

10

## Энергоанализирующие свойства соленоида с винтовой магнитной осью

© А.Е. Дубинов, Н.В. Козлова

Саровский физико-технический институт

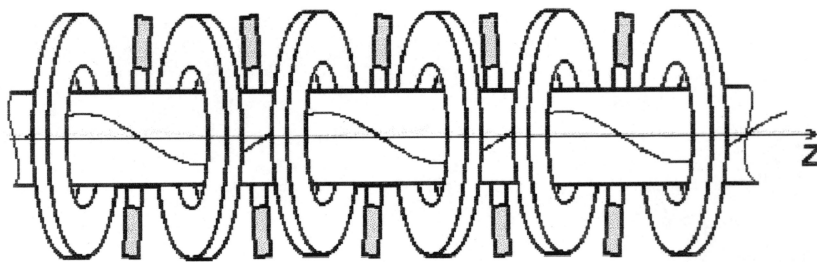
Поступило в Редакцию 31 марта 2000 г.

В одночастичном приближении проанализирована форма автографа пучка в энергоанализаторе электронов с винтовой магнитной осью. Установлено, что автограф имеет вид закручивающейся внутрь себя с ростом энергии плоской гладкой спирали, имеющей точки самокасания. Показано, что динамический диапазон измерения спектра пучка в энергоанализаторе на основе соленоида с винтовой магнитной осью существенно выше, чем в энергоанализаторе с тороидальным магнитным полем.

Магнитостатические энергоанализаторы [1,2] в настоящее время являются основным инструментом для исследования характеристик сильноточных пучков заряженных частиц. Наибольший интерес в этой связи представляют анализаторы, выполненные на основе соленоидов, сопрягающихся с магнитными системами ускорителей.

Так, например, в [3,4] описан электронный спектрометр в виде тороидального соленоида. Принцип измерения энергетического спектра электронного пучка в спектрометре такого типа заключается в следующем. Сначала из исследуемого электронного пучка с помощью толстой диафрагмы с отверстием небольшого диаметра вырезают анализируемую часть, а затем пропускают ее вдоль криволинейной оси соленоида. Известно, что в таком магнитном поле электроны вследствие дрейфа отклоняются от оси [5], причем величина этого отклонения зависит от величины продольной энергии электронов, влетающих в соленоид. Поместив на выходе из соленоида поперечную пластинку индикатора (например, фотопластинку), можно получить так называемый "автограф" пучка, каждая точка которого соответствует определенной энергии. Анализируя интенсивность почернения в разных точках автографа, можно определить энергетический спектр электронов.

Однако, как выяснилось, конфигурация магнитного поля в таком спектрометре была выбрана неудачно. Во-первых, соленоид с торо-



**Рис. 1.** Схема соленоида с винтовой магнитной осью.

идальным магнитным полем имеет достаточно узкий, ограниченный сверху и снизу, динамический диапазон измерений энергии. Причина этих ограничений заключается в специфическом характере движения заряженных частиц в таком магнитном поле, известном еще из анализа их движения в тороидальных термоядерных ловушках: ограничение снизу связано с существованием диапазона энергий, в которых частицы являются локально-запертыми, имеющими так называемые "банановые" траектории [5], а ограничение сверху становится существенным при превышении ларморовским диаметром радиуса обмотки тороидального соленоида. Действительно, приведенные в [3,4] энергетические спектры электронов в импульсных сильноточных ускорителях прямого действия демонстрируют отсутствие низкоэнергетичной компоненты, хотя простейший анализ работы таких ускорителей указывает на существенный вклад в спектр именно низкоэнергетичных электронов. Проще говоря, электроны малых энергий не долетают до фотопластинки, отражаясь магнитным полем, и электроны очень больших энергий также не долетают до фотопластинки, так как они ударяются в стенки камеры анализатора и поглощаются там.

Во-вторых, автограф, получаемый в тороидальном спектрометре на фотопластинке, имеет недифференцируемые особенности в виде точек возврата, анализ спектра вблизи которых затруднен.

