация нетривиальна в том, что априори неизвестны условия вечного удержания зарядов в ускоряющей фазе поля волны. В настоящей работе доказывается возможность вечного удержания и неограниченного ускорения захваченных частиц незатухающей продольной волной со степенными профилями $\gamma_{\varphi}(x)$ в плазме без магнитного поля, когда динамика ускорения частиц описывается некоторыми автономными функциями. Причем оказывается, что в зависимости от показателя степени n ($\gamma_{\varphi} = \gamma_* \xi^n$, $\xi = x/L$) при ускорении происходит либо конденсация захваченных частиц на дно потенциальной ямы, где темп ускорения стремится к нулю, либо возможен режим прилипания ускоряемых частиц в любой ускоряющей фазе поля ленгмюровской волны ($n > 2/3$). В режиме конденсации рост энергии захваченных частиц пропорционален t^n , а при ускорении в режиме прилипания релятивистский фактор зарядов возрастает линейно с течением времени. Выяснилось также, что в асимптотике ($t \rightarrow \infty$) для $n \leq 2/3$ всегда имеется баланс между силой инерции и электрической силой. Кроме того, на достаточно больших временах для всех $n > 0$ фаза волны на траектории захваченной частицы меняется в основном монотонно. Таким образом, описание динамики ускорения в рамках ВКБ-приближения оказывается некорректным. Привлекательной чертой исследуемого здесь механизма ускорения является то, что заряды ускоряются не вдоль, а поперек волнового фронта. В результате существенно снижаются требования к энергетике волнового поля. Амплитуда волны может быть весьма мала ($qE_0/m_0c\omega \ll 1$), что особенно важно при ускорении частиц в астрофизических условиях.

Рассмотрим черенковское взаимодействие заряженной частицы с продольной волной в слабонеоднородной плазме

$$E_x = E_0 \sin \theta, \quad \theta = \theta_0 + \omega t - \int_0^x k(x) dx,$$

распространяющейся в плавнеоднородной плазме в сторону роста фазовой скорости. Будем полагать, что релятивистский фактор γ_{φ} неограниченно возрастает при $x \rightarrow \infty$ с характерной длиной неоднородности L и $\rho = (\omega L/c) \gg 1$. Согласно [4, 5], при релятивистских энергиях захваченных частиц для θ и γ имеем следующие уравнения:

$$d\gamma/d\tau = \alpha \sin \theta, \quad 2d\theta/d\tau = \gamma^{-2} - \gamma_{\varphi}^{-2}(x/L), \quad (1)$$

где $\tau = \omega t$, $\alpha = qE_0/m_0c\omega$ и можно полагать $x \cong ct$. Без ущерба для принципиальной стороны вопроса при анализе (1) можно использовать степенные асимптотики γ_{φ} , т.е. $\gamma_{\varphi} = \gamma_*(\tau/\rho)^n$ с $n > 0$. Рассмотрим два наиболее простых варианта. Пусть $n > 1$. Тогда из (1) получаем

$$\gamma/\gamma_0 = (1 + 2\alpha\gamma_0(\cos\theta - \cos\theta_0))^{-1}, \quad 0 < \theta_0 < \pi. \quad (2)$$

Из (2) следует, что при выполнении условия $1 < 2\alpha\gamma_0(1 + \cos\theta_0)$ имеет место неограниченное ускорение захваченной частицы. К точке поворота θ_∞

$$\cos\theta_\infty = \cos\theta_0 - (1/2\alpha\gamma_0).$$

частица приближается асимптотически

$$\theta(\tau) = \theta_\infty - (2\alpha\gamma(\tau)\sin\theta_\infty)^{-1},$$

а ее энергия возрастает по линейному закону

$$\gamma(\tau) \cong \gamma_0 + \alpha(\tau - \tau_0)\sin\theta_\infty.$$

Здесь необходимо отметить, что в асимптотике фаза волны на траектории захваченной частицы меняется монотонно, т.е. отсутствуют фазовые колебания ускоряемых частиц. Это обстоятельство связано с тем, что для $n > 1$ градиент фазовой скорости волны достаточно мал, а в точке поворота скорость частицы должна совпадать со скоростью света, т.е. $\gamma \rightarrow \infty$. В альтернативном случае $n < 2/3$ все захваченные частицы конденсируются на дне потенциальной ямы, т.е. $\theta_\infty = 0$. С учетом этого обстоятельства, сделав замены

