

ПРЕЦИЗИОННЫЙ СОЛЕНОИД ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Л.Н. Арапов, Н.С. Диканский, В.И. Кокоулин,
В.И. Куделейнен, В.А. Лебедев, В.В. Пархомчук,
Б.М. Смирнов, Б.Н. Сухина
Институт ядерной физики СО АН СССР
Новосибирск, 630090

Введение

Для проведения исследований по электронному охлаждению в диапазоне малых относительных скоростей частиц¹, а также для антипротонного источника² УНК необходимо было разработать длинный соленоид, создающий достаточно сильное ($1 \div 4$ кГс) магнитное поле с малыми искажениями силовых линий. Величина искажений магнитного поля (B_{\perp}/B_0) определяется требованиями получения максимальной скорости охлаждения. Так, сила трения и декременты затухания при малых относительных скоростях частиц в условиях замагниченности определяются относительно «ровских кружков»³. Для достижения максимальных декрементов охлаждения необходимо¹, чтобы искажения силовых линий магнитного поля не превышали

$$\frac{B_{\perp}}{B_0} \approx \left(\frac{e^2 n^{1/3}}{\epsilon} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Здесь e , n , ϵ — заряд, плотность и энергия электронов в электронном пучке. При исследованиях электронного охлаждения в диапазоне малых относительных скоростей для отделения эффектов, связанных с продольным разбросом скоростей, от эффектов, определяемых искажениями магнитного поля, необходимо выполнение неравенства (1) с большим запасом. Так, при $\epsilon = 470$ эВ, $n = 10^9$ см⁻³ получим $B_{\perp}/B_0 \ll 5 \cdot 10^{-4}$. Изготовление длинного соленоида с такой однородностью магнитного поля является непростой задачей. Традиционный способ намотки соленоида шиной не годится, так как допуски на размеры поперечного сечения шины и смещения отверстия для ее охлаждения составляют $\sim 0,5$ мм. Оценки и измерения, проведенные на НАП-М, показывают⁴, что при таком традиционном способе изготовления соленоида искажения поля будут $B_{\perp}/B_0 \sim 10^{-3}$. Кроме того, большая длина соленоида (3 м, а в проекте² антипротонного источника для УНК 2×100 м) требует секционирования. Поэтому как при разработке и изготовлении соленоида, так и при проведении высокоточных измерений однородности поля требовались принципиально новые решения.

Конструкция соленоида

Нами был выбран вариант точеного соленоида, состоящего из одинаковых секций. Стык секций выполнен таким образом, что не нарушается геометрическая форма спирали, т. е. первый виток второй секции является геометрическим продолжением последнего витка первой секции и т. д. На рис. 1 представлена последовательность основных технологических операций, выполненных при изготовлении секции:

а) черновая проточка спиральной канавки и канавки под трубку охлаждения;

б) навивка и пайка трубки охлаждения, чистовая доработка канавки; для придания секции жесткости спираль помещается в медную трубку с припаянными к ней фланцами из немагнитной нержавеющей стали и заливается эпоксидной смолой;

в) чистовая обработка внутреннего диаметра соленоида, фланцев из нержавеющей стали для центровки и стяжки секций, подгонка контактных поверхностей секций друг к другу.

Медную трубку с фланцами предполагалось первоначально использовать в качестве обратного токопровода, однако магнитные измерения показали, что обратный ток по трубе распределен очень неравномерно, причем есть азимутальная составляющая тока. Скомпенсировать поперечные поля от этих токов трудно, поэтому обратный токопровод был выполнен равномерно расположенными вокруг охлаждаемыми медными трубками $\varnothing 18$ мм. Соединение секций между собой осуществляется стяжкой фланцев клиновыми болтами, приводящими к осевым и азимутальным усилиям, обеспечивающим правильную стыковку секций и токовый контакт. Для уменьшения сопротивления контактов использовался индий, который прокладывался между контактирующими поверхностями и при стяжке секций растекался тонким слоем между ними, заполняя все углубления и обеспечивая надежный контакт. Сопротивление контакта при этом уменьшается в несколько раз по сравнению с контактом между медными посеребренными поверхностями. Толщина прокладки из индия определяется усилием на контакт и составляет приблизительно 0,1 мм.