Ниже изучается другая конфигурация соленоида энергоанализатора, в котором магнитная ось представляет собой винтовую линию (рис. 1). Ранее такой соленоид рассматривался в [6] как прототип термоядерной ловушки с криволинейной магнитной осью.

Пространственное распределение магнитного поля в таком соленоиде с винтовой магнитной осью радиусом  $r_0 = a/2$  приближенно можно представить в цилиндрических координатах в следующем виде [6]:

$$\begin{pmatrix} B_r \\ B_\varphi \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}\varepsilon B_0 \left(1 + \frac{3}{8}\varepsilon^2 \frac{r^2}{a^2}\right) \sin \theta \\ \frac{1}{2}\varepsilon B_0 \left(1 + \frac{1}{8}\varepsilon^2 \frac{r^2}{a^2}\right) \cos \theta \\ B_0 \left(1 - \varepsilon^2 \frac{r}{2a}\right) \cos \theta \end{pmatrix},$$

где  $\theta = \varphi - \alpha z$ ;  $\alpha = \varepsilon/a$ ;  $\varepsilon$ ,  $a$  и  $B_0$  — постоянные.

Расчет формы автографа пучка на фотопластинке можно рассчитать в одночастичном приближении. Уравнения движения релятивистского электрона можно записать в виде [7]:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} v_r \\ v_\varphi \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_r + \frac{v_\varphi^2}{r} \\ g_\varphi - \frac{v_r v_\varphi}{r} \\ g_z \end{pmatrix},$$

где

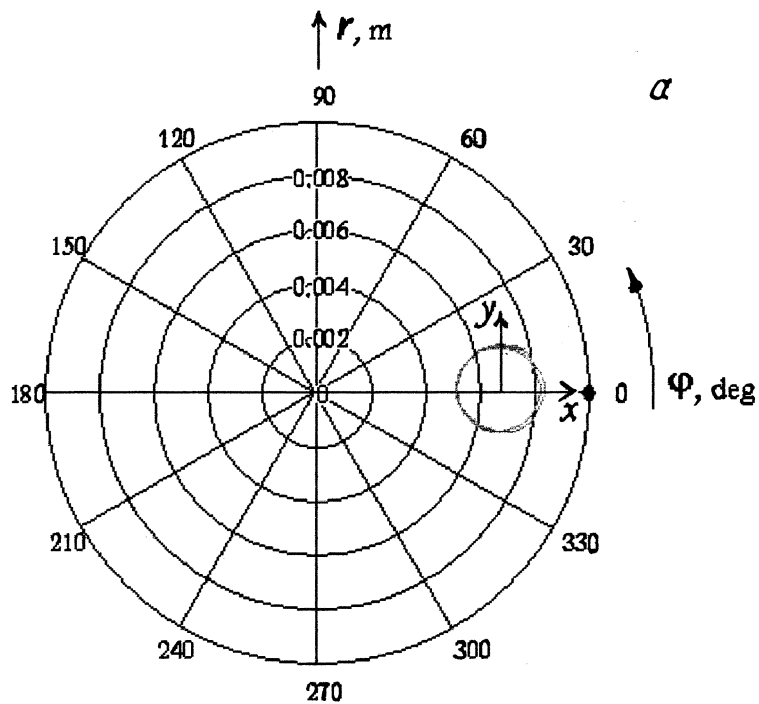
$$\begin{pmatrix} g_r \\ g_\varphi \\ g_z \end{pmatrix} = \eta \gamma^{-1} \begin{pmatrix} v_\varphi B_z - v_z B_\varphi \\ v_z B_r - v_r B_z \\ v_r B_\varphi - v_\varphi B_r \end{pmatrix},$$

где  $\eta = e/m$  — удельный заряд электрона,  $\gamma$  — лоренц-фактор, являющийся в данной задаче инвариантом.

Уравнения движения решались методом Рунге–Кутты, а контроль погрешности расчетов велся по точности выполнения закона сохранения полной энергии электрона ( $v_r^2 + v_\varphi^2 + v_z^2 = \text{const}$ ).