$$\gamma(\tau) = \gamma_{\text{ф}}(\tau)W(y), \quad y = \sigma^{-1}(\tau/\rho)^\sigma, \quad \sigma = (1 - 1.5n) > 0,$$

из (1) для автомодельной функции W получаем следующее уравнение:

$$d^2W/dy^2 + (\alpha/y)dW/dy - (bW/y^2) + \mu - \mu_1/W^2 = 0, \quad (2)$$

где $\alpha = n/2\sigma$, $b = n(1-n)/\sigma^2$, $\mu = (\alpha\rho^2/2\gamma_*^3) \gg 1$.

Уравнение (2) описывает движение нелинейного осциллятора с положительным трением в слабонестационарной потенциальной яме

$$U(W, y) = \mu(W + W^{-1}) - (bW^2/2y^2).$$

Энергия осциллятора $\mathcal{E} = 0.5W_y^2 + U(W, y)$ с течением времени уменьшается, а $W(y)$, осциллируя, стремится в точку равновесия $W_\infty = 1$. Действие (адиабатинвариант) $J = \oint W_y dW$ убывает по степенному закону $J \sim (1/y)^\alpha$ при $y \rightarrow \infty$. Для всех $n > 0$ численные расчеты и более сложный аналитический анализ подтверждают захват, вечное удержание и неограниченное ускорение зарядов незатухающей продольной волной, если параметр слабой неоднородности плазмы ρ достаточно большой.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.Д. Шафранову, А.А. Галееву и С.С. Моисееву за полезное обсуждение.

- [1] K a t s o u l e a s T., D a w s o n J.M. // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 51. P. 392-395.
- [2] Нагорский Г.А., Орлов Ю.Ф. // ЖЭТФ. 1973. Т. 64. В. 3. С. 761-767.
- [3] Файнберг Я.Б. // Физика плазмы. 1987. Т. 13. В. 3. С. 607-612.
- [4] Ерохин Н.С., Комилов К., Хакимов Ф.Х., Хачатрян А.Г. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. В. 11. С. 1290-1296.
- [5] Ерохин Н.С., Моисеев С.С., Сагдеев Р.З. // Письма в Астрономический журнал. 1989. Т. 15. С. 3-10.

Институт космических исследований
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
27 марта 1991 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 8

26 апреля 1991 г.

05.2; 07

© 1991

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВОГО СИНХРОНИЗМА В КРИСТАЛЛЕ
ВВО С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА
НА САПФИРЕ С ТИТАНОМ

В.Н. Лопатко, Ю.С. Осепедчик,
А.И. Писаревский, А.Л. Просвирнин,
Т.Н. Тимошенко, Е.Ф. Титков,
В.А. Шишенок

Кристалл ВВО - β - VaB_2O_4 , являющийся одним из новых высокоэффективных нелинейно-оптических материалов, впервые был синтезирован авторами [1, 2]. В СССР о получении кристаллов ВВО в виде пластинок толщиной 1-2 мм сообщалось в работе [3]. Характерными особенностями данного материала являются высокая лучевая стойкость (в 2-3 раза выше, чем у KDP), большой нелинейно-оптический коэффициент (в 4-6 раз выше, чем у ADP [4]), а также широкий температурный синхронизм ($\Delta T = 55^\circ C$ [5]), который можно реализовать почти во всем диапазоне прозрачности от 190 до 3500 нм [6]. Малая расстройка групповой скорости света в кристалле ВВО делает его привлекательным для преобразования излучения с импульсами фемтосекундной длительности во вторую гармонику [7].