

РАСЧЕТ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АНАЛИЗАТОРЕ СТАТИЧЕСКОГО МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

А. С. Бердников, С. А. Виноградова, Л. Н. Галль, С. Я. Типисев

Все больший интерес для химических и биохимических исследований представляет анализ сложных органических соединений масс-спектрометрическими методами [1]. Решение задач этого класса требует увеличения диапазона анализируемых масс до десятков тысяч при сохранении информативности масс-спектрометрических данных, которая в значительной степени обеспечивается достаточно высокой разрешающей способностью и чувствительностью масс-спектрометра во всем диапазоне масс.

Диапазон масс статического магнитного масс-спектрометра

$$M = A \frac{(RH)^2}{eU},$$

где R — радиус поворота иона с энергией eU в магнитном поле H (A — константа размерности), возрастает при увеличении пересекаемого ионом магнитного потока, пропорционального RH , либо при уменьшении энергии иона eU . Первый путь связан с увеличением габаритов прибора, поскольку в электромагнитах с железом получение напряженности магнитного поля свыше 2 Тл ограничивается насыщением железа. При заметном же уменьшении энергии ионов, даже если ионно-оптическая схема масс-анализатора обеспечивает полную компенсацию аберраций по энергии, вторичные эффекты, особенно в области тяжелых масс, ограничивают возможности получения высокой разрешающей способности и требуемой чувствительности масс-спектрометра. В настоящей работе рассматривается возможность использования в масс-спектрометре, предназначенном для анализа сверхтяжелых масс, магнитных полюей высокой напряженности, создаваемых токовыми сверхпроводящими системами.

Сильные магнитные поля, формируемые сверхпроводящими (СП) соленоидами, с успехом используются в современных спектроаналитических приборах. Благодаря замене электромагнита на СП соленоид были существенно повышены аналитические характеристики ЯМР спектрометров [2]. Только возможность создания сильного высокооднородного магнитного поля в СП соленоиде позволила развить новое направление масс-спектрометрии — ИЦР спектроскопию [3]. Для обеспечения работоспособности как ЯМР, так и ИЦР спектрометров необходимо формировать высокооднородное сильное магнитное поле, но при этом только в ограниченной области малых размеров. Задача формирования такого поля в СП соленоидах достаточно легко решается. В то же время, хотя СП системы в принципе позволяют получать магнитные поля существенно большей напряженности, чем электромагниты с железом, до сих пор в масс-спектрометрии не делалось попыток использовать СП соленоиды для создания магнитных анализаторов статических секторных масс-спектрометров. Это связано прежде всего с невозможностью создать в безжелезной системе магнитные поля с резкой границей, используемые в секторных масс-анализаторах масс-спектрометров, а также со сложностью и неэкономичностью формирования в них сильных полей с достаточно большой областью высокой однородности. Легко решаемой с помощью СП соленоидов является задача формирования осесимметричных неоднородных полей в зазоре двух СП соленоидов, имеющих общую ось и расположенных симметрично относительно плоскости движения ионов, причем желаемый закон неоднородности может быть выполнен в достаточно большой области. Конфигурация поля в медианной плоскости системы соленоидов определяется формой обмоток и распределением в них тока. Естественно, для расчета ионно-оптической схемы масс-спектрометра, в которой используется магнитное диспергирующее поле указанного типа, традиционные методы, основанные на предположении о малости вклада краевых полей, оказываются непригодными. Соответствующие теоретические исследования, позволяющие применять магнитные поля, формируемые соленоидами описанного типа, для создания масс-анализаторов для сверхтяжелых масс, будут изложены в последующих работах.

В настоящей работе описывается метод расчета системы соленоидов, позволяющий получить в медианной плоскости неоднородное магнитное поле заданного вида; приведены результаты расчета для конкретной конфигурации поля и результаты экспериментальной проверки на макете с использованием соленоидов постоянного тока без железа.

Пусть сечение соленоида в плоскости OXZ имеет вид криволинейной фигуры, ограниченной кривыми $z=f_1(x)$ и $z=f_2(x)$ (рис. 1).

Если плотность тока $I(x, z)$ в таком соленоиде не зависит от координаты z , то поле $B_z(r)$ в плоскости симметрии можно определить по формуле

$$B_z(r) = 2 \int_{x_1}^{x_2} da I(a) \int_{f_1(a)}^{f_2(a)} dz B_z^0(a, z, r), \quad (1)$$

где $B_z^0(a, z, r)$ есть поле в точке $(r, 0)$ от бесконечно тонкого кольца радиуса a , расположенного на высоте z от медианной плоскости, при протекании по нему единичного тока

$$B_z^0(a, z, r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{[(a+r)^2 + z^2]^{1/2}} \left[K + \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E \right], \quad (2)$$

где K, E — полные эллиптические интегралы первого и второго рода; I — ток в кольце; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума [4].

