



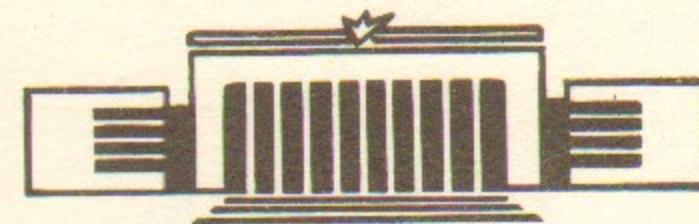
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

23

В.С. Белкин, В.Г. Соколов, И.Я. Тимошин,  
В.Е. Чуприянов

ТРАССИРОВКА  
МАГНИТНЫХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

ПРЕПРИНТ 85-109



НОВОСИБИРСК

Описывается методика и аппаратура для трассировки электронным пучком магнитного поля сложной конфигурации. Регистрация пучка осуществляется проводочными датчиками с большой прозрачностью. Точность измерения координат пучка определяется шагом намотки проволок датчика и составляет 2 мм.

В плазменной амбиполярной квадрупольной ловушке АМБАЛ ИЯФ СО АН СССР [1] магнитное поле имеет сложную геометрию. Как показано в [2], небольшие возмущения магнитного поля приводят к нежелательному уменьшению времени удержания плазмы, поэтому при сборке магнитной системы уделялось должное внимание контролю конфигурации магнитного поля. На первом этапе магнитная система юстировалась по измерениям поля в параксиальной области при слабых постоянных полях, составляющих  $1/10$  от номинального [3,4]. Юстировка по этим измерениям устраняет только дипольные возмущения системы. Для изучения хода силовых линий в рабочем режиме ( $H \sim 20$  кГс,  $\tau \sim 1$ с), а также вне параксиальной области, была разработана и отлажена аппаратура для непосредственной трассировки силовых линий с помощью электронного пучка.

Пучок создается электронной пушкой с катодом в виде борид-лантанового диска  $\varnothing 6$  мм и толщиной 2 мм, подогреваемого вольфрамовой спиралью (мощность накала  $30 \div 40$  Вт). Ток пушки  $5 \div 10$  мА, энергия  $300 \div 500$  эВ. Электроны с такой энергией в поле 2—20 кГс имеют ларморовский радиус  $0,3 \div 0,03$  мм, так что они движутся вдоль силовых линий магнитного поля. Рассеянием их на остаточном газе при давлении  $10^{-5}$  Тор можно пренебречь. Диаметр пучка на выходе из пушки 5 мм, по мере продвижения его размер и форма изменяются в соответствии с изменением магнитного поля.

Визуальные наблюдения и фотографирование траекторий пучка с необходимой точностью ( $\sim 2$  мм) весьма затруднены из-за сложной конфигурации вакуумной камеры установки. Поэтому определение положения пучка проводилось с помощью проводочных датчиков.

Измерение координат пучка иллюстрируется схемой рис.1. Датчик, устанавливаемый на пути пучка, представляет собой две проволочные рамки, намотанные во взаимно перпендикулярных направлениях. Выходы каждой рамки подключены к преобразователям ток-напряжение, так что  $U_i = I_i R$ . Входное напряжение преобразователей при любом входном токе с высокой точностью равно нулю. При этом  $I_1/I_2 = R_2/R_1$ , где  $R_1, R_2$  — сопротивления участков рамки от места падения пучка до преобразователей. Если шаг намотки постоянен и нет разброса сопротивлений отдельных участков проволоки, то отношение координат  $x_2/x_1 = R_2/R_1 = I_1/I_2$ . Расстояние между рамками  $\sim 1$  мм, поэтому можно считать, что обе координаты пучка измеряются в одной плоскости.

Шаг намотки рамки  $h$  выбирается меньше, чем размер пучка по измеряемой координате, что исключает непопадание пучка на проволоку. Точность определения положения пучка на краю рамки не хуже  $h$  (например, для положения А на рис.1 сдвиг пучка на  $h$  влево практически не меняет  $I_1/I_2$ ) и несколько лучше вдоль центральной оси рамки.

Диаметр и материал проволоки выбирались из следующих соображений. Нужна высокая прозрачность рамок для того, чтобы иметь возможность измерять координаты пучка одновременно в нескольких плоскостях. Сопротивление рамки не должно быть маленьким по сравнению с  $R$ , иначе большую ошибку в измерениях будут вносить шумы и дрейф нуля преобразователей. С этих точек зрения желательно иметь проволоку минимального диаметра. С другой стороны, необходимо получить достаточный для измерений ток на рамку, не превысив допустимый перегрев проволок пучком и иметь достаточную их механическую прочность. В нашем случае была выбрана бронзовая проволока диаметром 0,05 мм. При этом прозрачность рамки при шаге намотки 2 мм составляет 97,5%.

