

ДИАГНОСТИКА КИЛЬВАТЕРНЫХ ПОЛЕЙ В ПЛАЗМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОНДИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН

© Я.Б.Файнберг, В.А.Балакирев, А.К.Березин, В.И.Карась,
В.А.Киселев, И.Н.Онищенко, А.И.Толстолужский

1. Измерение высокочастотных электрических колебаний в плазме является актуальной проблемой при генерации мощного излучения и новых методов ускорения заряженных частиц. Например, интенсивные продольные высокочастотные поля возбуждаются в плазме при прохождении интенсивных лазерных импульсов и релятивистских электронных сгустков. Такие поля могут быть использованы для ускорения заряженных частиц [1]. Для успешной экспериментальной реализации проблемы ускорения заряженных частиц в плазме необходима разработка простых и надежных методов измерения напряженности электрических полей в плазме. В данной работе предложен такой метод, основанный на использовании зондирующего электронного пучка и системы микроканальных пластин [2]. Эта диагностика является альтернативной известной методике исследований кильватерных полей с использованием стрик-камеры [3]. В качестве примера мы рассмотрим использование предлагаемого метода для измерения кильватерных полей, возбуждаемых релятивистским электронным сгустком.

2. В предлагаемом методе нерелятивистский зондирующий электронный пучок инжектируется перпендикулярно направлению движения релятивистского сгустка (продольной оси z) на некотором расстоянии от оси (прицельном параметре). По величине отклонения частиц пучка на заданном расстоянии L (базе) определяется напряженность электрического поля. Для простоты будем пренебрегать поперечными размерами зондирующего пучка, считая его бесконечно тонким. Поскольку инжекция осуществляется непрерывно, в периодическое высокочастотное поле с компонентами E_z , E_r , то на плоскости $x = L$ (ось x направлена вдоль направления инжекции зондирующего пучка) тонкий зондирующий пучок изобразит замкнутую кривую.

Динамика частиц зондирующего пучка в кильватерном осесимметричном поле описывается уравнениями движе-

ния, записанными в безразмерной форме в декартовой системе координат:

$$U_x \frac{dU_x}{dX} = -\varepsilon \frac{X}{\eta} \Pi_{\perp}(\eta) \sin \tau, \quad U_x \frac{dU_y}{dX} = -\varepsilon \frac{Y}{\eta} \Pi_{\perp}(\eta) \sin \tau,$$

$$U_x \frac{dU_z}{dX} = -\varepsilon \Pi_{\parallel}(\eta) \cos \tau,$$

$$\frac{d\tau}{dX} = \frac{1}{\beta_0 U_x} (1 - \beta_0 U_z), \quad \frac{dY}{dX} = \frac{U_y}{U_x}, \quad (1)$$

где $\mathbf{U} = \mathbf{V}/V_0$ — безразмерная скорость, V_0 начальная скорость зондирующего пучка, $(X, Y, Z) = (\omega_p/c)(x, y, z)$ безразмерные декартовы координаты, $\beta_0 = V_0/c$, c — скорость света,

$$\Pi_{\parallel}(\eta) = K_0(\eta) \int_0^{\eta} I_0(\eta_0) e^{(-\eta_0^2/\eta_b^2)} \eta_0 d\eta_0 +$$

$$+ I_0(\eta) \int_{\eta}^{\infty} K_0(\eta_0) e^{(-\eta_0^2/\eta_b^2)} \eta_0 d\eta_0,$$

$$\Pi_{\perp}(\eta) = -\partial \Pi_{\parallel} / \partial \eta,$$

$$Z_{\parallel}(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} e^{(-\tau_0^2/\tau_b^2)} \cos(\tau - \tau_0) d\tau_0,$$

$$Z_{\perp}(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} e^{(-\tau_0^2/\tau_b^2)} \sin(\tau - \tau_0) d\tau_0, \quad (2)$$