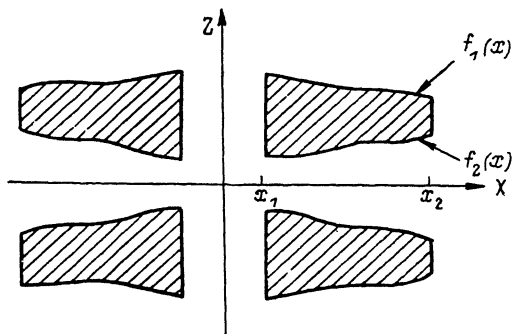


Рис. 1. Сечение магнитной системы с обмотками произвольного профиля.

Синтез поля заданного вида требует решения обратной задачи — нахождения формы обмоток и распределения тока в них по виду требуемого поля. В общем случае эта задача очень сложна. Существенным упрощением как с точки зрения расчетов, так и с точки зрения практического изготовления является применение соленоидов прямоугольного сечения, разбитых на концентрические секции, по которым текут различные токи, однородные в пределах секций. Тогда выполнение требований к виду поля достигается путем выбора соответствующего распределения токов по секциям и соотношения геометрических размеров секций. Подобный принцип — разбиение на секции — уже использовался для синтеза поля заданной конфигурации на оси соленоида [5]. Несмотря на существенное отличие вида поля на оси соленоида от вида поля в плоскости, перпендикулярной оси, этот принцип оказывается пригодным для создания системы, формирующей поле требуемого вида в медианной плоскости.

Для пары соленоидов, разбитых на N концентрических секций, аксиальная составляющая полного поля в плоскости симметрии может быть представлена в виде

$$B_z(r) = 2 \sum_{j=1}^N B_z^j(r) I_j, \quad (3)$$

где I_j — плотность тока в j -й паре секций; $B_z^j(r)$ — функция влияния j -й секции на точку наблюдения $(r, 0)$, т. е. поле, которое создается в точке $(r, 0)$ j -й катушкой при протекании в ней единичного тока. Она зависит от размеров катушки и ее расположения относительно точки наблюдения. Функция влияния j -й катушки для плоскости, перпендикулярной оси соленоида, определяется выражением

$$B_z^j(r) = \int_{z_1}^{z_2} dz \int_{a_j}^{a_{j+1}} da B_z^0(a, z, r), \quad (4)$$

где $B_z^0(a, z, r)$ определяется формулой (2). Потребуем, чтобы в некоторой кольцевой области $r \in [r_1, r_2]$, называемой рабочей областью, поле, создаваемое катушками, совпадало с требуемым полем $F(r)$, т. е. выполнялись условия

$$2 \sum_{j=1}^N B_z^j(r_i) I_j = F(r_i); \quad i=1, 2, \dots, M; \quad M > N. \quad (5)$$

Совокупность таких условий для выбранных точек рабочей области дает переопределенную линейную систему уравнений, решая которую методом разложения по сингулярным числам матрицы [6] можно получить значения токов, оптимальные в смысле минимизации среднеквадратичного отклонения полученного поля от требуемого для заданной геометрии системы.

Для реализации описанного алгоритма была составлена программа на языке ФОРТРАН. Входными данными являются число секций, координаты границ секций и рабочей области.

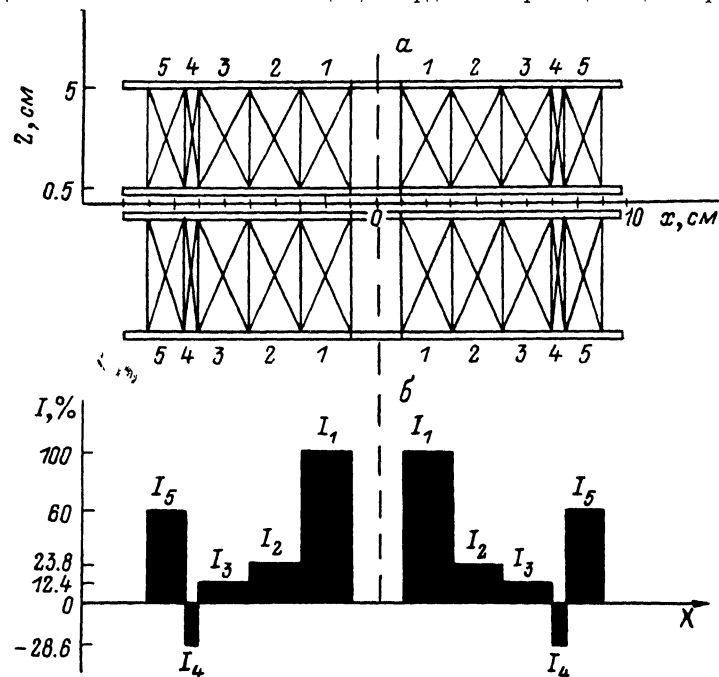


Рис. 2. Система пятисекционных соленоидов для создания конусовидного призматического поля (а) и диаграмма токов в секциях (б).

