

СВЕРХПРОВОДНИКОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА СПЕКТРОМЕТРА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА НА ЧАСТОТЕ 400 МГц

© 2022 г. Н. В. Таряник^а, Д. В. Варюхин^а, Д. О. Федюк^{а,*}

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

*e-mail: fediukoleg@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.01.2022 г.

После доработки 01.02.2022 г.

Принята к публикации 17.02.2022 г.

Приведены результаты разработки и исследований сверхпроводниковой магнитной системы с индукцией магнитного поля 9.5 Тл для спектрометра ядерного магнитного резонанса высокого разрешения на частоте 400 МГц. Показана возможность получения высокооднородного и стабильного магнитного поля с индукцией 9.5 Тл в соленоиде с диаметром рабочего отверстия ≥ 80 мм, изготовленном из сверхпроводникового провода сплава HT-50. Применение сверхпроводниковых обмоток компенсации осевых и радиальных градиентов магнитного поля соленоида позволило улучшить однородность поля с $2 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-8}$ отн. ед. в объеме ампулы диаметром 5 мм и высотой 10 мм. Высокая стабильность магнитного поля в “замороженном” режиме на уровне порядка 10^{-8} отн. ед./ч достигается при токе в соленоиде на 6–8% меньше критического.

DOI: 10.31857/S0032816222040140

Известные фирмы Bruker, Varian и Oxford Instruments являются производителями широкого класса сверхпроводниковых магнитных систем, в том числе для спектрометров ядерного магнитного резонанса (я.м.р.). Однако в своих рекламных проспектах они приводят только основные характеристики магнитных систем.

Разработки по созданию сверхпроводниковой магнитной системы с высокой однородностью и стабильностью магнитного поля для спектрометров я.м.р. по протонному резонансу на частоте 200 МГц описаны в работе [1], а на частоте 300 МГц – в работе [2].

Продолжением этих работ является разработка сверхпроводниковой магнитной системы спектрометра я.м.р. высокого разрешения на частоте 400 МГц с индукцией магнитного поля 9.5 Тл.

Сверхпроводниковая магнитная система изготовлена из сверхпроводникового провода сплава HT-50, в ее состав входят сверхпроводниковый соленоид (с.п.с.) и сверхпроводниковые обмотки компенсации осевых и радиальных градиентов магнитного поля (рис. 1).

При разработке с.п.с. исследована возможность использования сверхпроводникового провода с диаметрами 0.5, 0.7 и 0.85 мм для достижения индукции 9.5 Тл.

Максимальная магнитная индукция в с.п.с. обеспечивается путем достижения в нем тока,

близкого к критическому току короткого образца исходного материала. Зависимость критического тока от магнитной индукции $I_{кр}(B)$ для указанных проводов приведена на рис. 2.

Конструктивно с.п.с. состоит из трех коаксиальных секций одинаковой длины. Все три секции заливали компаундом на основе полимерной композиции УП-6-125, а две внутренние – допол-



Рис. 1. Внешний вид с.п.с. и обмоток компенсации градиентов поля.

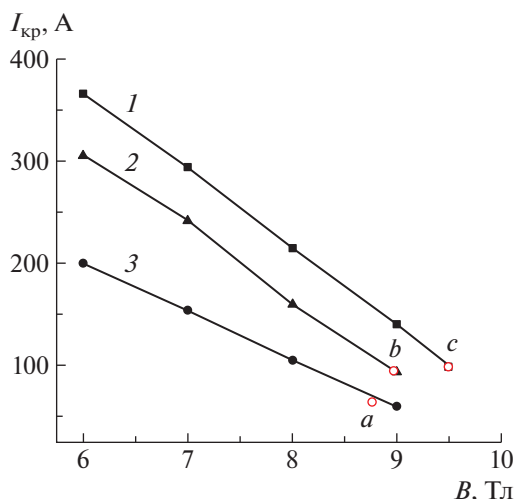


Рис. 2. Зависимость критического тока от индукции магнитного поля для сверхпроводникового провода сплава НТ-50 диаметром: 0.85 (1), 0.7 (2), 0.5 мм (3). Точке *a* соответствует $I = 71.5$ А, $B = 8.8$ Тл; точке *b* – $I = 97.15$ А, $B = 9$ Тл; точке *c* – $I = 91.5$ А, $B = 9.55$ Тл.

нительно бандажировали проволокой марки 12X18Н10Т в два слоя. Величина диаметра внутреннего отверстия с.п.с. ≥ 80 мм выбиралась из условия обеспечения “теплого” вертикального канала рабочего криостата диаметром 50 мм, в котором размещалась сверхпроводниковая магнитная система. Длина обмотки 340 мм определялась необходимостью достижения конечной однородности магнитного поля на уровне 10^{-9} – 10^{-8} отн. ед. в объеме ампулы диаметром 5 мм и высотой 10 мм. Размеры секций с.п.с. приведены в табл. 1.