Схема охлаждения соленоида — параллельная. Вход и выход воды для охлаждения находятся в начале и в конце секции.

Для экранирования от внешних магнитных полей и собирания обратного магнитного потока соленоид помещается в цилиндрический магнитный экран из магнитомягкой стали. Для размагничивания экрана сделана специальная обмотка, создающая в нем азимутальное магнитное поле. В таблице приведены параметры соленоида и точность изготовления секций, необходимые для получения однородности поля $B_{\perp}/B_0 = 10^{-4}$. Соленоид собирается на специальных подставках, имеющих возможность перемещаться в

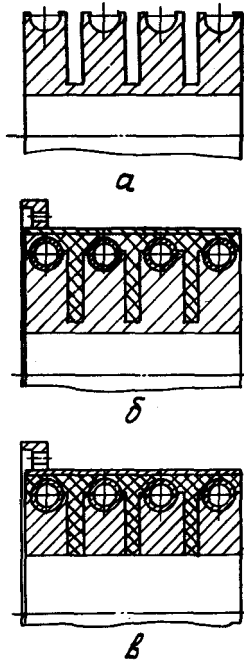


Рис. 1.

двух направлениях. Эта регулировка позволяет выставить секции на ось установки и в небольших пределах менять направление осей секций относительно друг друга. Точность совмещения направлений контролируется автоколлиматором. После окончательной регулировки несоосность секций не превышает 10^{-4} рад.

Таблица

Полная длина соленоида	2,88 м
Длина секции	0,96 м
Количество секций	3
Внутренний диаметр соленоида	200 мм
Наружный диаметр соленоида	280 мм
Шаг спирали	30 мм
Точность изготовления спирали	0,03 мм
Точность укладки трубки охлаждения	0,2 мм
Максимальное магнитное поле	4 кГс
Потребляемая мощность при $B_0=4$ кГс	150 кВт
Ток при $B_0=4$ кГс	9,5 кА
Стабильность тока соленоида и пульсации тока	$<10^{-4}$
Перепад давления воды в системе охлаждения	6 кг/см ²
Расход воды в системе охлаждения	250 л/мин
Перепад температуры между водой, входящей в соленоид, и ее температурой при $B_0=4$ кГс	$<15^\circ$ С
Полное количество корректирующих обмоток	38
Величина поля корректирующих обмоток	до 7 Гс
Стабильность тока корректирующих обмоток	10^{-3}
Точность совмещений секций	$\pm 0,05$ мм

Но даже такая высокая точность изготовления и сборки соленоида позволила получить однородность магнитного поля в основной части соленоида (см. рис. 3) лишь на уровне $5 \cdot 10^{-4}$ рад (здесь мы пренебрегаем искажениями поля на концах соленоида). Искажения поля в основном связаны с неточностью сборки секций на стыках между ними. Это обусловлено следующими причинами. Первое—большие азимутальные усилия при стяжке секций для обеспечения надежного электрического контакта. Из-за деформаций это приводит к смещению секций относительно друг друга и разгибанию витка в месте стыка. Так, смещение секций относительно друг друга всего на 0,2 мм дает поперечные углы в поле на уровне $B_{\perp}/B_0 = \Delta X/4R = 5 \cdot 10^{-4}$ рад. Второе—неидеальность стыка магнитных экранов и отверстия в экранах для подставок под секции и вывода охлаждающей воды.

Для исправления искажений магнитного поля и получения требуемой прямолинейности силовой линии на соленоид накладывались корректирующие обмотки, создающие поперечное поле в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Каждая обмотка состоит из двух катушек, расположенных по разные стороны от оси соленоида, соединенных последовательно и подключенных к одному источнику тока, управляемому от ЭВМ. Полное количество обмоток 38. Из них 22 обмотки (длиной по 24 см) равномерно расположены по длине соленоида. Остальные 16 обмоток были поставлены позднее. Они имеют половинную длину (12 см) и служат для дополнительной коррекции поля на стыках секций.