Каркасы датчиков изготовлены из дюралюминия. На краях каркасов закреплены изоляторы из оргстекла. В просверленные в изоляторах отверстия вставлены металлические штырьки, которые проволока огибает при намотке рамки. Натяжение проволоки при намотке обеспечивалось электродвигателем и составляло  $\sim 70$  г.

Схема трассировки магнитных силовых линий в одной половине установки показана на рис.2. В таблице приведены основные параметры применяемых датчиков.

В центральной части установки на планке, вращающейся вокруг горизонтальной оси на  $360^\circ$  с фиксацией углов через  $22,5^\circ$ , на радиусах 0, 190, 300 мм были установлены 5 электронных пушек.

Поворотом планки на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси пушки могли быть направлены в ту или другую половину установки. Крайние пушки установлены на радиусе, соответствующем максимальному размеру плазмы в центре.

Таблица

Параметры проволочных датчиков

Тип датчика	Размер окна, мм	Размер каркаса, мм	Шаг намотки, мм		Сопротивление рамок, кОм	
			$h_x$	$h_y$	$R_x$	$R_y$
1	$\varnothing 250$	460 × 400	2	2	2.1	2.1
2	60 × 1000	100 × 1150	2	8	1.7	0.55
3	185 × 185	290	8	8	0.2	0.2

Рамки и горизонтальная ось пушек были выставлены по лазерному лучу так, чтобы центры рамок и средней пушки совпадали с осью установки с точностью лучше 1 мм.

Длительность стабилизированной части импульса магнитного поля установки  $\sim 0,6$  сек. В это время включается одна из пушек и производятся измерения токов рамок. Выходные напряжения преобразователей оцифровываются интегрирующим аналого-цифровым вольтметром и засылаются в ЭВМ. Типичные уровни токов рамок  $15 \div 100$  мкА при токе пушки 5 мА, выходные напряжения преобразователей  $0,5 \div 3$  В. Обычно за один импульс поля измеряются координаты одного пучка в 4-х плоскостях (16 измерений по 40 мс на канал), но возможен режим, при некоторой потере точности, когда за один импульс включались последовательно несколько пушек (до 80 измерений по 5 мс на канал).

Для учета сопротивлений подводов рамки предварительно измерялись подачей тока от источника питания на крайние штырьки намотки. Перед каждым циклом измерений траекторий проводились измерения выходных напряжений преобразователей без включения пушек. Этим учитывались сдвиги нулей преобразователей и наводки, связанные с ненулевой производной магнитного поля.

Результаты вычисления координат пучка записывались на магнитный диск. Для наглядности они выводились на экран цветного дисплея. Типичная картина приведена на рис. 3. Здесь крестиками изображены координаты пучка от пушки с  $R = 190$  мм в центральной плоскости крайнего пробкотрона ( $z = 2240$  мм, датчик типа 1).

Пересечение вертикальной и горизонтальной линий соответствует центру пробкотрона. В расчетном магнитном поле точки должны лежать на эллипсе с очень малым эксцентриситетом (почти окружность) с центром в центре пробкотрона и углом наклона  $\sim 45^\circ$  [4]. Возмущения магнитного поля приводят к изменениям параметра эллипса: увеличению эллиптичности, сдвигу центра, повороту. По экспериментальным точкам (см. рис. 3) строился эллипс с минимальным квадратичным отклонением. Из рисунка видно, что экспериментальные точки хорошо ложатся на кривую — разброс их, как и ожидалось,  $\sim h$  и позволяют определить центр эллипса ( $x_0, y_0$ ), характеризующий дипольное возмущение, и эллиптичность (эксцентриситет  $E$ ), характеризующую квадрупольное возмущение. Появление дипольного возмущения магнитного поля в отъюстированной системе [4] можно объяснить эффектами нелинейного намагничивания каркасов катушек и металлических конструкций, изготовленных из нержавеющей стали. Кроме того, возможны деформации элементов магнитной системы при больших полях.

С помощью этой же методики была проведена трассировка траекта одной из плазменных пушек [5]. Электронная пушка была установлена на координатном механизме так, что при измерениях описывала окружность, соответствующую выходной кольцевой щели плазменной пушки. Координаты пучка регистрировались датчиком типа 1 в центре пробкотрона. Измерения показали хорошее согласие с расчетными траекториями.

Результаты проделанной работы показывают перспективность трассировки магнитных полей электронным пучком с регистрацией координат проволочными датчиками, особенно в случае сложных конфигураций магнитного поля и вакуумной камеры.