Для вычисления эллиптических интегралов, входящих в функции влияния, использовалась аппроксимация [7]. Численное интегрирование производилось с помощью подпрограммы QUANC [8], разложение по сингулярным числам матрицы с помощью подпрограммы SVD [9]. В качестве выходных данных получают требуемые значения токов для каждой пары секций, величины абсолютного и среднеквадратичного отклонения получаемого поля от заданного, а также графики функций $B_z(r)$ и $[B_z(r) - F(r)]$.

Описанная методика была применена для расчета конкретной системы с конусовидным призматическим полем вида $B_z(r) = B_0 r_0 / r$, являющимся удобным для проведения расчетов масс-анализаторов.

Границы рабочей области ($r_1 = 3$ см, $r_2 = 7$ см) и ограничение на максимально допустимое относительное отклонение ($\pm 0.5\%$) были выбраны в соответствии с характеристиками экспериментального макета.

Варьирование числа секций, их вертикальных и горизонтальных размеров, расстояний от средней плоскости позволяет добиться необходимой точности совпадения синтезируемого поля с требуемым, а также при необходимости выполнения некоторых дополнительных условий для соотношения токов в отдельных секциях.

Первоначально геометрия системы выбиралась из следующих соображений. Удаление катушек от средней плоскости снижает величину поля в ней, поэтому расстояние до нижней границы соленоидов выбиралось минимально допустимым с точки зрения размещения крио-

стата и элементов ионно-оптической схемы. Длина соленоидов первоначально выбиралась по виду зависимостей $B_z(r)$ для различных соотношений длины и толщины катушек [8]. Поле оказывается наиболее близким к требуемому в случае $z/b=1.1$ (b — длина соленоида).

Как выяснилось в процессе проведения расчетов, основное влияние на конфигурацию суммарного поля оказывает горизонтальное разбиение — число секций, соотношение их толщины и расположение относительно границ рабочей области. Согласно расчетам, точность приближения формируемого поля к заданному при большом числе секций может быть сделана очень высокой. Например, при $N=16$ максимальное относительное отклонение от поля $B_z(r)=B_0 r_0/r$ составляет 0.001 %. Однако для практического использования такой системы число секций желательно свести к минимуму. С уменьшением частоты разбиения относитель-

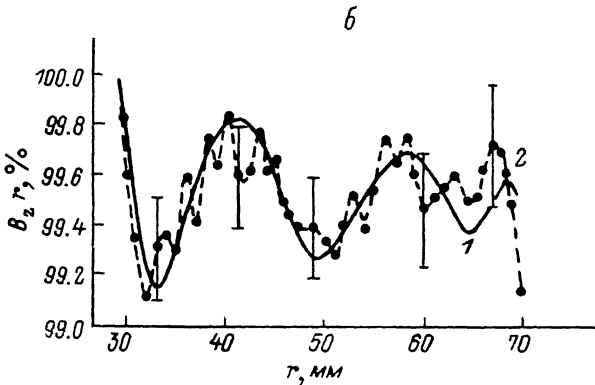
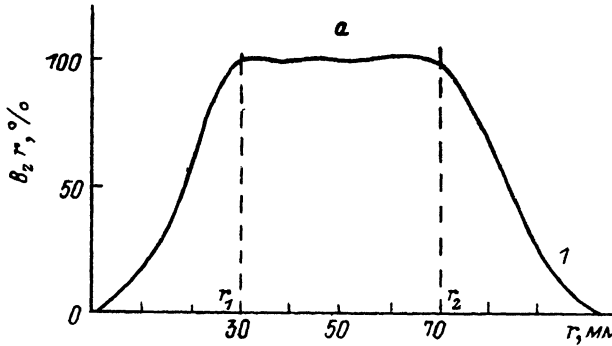


Рис. 3.

ное отклонение быстро растет и для $N=6$ при равномерном разбиении уже превышает допустимое. За счет неравномерного разбиения удалось получить требуемую точность для конусовидного поля при помощи пятисекционного соленоида с размерами секций, указанными на рис. 2. При этом токи в секциях имели значения: $I_1=1.0, I_2=0.2383, I_3=0.1243, I_4=-0.2856, I_5=0.6053$.