Магнитные измерения

Для измерения направления магнитной силовой линии использовался метод «магнитной стрелки» (рис. 2). Перпендикулярно плоскому зеркалу 1 был закреплен стержень 2 из магнитомягкой стали длиной

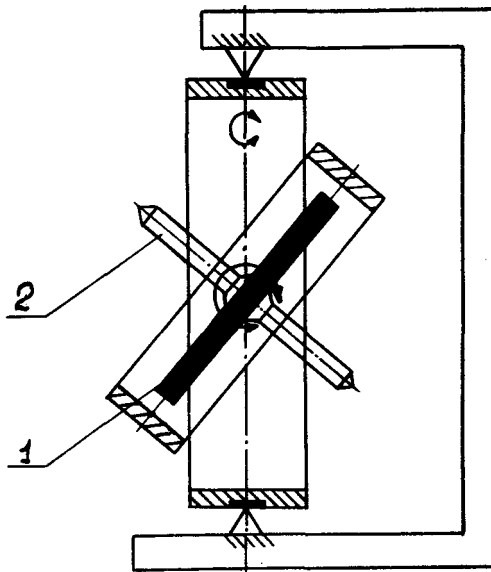


Рис. 2.

20 мм и диаметром 2 мм. Зеркало было изготовлено напылением алюминия на германиевую пластинку с высоким качеством поверхности и имело диаметр 20 мм. Толщина пластинки 2 мм. Зеркало со стержнем тщательно сбалансировано и установлено так, что может свободно вращаться в двух взаимоперпендикулярных плоскостях (рис. 2.) Для уменьшения трения оси вставлены в подшипники из часовых камней. В магнитном поле стальной стержень ориентируется вдоль силовой линии. Величина вращающего момента будет порядка

$$M_{\varphi} \approx \frac{B_0 \cdot B_n}{4\pi} V \varphi, \quad (2)$$

где B_n —поле насыщения стали; φ —отклонение оси стержня от направления магнитного поля; V —объем стержня. Здесь мы считаем, что магнитное поле достаточно велико, чтобы намагнитить стержень вдоль его оси до насыщения. Чувствительность датчика определяется качеством балансировки и трением в подшипниках. Сумма моментов силы трения и силы тяжести (за счет неидеальности балансировки)

$$M_t \approx m_n g (kr + r_c (\sin \varphi_0 - \varphi \cos \varphi_0)). \quad (3)$$

Здесь m_n —масса датчика; g —ускорение свободного падения; r , k —радиус подшипника и коэффициент трения; r_c —вектор из геометрического центра датчика до центра тяжести; φ_0 —угол между векторами \vec{g} , \vec{r}_c . Приравняв (2) и (3), получим угол отклонения датчика от направления магнитного поля

$$\varphi = \frac{m_n g (kr + r_c \sin \varphi_0)}{(B_0 B_n / 4\pi) \cdot V - m_n g r_c \cos \varphi_0}. \quad (4)$$

Отсюда следуют оценки на точность балансировки r_c и чувствительность датчика $\delta\varphi$:

$$r_c \ll \frac{B_0 B_n V}{4\pi m_n g}, \quad (5)$$

$$\delta\varphi \approx \frac{4\pi m_p g k r}{B_0 B_i V} \quad (6)$$

Подставляя $m_p/V = 20 \text{ г/см}^3$, $B_i = 20 \text{ кГс}$, $B_0 = 1 \text{ кГс}$, $k = 0,1$, $r = 10^{-2} \text{ см}$, получим $\delta\varphi = 10^{-5} \text{ рад}$. Измерения показали, что в магнитном поле чувствительность датчика была несколько лучше 10^{-5} рад . Измерение угловых отклонений зеркала проводилось цифровым автоколлиматором АФ-1Ц, который с помощью двух входных регистров был подключен к ЭВМ. Такой метод измерения направления магнитной силовой линии обладает очень высокой точностью и относительно прост. Наибольшую сложность представляют изготовление и балансировка самого датчика.

Для измерения искажения поля вдоль соленоида датчик был закреплен на тележке, которая передвигалась шаговым двигателем. Весь процесс измерений был автоматизирован. На рис. 3 приведен пример измерения неоднородности магнитного поля вдоль оси соленоида.