На первом этапе исследовались характеристики с.п.с., все секции которого изготовлены из сверхпроводникового провода диаметром 0.5 мм. В соленоиде была достигнута индукция 8.8 Тл при токе 71.5 А, что составляет 94% критического тока короткого образца (точка *a* на рис. 2). С учетом зависимости $I_{кр}(B)$ расчеты показали, что для достижения индукции 9.5 Тл магнитная постоянная соленоида должна составлять 0.22 Тл/А, что привело бы к увеличению его массы почти в 2 раза.

На следующем этапе исследовалась возможность применения провода диаметром 0.7 мм с более высокими характеристиками по сравнению с проводом диаметром 0.5 мм (см. кривые 2, 3 на рис. 2). Проводом диаметром 0.7 мм были намотаны шесть внутренних слоев первой секции, на которых магнитное поле достигает максимального значения, а остальная часть секции была намотана проводом диаметром 0.5 мм, при этом магнитная постоянная соленоида уменьшилась с 0.0123 до 0.0107 Тл/А.

При испытаниях соленоида наблюдалась тренировка критического тока. Для ускорения процесса тренировки температура жидкого гелия была понижена до 3 К. При такой температуре критический ток соленоида составил 91.5 А, а индукция магнитного поля – 9.8 Тл. При температуре 4.2 К в с.п.с. были достигнуты ток 86 А и индукция 9.2 Тл (точка *b* на рис. 2). Дальнейшие испытания с.п.с. не проводились, так как достичь индукции 9.5 Тл в данной конструкции не представлялось возможным.

На заключительном этапе исследований использовался провод диаметром 0.85 мм.

После доработки первой секции она содержала четыре слоя провода диаметром 0.85 мм и по шесть слоев провода с диаметрами 0.7 и 0.5 мм. Кроме того, снаружи третьей секции дополнительно было намотано десять слоев провода диаметром 0.5 мм, в результате чего магнитная постоянная с.п.с. увеличилась и составила 0.117 Тл/А. Первое испытание с.п.с. было проведено при температуре 3 К. В соленоид был введен ток величиной 81.5 А, при этом соленоид не переходил в нормальное состояние (индукция составила 9.55 Тл). При повторном испытании с.п.с. при температуре 4.2 К было достигнуто то же значение магнитной индукции, а ток величиной 81.5 А составил 95% от критического тока короткого образца провода диаметром 0.85 мм (точка *c* на рис. 2).

Соединительные контакты в обмотке соленоида выполнены холодной сваркой сверхпроводников, их сопротивление не превышает 10^{-15} – 10^{-12} Ом [3]. Стабильность магнитного поля с.п.с., измеренная автодинным я.м.р.-магнитометром [4], состав-

Таблица 1.

Размеры секций соленоида, мм						Магнитная постоянная секций, Тл/А
Внутренний диаметр	Наружный диаметр	Длина	Размеры внутреннего паза			
			Внутренний диаметр	Наружный диаметр	Длина	
82.6	105.8	340.0	–	–	–	0.048
119.0	141.0	340.0	–	–	–	0.042
157.8	180.4	340.0	157.8	164.7	132.8	0.033

вила $3 \cdot 10^{-8}$, $8 \cdot 10^{-6}$ и $5 \cdot 10^{-5}$ отн. ед./ч в поле с индукцией 8,8, 9,0 и 9,4 Тл соответственно, т.е. при индукции поля свыше 8,8 Тл стабильность поля становится низкой, что свидетельствует о появлении в обмотке с.п.с. сопротивления на уровне порядка 10^{-8} Ом. (Это сопротивление может быть вызвано размытием вольт-амперной характеристики многоволоконного сверхпроводника при токе, близком к критическому [5].) Зона размытия обусловлена геометрической неоднородностью поперечного сечения волокон, зависит от их количества и диаметра. Величина зоны размытия может достигать 6–10% от критического значения тока в зависимости от уровня измеряемого сопротивления. В наших исследованиях область резистивного состояния сверхпроводника имела следующие значения: $\Delta I_{\text{рез}} = I_{\text{кр}} - I_{\text{стаб}} = 81,5 \text{ А} - 75,2 \text{ А} = 6,3 \text{ А}$, что составляет 6,5% от значения критического тока с.п.с., здесь $I_{\text{кр}}$ – критический ток, $I_{\text{стаб}}$ – максимальный рабочий ток, при котором обеспечивается высокая стабильность магнитного поля.

Для повышения стабильности магнитного поля используют сверхпроводниковые стабилизирующие контуры [6], размещение которых в рабочем отверстии соленоида не всегда возможно. Кроме того, такие контуры не обеспечивают повышения стабильности магнитного поля с.п.с. на три порядка.

В данном с.п.с. использован метод повышения стабильности магнитного поля за счет понижения рабочего тока до уровня на 6–10% меньше критического. Для этого была выполнена доработка соленоида, которая заключалась в намотке восьми слоев третьей секции проводом диаметром 0,5 мм, в результате чего магнитная постоянная соленоида увеличилась с 0,117 до 0,125 Тл/А. При испытаниях соленоида была достигнута индукция магнитного поля 9,5 Тл при токе 76 А.