Смещение верхних и нижних границ отдельных секций относительно друг друга привело к резкому ухудшению совпадения формируемого поля с заданным. Увеличение общей длины соленоидов и расстояния от средней плоскости до нижней границы слабо влияло на относительное отклонение, однако при этом наблюдалось существенное возрастание разброса в величинах токов отдельных секций. При реализации магнитной системы это привело бы к снижению величины суммарного поля в средней плоскости.

Результаты эксперимента

С учетом проведенных расчетов была изготовлена магнитная система, предназначенная для исследования прохождения заряженных частиц в неоднородных полях. Магнитная система состоит из двух одинаковых соосных катушек прямоугольного сечения, каждая из которых в свою очередь состоит из 16 концентрических обмоток равной толщины, намотанных виток к витку медным проводом диаметром 0.7 мм. Между рядами провода прокладывались изолирующие слои толщиной 0.1 мм, разброс высоты намотки составлял ± 1 виток со стороны

мамотки, удаленной от средней плоскости. Обмотки можно объединять в группы и пропускать по отдельным секциям независимые токи, создавая поля требуемой конфигурации. Измерение составляющей B_z магнитного поля производилось датчиком Холла, размещенным на координатном устройстве.

На этой магнитной системе были проведены результаты расчета токов для пятисекционных катушек, создающих поле $B_z = B_0 r_0 / r$ в кольцевой области, ограниченной радиусами $r_1 = 30$ и $r_2 = 70$ мм. На рис. 3, а, б приведены теоретическая (1) и экспериментальная (2) зависимости $f(r) = rB_z(r, z=0)$. Для исследуемого конусовидного поля $B_z = B_0 r_0 / r$ величина rB_z в рабочей области сохраняет постоянное значение с точностью $\pm 0.5\%$ (рис. 3, б). Отдельные точки соответствуют измеренным значениям, сплошная кривая — расчетным. Для нескольких точек показана величина ошибки измерения. Погрешность определения координаты составляла 0.1 мм, величины магнитного поля — 0.2 Гс. Значения токов в катушках соответствовали расчетным с точностью 0.05%. Видно, что в пределах погрешности измерения экспериментальные результаты совпадают с расчетными.

Заключение

В работе показано, что для создания неоднородного магнитного поля, обладающего высокой дисперсией по массе, можно применить магнитную систему, состоящую из двух соосных секционированных соленоидов, симметричных относительно плоскости движения ионов.

Описан метод расчета распределения токов в системе секционированных соленоидов для формирования заданного поля и проведен расчет для конкретного вида поля.

Показано, что результаты расчета поля хорошо совпадают с экспериментальными данными, что подтверждает как корректность расчетов по описанному методу, так и практическую возможность изготовления подобных систем с достаточной точностью.

Литература

- [1] *Faccetti S. M.* Mass Spectrometry of Large Molecules. Amsterdam, Elsevier, 1985.
- [2] *Зенкевич В. Б., Сычев В. В.* Магнитные системы на сверхпроводниках. М., 1972.
- [3] *Hariman H., Wanczek K. P.* Ion Cyclotron Resonance Spectrometry II. Berlin, Springer--Verlag, 1982.
- [4] *Смайт В.* Электростатика и электродинамика. М., 1954.
- [5] *Луганский Л. Б.* ЖТФ, 1985, т. 55, № 7, с. 1263—1271.
- [6] *Лоусон, Хенсон Р.* Численное решение задач метода наименьших квадратов. М., 1986.
- [7] Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. М., 1979.
- [8] *Глебов И. А., Лаврик Ч., Шахтарин В. Н.* Электрофизические проблемы использования сверхпроводимости. Л., 1980.
- [9] *Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К.* Машинные методы математических вычислений. М., 1980.

Научно-техническое объединение
Институт аналитического приборостроения
АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
15 мая 1987 г.

ОБРАЗОВАНИЕ И ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИЕВЫХ $p-n$ ДИОДАХ С ПРИМЕСЬЮ ЛИТИЯ

Л. С. Берман, В. Б. Воронков, И. В. Грехов,
И. М. Котина, К. Ш. Кушавили

В настоящее время введение лития используется для повышения радиационной стойкости кремниевых солнечных элементов [1], однако механизм взаимодействия лития с радиационными дефектами (РД) мало изучен. Цель настоящей работы — исследование этого механизма, а также его особенностей для других кремниевых приборов. Сравнивались образование РД, их отжиг, а также коэффициенты повреждения K в кремниевых $p-n$ диодах с примесью Li и без Li (контрольных), облученных γ -квантами Co^{60} .