Авторы благодарят Димова Г.И., Фикселя Г.И., Лысянского П.Б., Минакова Г.Д. за ценные советы и плодотворные обсуждения методики измерений, Хрестолобова В.С. за конструирование датчиков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.И. Димов, Г.В. Росляков. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 80-152, 1980.
2. И.А. Котельников. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 83-36, 1983.
3. В.С. Белкин, Б.П. Санников, В.Г. Соколов, И.Я. Тимошин. Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-35, 1983.
4. Г.И. Димов и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 84-81, 1984.
5. Г.И. Димов, А.А. Иванов, Г.В. Росляков. Физика плазмы, т.8, в.5, 1982, 970.

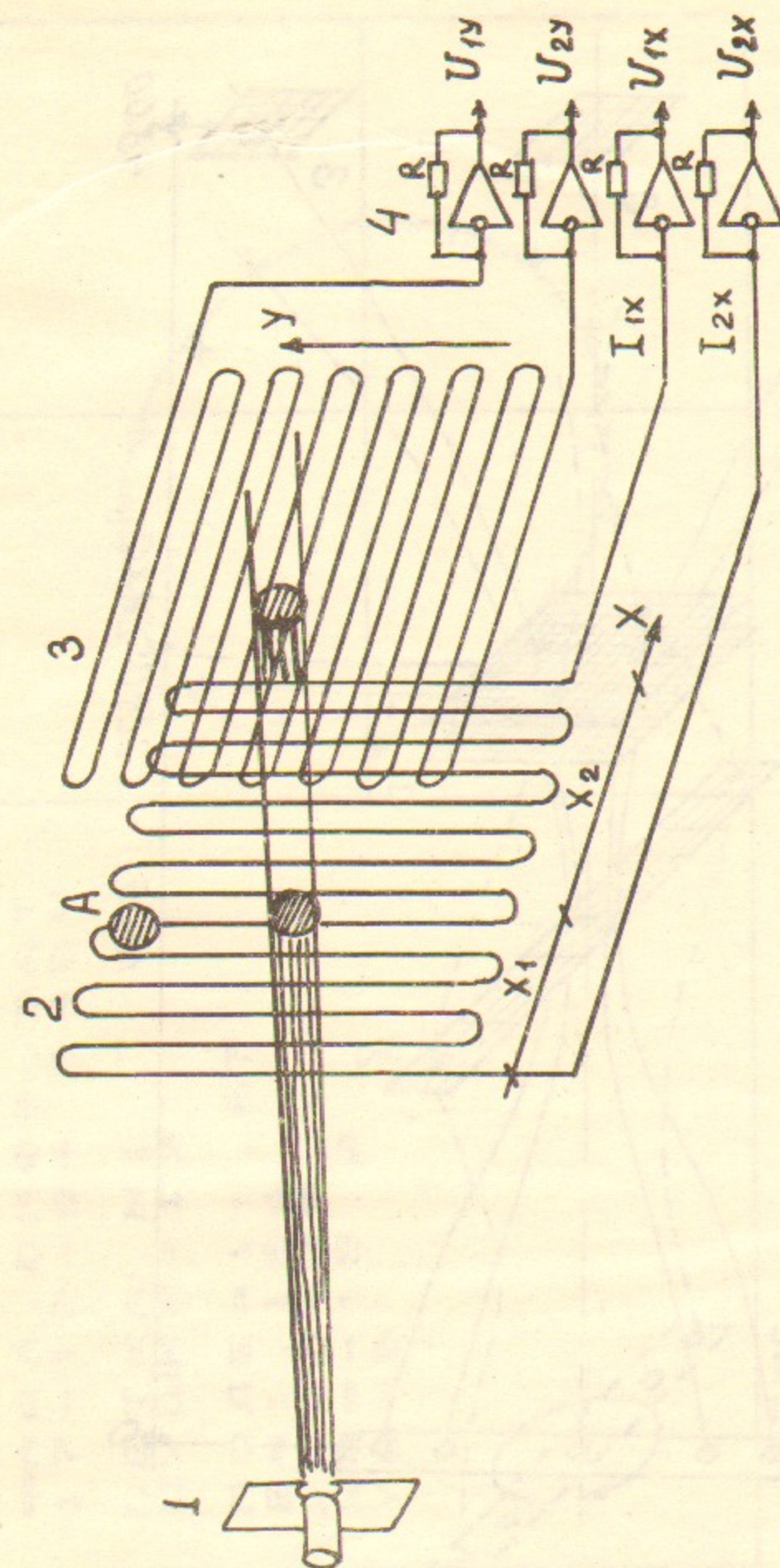


Рис. 1. Схема измерений координат пучка проволочным датчиком.



*В.С. Белкин, В.Г. Соколов, И.Я. Тимошин,  
В.Е. Чуприяков*

**Трассировка магнитных силовых линий  
электронным пучком**

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

---

Работа поступила 14 июня 1985 г.  
Подписано в печать 23. 07.1985 г. МН 05838.  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0,9 печ.л., 0,8 уч.-изд.л.  
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 109

---

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*