Исходная однородность магнитного поля соленоида в объеме ампулы диаметром 5 мм и высотой 10 мм составила $2 \cdot 10^{-5}$. Для повышения однородности поля с.п.с. были использованы сверхпроводниковые обмотки компенсации осевых dH/dz , d^2H/dz^2 и радиальных dH/dx , dH/dy , $d^2H/dzdx$, $d^2H/dzdy$, $d^2H/d(xy)$ и $d^2H/d(x^2 - y^2)$ градиентов поля [7].

Обмотка компенсации градиента поля dH/dz выполнена в виде двух встречно включенных цилиндрических катушек, а обмотка компенсации d^2H/dz^2 – в виде двух пар цилиндрических катушек, при этом внутренняя пара катушек включена встречно наружной. Обмотки $d^2H/dzdx$ и $d^2H/dzdy$ состоят из двух катушек прямоугольной формы, обмотки dH/dx и dH/dy – из четырех катушек такой же формы, а обмотки $d^2H/d(xy)$ и $d^2H/d(x^2 - y^2)$ – из восьми катушек прямоугольной формы. Все об-

мотки выполнены однослойными, изготовлены из одножильного сверхпроводника диаметром 0,33 мм, соединены последовательно и установлены на отдельном каркасе (см. рис. 1). Каждая обмотка компенсации шунтирована сверхпроводниковым ключом, при этом нагреватели ключей соединены последовательно. Для питания обмоток компенсации использован один источник с выходным током до 15 А, а для питания нагревателей ключей – один источник с выходным током до 0,3 А.

Настройка высокой однородности магнитного поля соленоида с помощью обмоток компенсации выполнялась в два этапа. Сначала осуществлялась настройка однородности поля вдоль оси соленоида обмотками dH/dz и d^2H/dz^2 , при этом для регистрации сигнала я.м.р. использовалась ампула диаметром 2 мм и высотой 3 мм. В качестве спинсодержащего вещества датчика я.м.р. использовалась дистиллированная вода. После достижения значения однородности поля вдоль оси 10^{-6} отн. ед./см и лучше включали обмотки компенсации радиальных градиентов магнитного поля, а сигнал я.м.р. регистрировали в объеме рабочей ампулы диаметром 5 мм и высотой 10 мм. Однородность магнитного поля величиной $5 \cdot 10^{-8}$ отн. ед. была достигнута при следующих значениях тока в обмотках компенсации: 3–4 А в обмотках dH/dz и d^2H/dz^2 ; 7–7,5 А в обмотках dH/dx и dH/dy ; 10–11 А в обмотках $d^2H/dzdx$ и $d^2H/dzdy$. Существенного влияния обмоток компенсации $d^2H/d(xy)$ и $d^2H/d(x^2 - y^2)$ на улучшение однородности магнитного поля соленоида замечено не было.

Стабильность магнитного поля с.п.с. в замкнутом режиме при индукции 9,4 Тл составила $2 \cdot 10^{-8}$ отн. ед./ч, и эта величина не является предельной – скорее, она ограничена временем измерений (8 ч).

ВЫВОДЫ

1. Показана возможность получения магнитного поля с индукцией 9,5 Тл с высокой однородностью и стабильностью в с.п.с. с диаметром отверстия не менее 80 мм, изготовленном из провода сплава НТ-50, для спектрометра я.м.р. высокого разрешения на частоте 400 МГц.
2. Применение сверхпроводниковых обмоток компенсации осевых и радиальных градиентов магнитного поля позволило улучшить однородность поля соленоида от $2 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-8}$ отн. ед. в объеме ампулы диаметром 5 мм и высотой 10 мм.
3. Высокая стабильность магнитного поля в “замороженном” режиме на уровне порядка 10^{-8} отн. ед./ч и лучше достигнута при токе в с.п.с., который на 6–10% меньше критического.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курочкин В.И., Лаптиенко А.Я., Таряник Н.В., Луценко В.В., Сухой В.В. // ПТЭ. 1983. № 2. С. 183.
2. Федюк Д.О., Варюхин Д.В., Прокофьева Л.Н., Таряник Н.В. // ФТВД. 2019. № 1. С. 121.
3. Лаптиенко А.Я., Похилов В.А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика. 1986. Вып. 2. № 6. С. 27.
4. Глуценко А.А., Лаптиенко А.Я., Карагай Н.Н., Курочкин В.И. // Измерительная техника, 1984. № 6. С. 56.
5. Таряник Н.В., Шапаренко В.В. А.с. № 1551150. Класс МКИ³, Н 01F 7/22 // Оpubл. 15.11.1989.
6. Таряник Н.В., Лаптиенко А.Я., Сухой В.В., Курочкин В.И., Карагай Н.Н. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Общая и ядерная физика. 1985. Вып. 1. № 30. С. 79.
7. Назаров В.Б., Забродин Л.А., Краинский И.С., Гальперин Л.А. // ПТЭ. 1971. № 5. С. 208.