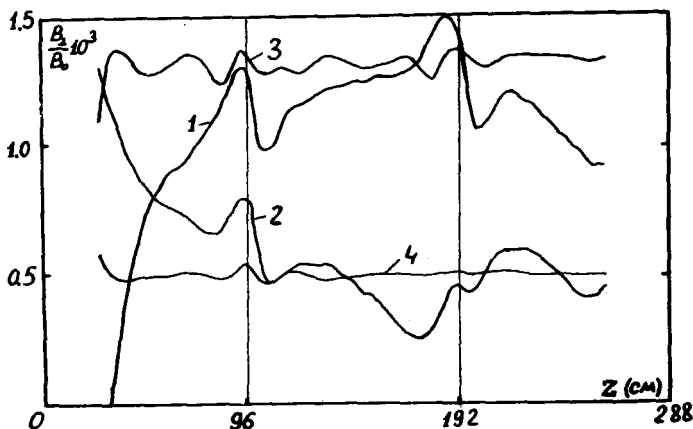


Рис. 3. Искажения магнитного поля по горизонтали (1, 3) и вертикали (2, 4) на оси соленоида. Кривые 1, 2 — без включения корректирующих обмоток, кривые 3, 4 — скорректированное магнитное поле ($\sqrt{\langle B_x^2/B_0^2 \rangle} = 5 \cdot 10^{-5}$; $\sqrt{\langle B_y^2/B_0^2 \rangle} = 4 \cdot 10^{-5}$).

Коррекция магнитного поля проводилась следующим образом. Вначале был измерен «отклик» каждой корректирующей обмотки на единичный ток $B_i(Z_j)$ (i — номер обмотки). После этого проводилось измерение искажений магнитного поля $B_{\perp}(Z_j)$ и методом на-

именных квадратов определялись токи в корректирующих обмотках так, чтобы искажения поля были минимальны. Токи вычислялись при помощи итераций

$$I_i^{n+1} = \frac{\sum_j [B_{\perp}(Z_j) - \sum_k I_k^n B_k(Z_j)] B_i(Z_j)}{\sum_j B_i^2(Z_j)}$$

Для получения приемлемой точности достаточно было сделать 4—5 проходов. Определенные таким образом изменения токов в корректирующих обмотках записывались с помощью ЭВМ в ЦАПы, управляющие этими токами.

На уровне порядка 10^{-4} рад искажения силовой линии начинают нелинейно зависеть от уровня поля, поэтому подбор токов в корректирующих обмотках был проведен для различных значений поля соленоида.

Вакуумная камера и ее содержимое вставлялись в соленоид после окончания магнитных измерений и были изготовлены из немагнитных материалов (медь, титан, тантал, бронза, алюминий).

Результатом проведенной работы является достижение однородности поля (с запасом), удовлетворяющей требованиям достижения максимальной скорости охлаждения. Среднеквадратичные отклонения силовой линии в вертикальной и горизонтальной плоскостях равны соответственно

$$\sqrt{\langle \frac{B_x^2}{B_0^2} \rangle} \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ рад}, \quad \sqrt{\langle \frac{B_y^2}{B_0^2} \rangle} \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ рад}.$$

Заметим, что основной вклад в эти величины дают искажения поля на стыках, а поле внутри секций является более гладким.

Авторы приносят благодарность Г.Ф. Балыкову за изготовление датчика искажений магнитного поля.

Литература

1. Диканский Н.С. и др. Быстрое электронное охлаждение в диапазоне малых относительных скоростей. — Труды настоящей конференции.
2. Всеволожская Т.А. и др. Источник антипротонов для ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ. — Препринт ИЯФ 80-182. Новосибирск, 1980.
3. Диканский Н.С. и др. Изучение быстрого электронного охлаждения. — Препринт ИЯФ 79-56. Новосибирск, 1979.
4. Куделайнен В.И., Мешков И.Н., Салимов Р.А. Установка с электронным пучком для экспериментов по электронному охлаждению. — Препринт ИЯФ 72-70. Новосибирск, 1970; CERN 77-08, pt B, Division PS. — Geneva, 13 April, 1977.