$\eta = \omega_p r/c$, $\eta_b = \omega_p \sigma_r/c$, σ_r — поперечный размер сгустка, ω_p — плазменная частота, $\tau = \omega_p(t - z/c)$, $\varepsilon = \frac{4\sqrt{\pi} I_0 \tau_b}{\beta_0^2 \eta_b^2 I_A} e^{-\tau_b^2/4}$ — безразмерная амплитуда кильватерного поля, $I_A = mc^3/e = 17kA$, $\tau_b = \omega_p t_b$, t_b — длительность сгустка, I_0 — пиковый ток. Продольная компонента электромагнитного поля E_z описывается функцией $\Pi_{\parallel}(\eta)$, а поперечные компоненты E_r и H_{φ} — функцией $\Pi_{\perp}(\eta)$.

Из этих зависимостей следует, что функция $\Pi_{\parallel}(\eta)$ монотонно убывает, а функция $\Pi_{\perp}(\eta)$ имеет максимум в области $\eta \sim \eta_b$. В случае тонких сгустков $\eta_b \ll 1$ поперечная компонента электрического поля превосходит продольную.

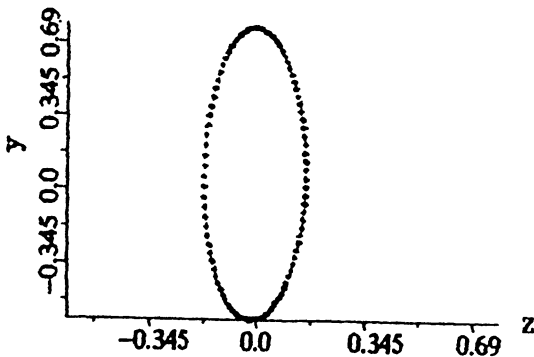


Рис. 1. График сечения плоскости y, z зондирующим пучком при $x = 11$ см, прицельный параметр $y_0 = 0.07$ см.

Сгустки с большими поперечными размерами $\eta \geq 1$ возбуждают преимущественно продольную компоненту электрического поля.

Система уравнений (1) была решена численными методами для следующих параметров плазмы, релятивистского сгустка и зондирующего пучка: плотность плазмы $n_p = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, частота $\omega_p = 2.5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$, поперечный и продольный размеры сгустка $\sigma_r = 0.07$ см, $\sigma_z = 0.7$ см, ток сгустка $I_0 = 12$ А, 24 А, 36 А, параметр $\varepsilon = 19.5, 39, 58.5$.

Расчеты проводились для 100 частиц, равномерно распределенных по фазе влета относительно кильватерной волны $2\pi > \tau_0 > 0$, τ_0 — начальное значение фазы.

На рис. 1 изображены точки пересечения траектории частиц зондирующего пучка плоскости $x = 11$ см. Начальное значение прицельного параметра было выбрано $y_0 = 0.07$ см, ток сгустка равен $I_0 = 12$ А. Из этого рисунка хорошо видно, что максимальное поперечное смещение частиц существенно превышает максимальное продольное смещение.

На рис. 2 изображена зависимость максимального смещения частиц y_{max} на расстоянии 11 см от прицельного параметра y_0 . Смещение максимально при значении прицельного параметра $y_0 = 0.089$ см. Максимальное поперечное смещение равно 7 мм. Этому значению соответствует максимум поперечной компоненты кильватерного поля $E_z = 2.51$ кВ/см.

Поскольку максимум кривой достаточно широкий, использование зондирующего пучка конечного поперечного размера несущественно влияет на точность измерения электрического поля.

