

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.312.62

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАДИОСПЕКТРОМЕТРА
ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

© 2021 г. Н. В. Таряник^а, Д. В. Варюхин^а,
А. Я. Лаптиенко^а, Д. О. Федюк^{а,*}

^а Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина
Украина, 83114, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

*e-mail: fedukoleg@yandex.ua

Поступила в редакцию 23.09.2020 г.

После доработки 21.10.2020 г.

Принята к публикации 22.10.2020 г.

Приведены результаты разработки двух сверхпроводниковых магнитных систем для спектрометра электронного парамагнитного резонанса, создающих в центральной зоне диаметром до 100 мм магнитное поле с индукцией 7 Тл, однородностью $\sim 10^{-6}$ отн. ед. в 1 см^3 объема и нестабильностью $\sim 10^{-7} - 10^{-8}$ отн. ед./ч. В состав сверхпроводниковой магнитной системы входят соленоид, обмотка развертки и обмотки компенсации осевых и радиальных градиентов магнитного поля. Максимальная эффективность (до 90%) ввода поля развертки в замкнутый соленоид достигается, когда взаимная индуктивность соленоида и обмотки развертки стремится к нулю.

DOI: 10.31857/S0032816221020233

Расчету сверхпроводниковых соленоидов (с.п.с.) с однородным магнитным полем посвящено много работ [1, 2]. Ранее нами была разработана сверхпроводниковая магнитная система (с.м.с.), состоящая из с.п.с. и обмотки развертки. Система предназначена для возбуждения магнитного поля с индукцией до 7 Тл и однородностью $\sim 10^{-5}$ отн. ед. на 1 см вдоль оси [3]. Обмотка развертки установлена в рабочем отверстии с.п.с. и позволяет разворачивать поле амплитудой до ± 0.1 Тл. Сверхпроводниковая магнитная система использована в радиоспектрометре ЭПР5-04. Однородность магнитного поля для системы [3] приведена только вдоль оси соленоида, в то время как в исследованиях требуется знание однородности в объеме образца, например 1 см^3 , которая всегда хуже, чем вдоль оси за счет нескомпенсированных радиальных градиентов поля. Кроме того, диаметр рабочего отверстия с.м.с. (по обмотке развертки) равен всего лишь 35 мм, что ограничивает возможность ее применения.

Цель данной работы – разработка с.м.с. с повышенной до уровня $\sim 10^{-6}$ отн. ед. в 1 см^3 объема однородностью поля и увеличенным до 100 мм диаметром рабочего отверстия, а также разработка обмотки развертки с высокой эффективностью ввода поля развертки в замкнутый соленоид. Для этого последовательно были разработаны две с.м.с.

Первая с.м.с. с диаметром рабочего отверстия (по обмотке развертки) 70 мм состоит из 3-секци-

онного с.п.с., обмотки развертки и обмоток компенсации осевых (dH/dz , d^2H/dz^2) и радиальных (dH/dx , dH/dy) градиентов магнитного поля.

Первые две секции с.п.с. изготовлены по бескаркасной технологии с использованием эпоксидной смолы. Первая секция с диаметром внутреннего отверстия 82 мм, наружным диаметром 108.5 мм и длиной 240 мм изготовлена из проводов диаметром 0.7 и 0.5 мм с общим числом витков 8794. В обмотке выполнен внутренний корректирующий паз длиной 82.5 мм и глубиной в два слоя провода диаметром 0.7 мм. Вторая секция с диаметром отверстия 115 мм, наружным диаметром 138 мм и длиной 240 мм намотана проводом диаметром 0.5 мм и содержит 8668 витков. Третья секция намотана на каркас, имеет диаметр отверстия 147.5 мм, наружный диаметр 156.5 мм и длину 240 мм. Секция изготовлена из провода диаметром 0.5 мм с числом витков 1760 и выполнена в виде двух восьмислойных обмоток с зазором между ними 118 мм. Секции соленоида изготовлены из провода сплава НТ-50.

Обмотка развертки намотана на отдельном каркасе и имеет диаметр внутреннего отверстия 73 мм, наружный диаметр 79.5 мм, длину 160 мм и установлена в отверстии соленоида. Она содержит шесть слоев провода диаметром 0.5 мм, а для улучшения однородности поля в обмотке выполнен наружный паз длиной 79 мм и глубиной в