На рис. 2 представлен пример расчетного автографа пучка, инжектируемого в соленоид параллельно оси  $Oz$  для следующих параметров: магнитное поле  $B_0 = 0.1$  Т, величина  $\varepsilon = 0.1$ , длина пролетной базы электронов  $L = 0.3$  м, радиус винтовой линии магнитной оси  $r_0 = 0.1$  м.

Как оказалось, автографы пучка имеют вид закручивающейся внутрь себя с ростом энергии плоской гладкой спирали, не имеющей недифференцируемых особенностей, затрудняющих обработку. Однако имеется



**Рис. 2.** Пример автографа пучка: *a* — автограф пучка в полярных координатах, точка влета электронов с координатами  $r = 0.01$  м,  $\varphi = 0^\circ$  выделена черным кружком; *b* — увеличенное изображение автографа в локальных координатах ( $x, y$ ), точки соответствуют энергии  $100 \div 300$  keV с шагом 2 keV, точка, соответствующая энергии 100 keV, выделена светлым кружком.

точка самокасания кривой автографа (точка *A* на рис. 2, *b*), обработка энергетического спектра пучка вблизи которой затруднена. Легко видеть также, что динамический диапазон энергии не ограничен сверху (при  $\gamma \rightarrow \infty$  кривая рис. 2 стремится к центральной точке спирального автографа) и снизу (мы не обнаружили банановых траекторий даже при энергиях электронов 10 keV).

Итак, представленные расчеты продемонстрировали достоинства энергоанализатора с винтовой магнитной осью, имеющего более ши-

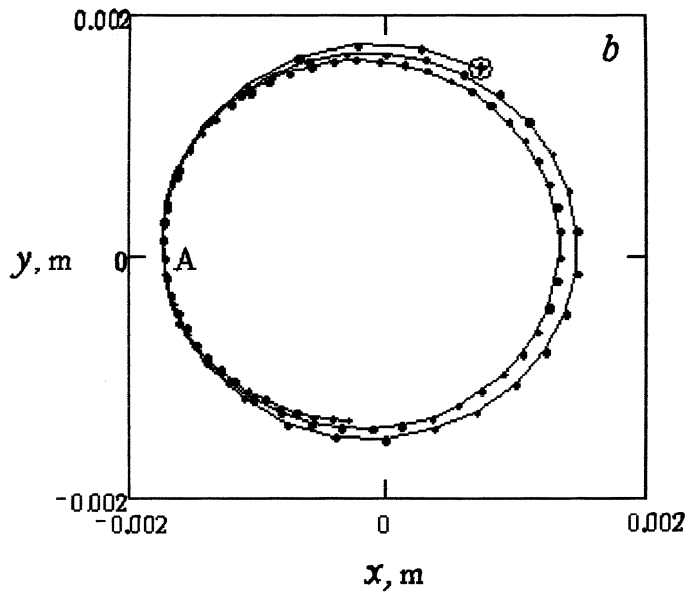


Рис. 2 (продолжение).

рокий динамический диапазон измерений, чем энергоанализатор с тороидальным магнитным полем, однако присутствия в автографе точек, затрудняющих обработку, избежать не удалось.

В заключение укажем, что соленоид с винтовой осью более компактен, чем тороидальный соленоид.

## Список литературы

- [1] Герасимов А.И., Дубинов Е.Г., Кудасов Б.Г. // ПТЭ. 1971. № 3. С. 31.
- [2] Тарантин Н.И. Магнитные статические анализаторы заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [3] Dubinov A.E., Minashkin N.V., Selemir V.D. et al. // Proc. of 9th IEEE Internat. Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM, 1993. P. 708.

- [4] Степанов Н.В., Ватрунин В.Е., Селемир В.Д. // Исследования по физике плазмы: Сб. науч. тр. / Под ред. В.Д. Селемира и А.Е. Дубинова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 1998. С. 232.
- [5] Днестровский Ю.Н., Костомаров Д.П. Математическое моделирование плазмы. М.: Наука, 1993.
- [6] Georgievskij A.V., Ziser V.E., Nemov V.V. et al. // Nuclear Fusion. 1974. V. 14. N 1. P. 79.
- [7] Рошаль А.С. Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979.