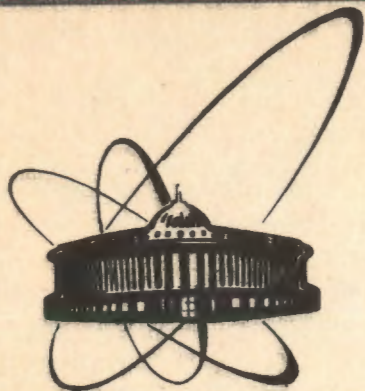


91-555



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P9-91-555

П.Г.Акишин, А.А.Ефремов, В.Б.Кутнер

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ
ИОННОГО ИСТОЧНИКА DECRIS-14

1991

ТРЕБОВАНИЯ К МАГНИТНОЙ СИСТЕМЕ

Источники многозарядных ионов с нагревом плазменных электронов в области электронно-циклотронного резонанса широко используются на различных ускорительных комплексах. Источник такого типа DECRIС-14 (Dubna Electron Cyclotron Resonance Ion Source) в настоящее время разрабатывается в ЛЯР ОИЯИ.

В ионном источнике DECRIС-14 используется частота накачки 14 ГГц, что соответствует уровню резонансного магнитного поля 0,5 Тл. Зона резонанса должна быть замкнутой и не пересекать стенки ионизационной камеры. Для удержания плазмы используется конфигурация "минимум В" или трехмерная "магнитная яма", т.е. поле, которое имеет минимум в области плазмы и возрастает во всех направлениях.

Для реализации такой конфигурации в ионном источнике используется комбинация полей, создаваемых осесимметричными соленоидальными катушками и мультиполем (в нашем случае гексаполем), изготовленным из постоянных магнитов (материал NdFeB). Катушки обеспечивают "яму" в аксиальном направлении с пробочным отношением 1,5 - 2, а мультиполь в радиальном. Уровень магнитного поля однозначно определяется значением резонансного магнитного поля. Так, максимум аксиального магнитного поля и значение радиального магнитного поля на поверхности ионизационной камеры должны составлять величину 0,7 - 0,8 Тл.

Вследствие того, что стенка ионизационной камеры находится на расстоянии 3 мм от поверхности магнита, а величина магнитного поля в гексаполе $B \sim r^2$, поле на поверхности магнита должно превышать 1 Тл.

Первоначальные расчеты магнитной конфигурации проводились с помощью пакета прикладных программ POISSON [1]. Входящая в этот пакет программа PANDIRA позволяет рассчитывать распределение магнитного поля в сечении бесконечно длинного гексаполя, а программа POISSON - осесимметричные магнитные системы, состоящие из катушек и мягкого железа. Однако наличие в магнитной системе мультиполя приводит к утрате осевой симметрии и требует дополнительных трехмерных расчетов, т.к. осевые поля (рис. 1), возникающие на краях гексаполя, могут привести к возникновению "паразитных" резонансов в районе экстракционного отверстия или в области ввода СВЧ-полюости.

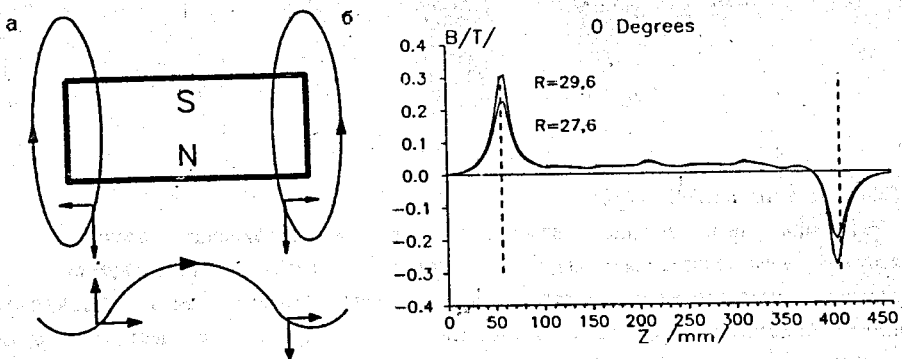


Рис. 1. Влияние краевых полей гексаполя на поле соленоидальных катушек (а) и измеренные значения осевой компоненты поля в гексаполе (б).

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для расчета трехмерной конфигурации магнитного поля использовался метод объемных интегральных уравнений [2]. Пусть $B(a)$, $H(a)$, $M(a)$ - индукция, напряженность и намагниченность магнитного поля в точке a ; $H^s(a)$ - поле от токовых обмоток; $H^m(a)$ - поле от постоянных магнитов; G - область, заполненная ферромагнетиком. Тогда имеет место следующее интегральное уравнение:

$$H(a) = H^s(a) + H^m(a) + \frac{\nabla_a}{4\pi} \left[\int_G (M(x) \cdot \nabla_x \frac{1}{|x-a|}) dx \right]$$

Величины B , H и M связаны соотношениями:

$$H = [\mu(|B|)\mu_0]^{-1} B, \quad M = B/\mu_0 - H,$$

где μ_0 - магнитная проницаемость вакуума, μ - магнитная проницаемость, нелинейным образом зависящая от $|B|$. Область G разбивается на подобласти (G_i) : $G = \bigcup_{i=1}^N G_i$. В каждом G_i берется

центр a_i ; B , H , M в G_i приближаются постоянными значениями B_i , H_i и M_i . Итоговая дискретизованная система уравнений имеет вид:

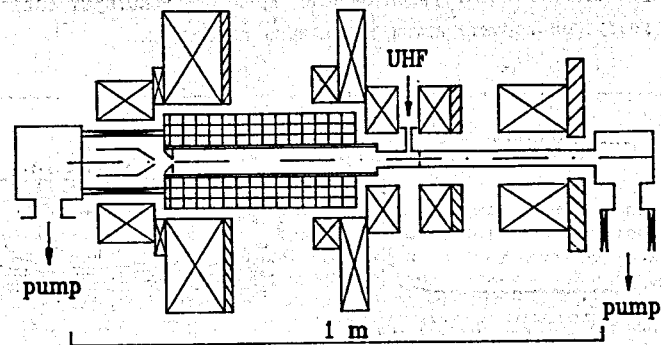
$$H_i = H^s(a_i) + H^m(a_i) + \frac{\nabla_{a_i}}{4\pi} \left(\sum_{j=1}^N \int_{G_j} (M_j \cdot \nabla_x \frac{1}{|x-a_i|}) dx \right) \Big|_{a=a_i}, \quad i=1, 2, \dots, N.$$

В дальнейшем использовался метод, изложенный в работе [3].

Область G разбивалась на 3456 элементов. Суммарное время на вычисление коэффициентов матрицы, 100 шагов итерационного процесса и пересчета поля в 8000 точек наблюдения составило около 15 часов центрального процессора ЭВМ ЕС-1066.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Конфигурация магнитной системы ионного источника показана на



⊗ - coils ⊠ - hexapole ⊔ - iron | - insulator

Рис. 2. Конструкция источника многозарядных ионов DECIS-14.

рисунке 2. Она включает в себя 8 соленоидальных медных катушек, гексаполь и элементы из мягкого железа. Распределение магнитного поля на оси ионного источника показано на рисунке 3, где приведены кривые, рассчитанные с помощью программы POISSON и результаты трехмерного расчета. Кроме того, приводятся результаты измерений магнитного поля, проведенные с помощью магнитометра, описанного в [4]. Как видно из рисунка, имеется вполне удовлетворительное совпадение расчетов с экспериментальными данными.

Для создания возрастающего по радиусу магнитного поля используется гексаполь, конструкция которого показана на рисунке 4. Для того, чтобы обеспечить необходимую величину модуля магнитного поля в ионизационной камере использована конфигурация, обеспечивающая концентрацию магнитного потока внутри рабочей области.

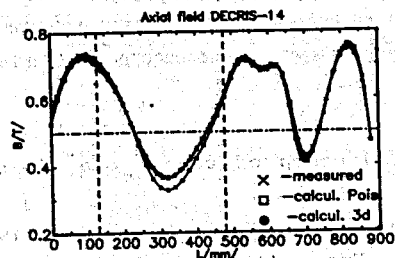


Рис. 3. Распределение магнитного поля вдоль оси источника.

DECIS-14

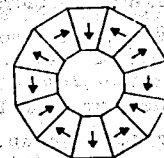


Рис. 4. Конструкция гексаполя.

На рис.5 приведено сравнение результатов расчета и измерения распределения радиальной составляющей магнитного поля в гексаполе.

Различие расчетной и экспериментальной кривых в некоторых областях связано с разбросом характеристик магнитного материала.

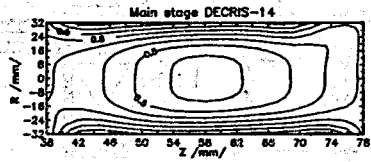
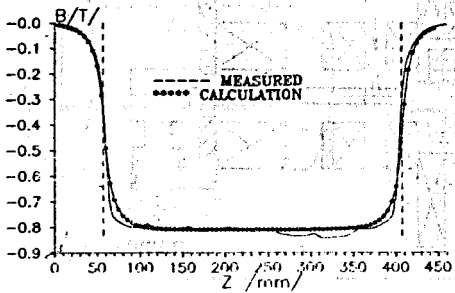


Рис. 5. Распределение радиальной компоненты магнитного поля вдоль оси гексаполя ($r=30.4$ мм).

Рис. 6. Топография магнитного поля в продольном сечении источника.

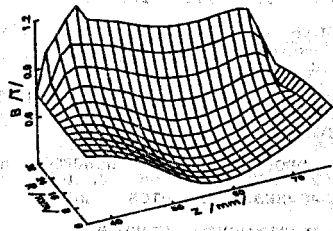
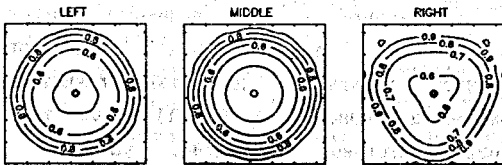


Рис. 7. Топография магнитного поля в поперечных сечениях ионизационной камеры.

Рис. 8. Трехмерное распределение подула магнитной индукции в ионизационной камере.

Проведение трехмерных расчетов позволяет определить положение резонансной зоны в любом из сечений ионизационной камеры (рис. 6, 7), а также построить трехмерную картину распределения подула магнитного поля в рабочей области, наглядно отражающую особенности магнитной системы (рис. 8).

Литература

1. User's guide for the POISSON/SUPERFISH group of codes, Los Alamos accelerator code group, LA-UR-87-115, 1987.
2. Newman M.J., Trowbridge C.W., Turner L.R. GFUN: An interactive program as an aid to magnet design, Proc. 4th Int. Conf. Magnet Technol., Brookhaven, 1972, p. 617-626.
3. Акишин П.Г. ЖЭМ и МФ, Т. 29, 1989, с. 1168-1174.
4. Ефремов А.А. и др. Тезисы докладов XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, ИТЭФ, 1990, стр.44-45.

Рукопись поступила в издательский отдел

18 декабря 1991 года.