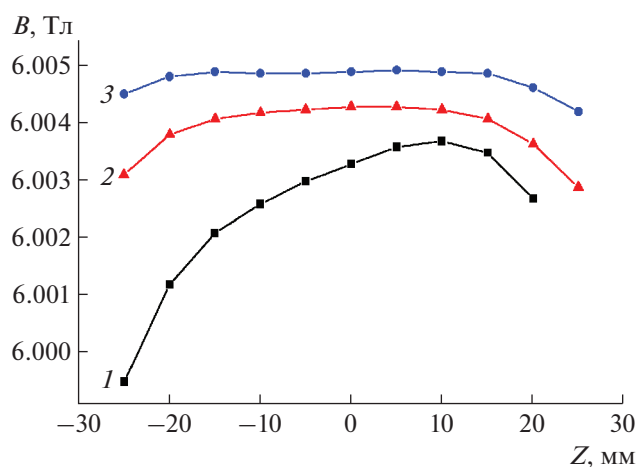


Рис. 1. Распределение индукции магнитного поля соленоида вдоль оси Z : 1 – исходное, 2 – после намотки дополнительных витков, 3 – суммарное поле соленоида и обмотки развертки при токе в ней 8 А.

один слой. Магнитная постоянная обмотки развертки 0.012 Тл/А.

Обмотки компенсации осевых и радиальных градиентов магнитного поля рассчитаны, согласно [4]. Так, обмотка градиента поля dH/dz выполнена в виде двух встречно включенных однослойных обмоток по 20 витков каждая, а обмотка d^2H/dz^2 – в виде двух пар катушек, из которых внутренняя пара включена встречно внешней. Число витков в каждой катушке внутренней пары 50, внешней пары – 100. Обмотки радиальных градиентов поля dH/dx , dH/dy одинаковы и содержат по четыре однослойные седлообразные катушки, установленные на внешней цилиндрической поверхности соленоида. Обмотка градиента поля dH/dx развернута относительно обмотки dH/dy на 90° . Число витков в каждой катушке равно 25. Обмотки компенсации градиентов поля изготовлены из сверхпроводника диаметром 0.38 мм.

К выводам с.п.с., обмотки развертки и обмотки компенсации градиентов поля подсоединены сверхпроводниковые ключи, а соединительные контакты выполнены холодной сваркой сверхпроводников.

Рабочее значение индукции поля 6.0 Тл достигалось при токе 69 А. Магнитное поле измеряли датчиком автодинного магнитометра на основе ядерного магнитного резонанса (я.м.р.), а его распределение вдоль оси Z с.п.с. представлено на рис. 1. Исходная однородность поля (кривая 1) составила $2 \cdot 10^{-4}$ отн. ед. на 1 см и была обусловлена линейным градиентом поля вдоль оси соленоида. Намотка дополнительных 14-ти витков в третьей секции со стороны меньшего поля позволила повысить однородность поля вдоль оси более чем на порядок (кривая 2), а однородность по-

ля в объеме 1 см³ составила $1.5 \cdot 10^{-5}$ отн. ед. Кривая 3 характеризует распределение суммарного поля соленоида и поля обмотки развертки индукцией 0.05 Тл. Согласно ходу кривой, поле обмотки развертки не ухудшает однородность поля с.п.с.

Настройка высокой однородности поля осуществлялась с помощью обмоток компенсации осевых и радиальных градиентов и контролировалась по ширине сигнала я.м.р. Датчик магнитометра с тяжелой водой D₂O устанавливался в “теплом пальце”, который размещался в отверстии с.п.с. Однородность поля в объеме 1 см³ составила $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ отн. ед., что соответствовало ширине сигнала я.м.р. на ядрах дейтерия ~ 80 Гц при резонансной частоте 39.2 МГц.

Степень проникновения магнитного поля обмотки развертки в замкнутый ключом с.п.с. составила не более 50%, остальная его часть экранировалась соленоидом. Это потребовало разработки новой конструкции обмотки развертки, что и было реализовано при создании второй с.м.с.

Отличительной особенностью второй с.м.с. является увеличенный до 101 мм диаметр рабочего отверстия и возросшее до 7 Тл значение индукции поля. Увеличение диаметра отверстия с.м.с. связано с необходимостью размещения в нем гелиевого криостата с внешним диаметром 100 мм, который предназначен для создания на исследуемом объекте температуры ~ 1 К.

В состав данной с.м.с. входят те же обмотки, что и в первую. Трехсекционный соленоид имеет диаметр внутреннего отверстия 105.4 мм, наружный 172.5 мм и длину 300 мм. Первая секция намотана проводом диаметром 0.7 мм, вторая – проводом диаметром 0.7 и 0.5 мм, третья – проводом диаметром 0.5 мм сплава НТ-50. В третьей секции выполнен наружный корректирующий паз.