При увеличении тока сгустка или числа сгустков в случае возбуждения кильватерных полей последовательностью

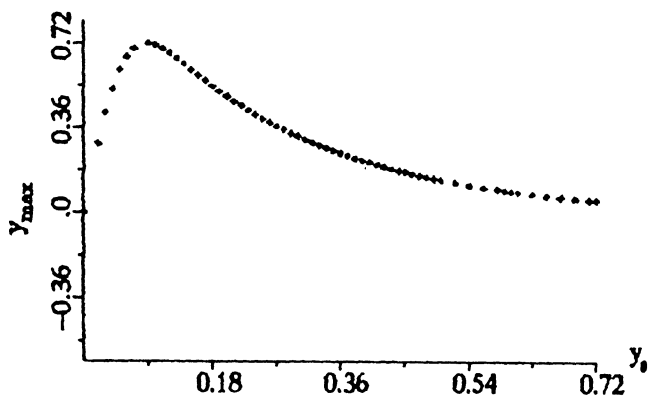


Рис. 2. Максимальное смещение y_{\max} как функция прицельного параметра y_0 при $x = 11$ см.

бунчей максимальное поперечное смещение увеличивается. Так, например, при токе одиночного сгустка 36 А или для цепочки из трех сгустков с током 12 А в каждом, поперечное смещение возрастает до 2.1 см.

3. Согласно приведенным выше расчетам была сконструирована аппаратура для измерения возбуждаемых кильватерных полей с предполагаемой напряженностью около 3 кВ/см с помощью зондирующего электронного пучка с энергией 10 кэВ, током 10–50 мА и диаметром 2 мм. На базе длиной $L = 11$ см регистрируется смещение пучка в 1 см. Такая геометрия может быть смоделирована, используя две отклоняющие пластины, запитываемые импульсным напряжением. Рассеяние зондирующего пучка в плазме за счет упругих соударений несущественно. В самом деле, длина свободного пробега электронов пучка данной энергии больше области взаимодействия $L \ll l_e = V_e \nu_e = 100$ см, ν_e — частота соударений.

В качестве системы, регистрирующей отклонение зондирующего пучка, использовался усилитель на микроканальных пластинах (МКП) [2]. Он состоит из трех прямоугольных пластин размером 20×30 мм и толщиной 1 мм, с отверстиями диаметром 15 мкм и шагом структуры (расстояние между отверстиями) 17.4 мкм. К плоскости токопереноса пластин приложено напряжение в 3 кВ. За третьей пластиной расположен коллектор. Сигнал с коллектора поступает на осциллограф через усилитель. Степень усиления равна $10^4 - 10^6$ в зависимости от числа электронов, попавших в каждое отверстие первой пластины. Усилитель вакуумно разделен, поскольку давление в камере усилителя не должно превосходить 10^{-6} Тор.

Перед первой пластиной усилителя установлен медный коллектор диаметром 10 мм, который регистрирует ток зондирующего пучка. Отклоненные возбуждаемым кильватерным полем электроны зондирующего пучка попадают на первую пластину и после усиления тока регистрируются главным коллектором. Используя секционированный коллектор измеряется величина смещения зондирующего пучка, из которого, согласно проведенным расчетам, может быть определена напряженность возбуждаемого кильватерного поля.

4. Предложена диагностика кильватерных полей в плазме с использованием зондирующего электронного пучка и микроканальных пластин для регистрации его тока. Аналитически и численно определена топография возбуждаемых кильватерных полей. Изучены траектории электронов зондирующего пучка в таких полях. Используя зондирующий пучок с энергией 10 кэВ и током 10–50 мА, разработана экспериментальная аппаратура, позволяющая измерять напряженность кильватерных полей в несколько кВ/см, возбуждаемых релятивистским сгустком с энергией 15 МэВ и током 12 А.

Работа частично поддержана Международным научным фондом, грант N U27200.

Список литературы

- [1] *Chen P., Dawson J.M., Huff R., Katsouleas T.* // *Phys. Rev. Lett.* 1985. V. 54. P. 692.
- [2] *Armentrout C.J.* // *Rev. Sci. Inst.* 1985. V. 5. P. 1179.
- [3] *Nakajima K., Enomoto A., Kobayashi N. et al.* // *Nucl. Inst. and Methods in Phys. Res.* 1990. A292. P. 12.

Харьковский
физико-технический институт

Поступило в Редакцию
25 июня 1996 г.