Для повышения эффективности ввода поля развертки в замкнутый соленоид исследовано несколько конструкций обмотки развертки и места их расположения. Расчеты показали, что при размещении обмотки развертки, выполненной в виде одиночной катушки, снаружи с.п.с. степень проникновения поля развертки в замкнутый с.п.с. $\leq 15\%$, а при размещении ее в отверстии соленоида – $\leq 45\%$ и обусловлена сильной индуктивной связью с с.п.с. Исследования показали, что для уменьшения индуктивной связи часть витков обмотки развертки должна быть включена встречно остальной части.

Выражение, связывающее внешнее поле B_0 и поле B , которое проникает в замкнутый с.п.с., имеет вид

$$B = B_0 \left[1 - \frac{MC_c}{L_c C_p} \right], \quad (1)$$

где L_c – индуктивность с.п.с.; C_s , C_p – магнитные постоянные с.п.с. и обмотки развертки соответственно; M – взаимная индуктивность между ними. Из выражения следует, что максимальная степень проникновения поля развертки с.п.с. достигается, когда взаимная индуктивность стремится к нулю.

Разработанная с учетом этого требования обмотка развертки выполнена составной из трех катушек: средней – основной и двух крайних – компенсирующих, включенных встречно средней. Диаметр внутреннего отверстия обмотки развертки равен 101.5 мм, наружный – 105.0 мм. Длина средней катушки 150 мм, крайних – по 60 мм, зазор между средней и крайними катушками 15 мм. Для повышения однородности поля развертки в средней катушке выполнен внутренний паз длиной 98 мм. Число витков в средней катушке 998, в крайних – по 602. Обмотка развертки намотана сверхпроводником диаметром 0.38 мм и установлена в отверстии с.п.с. Магнитная постоянная обмотки составила 0.0063 Тл/А.

Исследования показали, что степень проникновения поля развертки в замкнутый соленоид составила 92%.

При испытаниях с.п.с. наблюдалась “тренировка” критического тока: первый переход в нормальное состояние произошел при 82 А, второй – при 97.5 А. Затем в соленоид был введен ток 102.3 А, при котором индукция поля составила 7.1 Тл. После небольшой доработки соленоида однородность поля равнялась $5 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. на 1 см вдоль оси Z и $1.5 \cdot 10^{-5}$ отн. ед. в объеме 1 см^3 . Включение тока в обмотки компенсации, в первую очередь радиальных градиентов поля, позволило улучшить однородность поля до $2 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. в объеме 1 см^3 . Ток в обмотках dH/dx , dH/dy не превышал 9 А, а в обмотках dH/dz , d^2H/dz^2 – 3 А.

Нестабильность магнитного поля обеих с.м.с. в замкнутом режиме составила не более 10^{-7} – 10^{-8} отн. ед./ч и обеспечивалась выполнением соединительных контактов холодной сваркой сверхпроводников [5].

Внешний вид второй с.м.с. приведен на рис. 2.

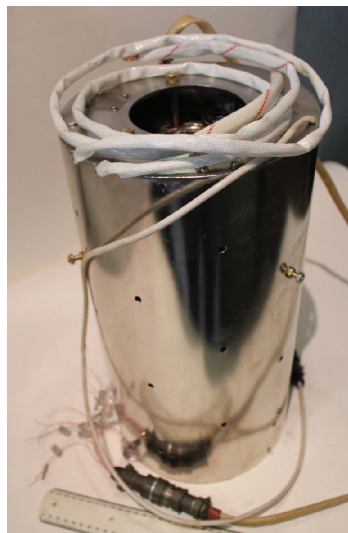


Рис. 2. Внешний вид второй с.м.с.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Сверхпроводниковые магнитные системы разработаны в рамках совместных проектов (договор № 36-06 от 01.11.2006 г. и № 11-10 от 30.11.2010 г.) ДонФТИ им. А.А. Галкина, г. Донецк, Украина и Физической лаборатории “Вихури” департамента физики и астрономии университета г. Турку, Финляндия, где они успешно функционируют в составе радиоспектрометров электронного парамагнитного резонанса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сухой В.В.* // ВАНТ. Серия: Общая и ядерная физика. Харьков: ХФТИ АН УССР, 1983. Вып. 2. № 23. С. 53.
2. *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. М.: Мир, 1971.
3. *Курочкин В.И., Лаптиенко А.Я., Таряник Н.В., Сухой В.В., Шапаренко В.В.* // ПТЭ. 1982. № 6. С. 154.
4. *Назаров В.Б., Забродин В.А., Краинский И.С., Гальперин Л.Н.* // ПТЭ. 1971. № 5. С. 208.
5. *Лаптиенко А.Я., Похолов В.А.* // ВАНТ. Серия: Общая и ядерная физика. Харьков: ХФТИ АН УССР, 1986. Вып. 2. № 6. С. 27.