

ОСНОВЫ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ

УДК 537.6

СВЕРХНИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ
ГЕЛИЕВЫЙ ЯДЕРНЫЙ МАГНИТОМЕТР

© Автор, 2024

doi: 10.25210/jfop-2401-OZWREZ | edn: OZWREZ

Цовбун Н. М. — ведущий инженер-электроник, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток

Аннотация

Предлагается принципиальная схема устройства сверхнизкотемпературного гелиевого ядерного магнитометра. Дается краткое описание металлического криостата для создания сверхнизкой температуры. Предлагаются методики получения низких температур и рассматриваются сигналы свободной прецессии.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, криостат, ядерная прецессия

Abstract

A schematic diagram of the design of an ultra-low-temperature helium nuclear magnetometer is proposed. A brief description of a metal cryostat for creating ultra-low temperatures is given. Methods for obtaining low temperatures are proposed and free precession signals are considered.

Keywords: Earth's magnetic field, cryostat, nuclear precession

Введение

В настоящее время для измерения магнитного поля Земли используются протонные, или ядерные, магнитометры на основе стабильного (эталонного) гироманитного отношения ядра атома водорода. Рабочим веществом выбираются жидкости, способные сохранять магнитные моменты после намагничивания в постоянном магнитном поле достаточно долгое время, характеризующиеся так называемой ядерной спин-спиновой T_2 и спин-решёточной T_1 релаксациями.

Недостатком такого магнитометра является то, что в реально достижимых постоянных магнитных полях поляризуется (переходит на верхний энергетический уровень) малое количество элементарных магнитных моментов ядер от их общего числа в рабочем веществе. При комнатной температуре и слабых полях, например в земном поле, степень поляризации для протонов при комнатной температуре $V_1 = 1.7 \times 10^{-10}$, а для наблюдения магнитного резонанса в этих условиях используют предварительную поляризацию образца в поле 100–500 эрстед, при этом степень поляризации образца возрастает в 200–1000 раз [1].

Для увеличения степени поляризации ядер используют динамическую поляризацию ядер на основе идеи Оверхаузера, повышающую поляризацию еще в 600 раз. Существующие магнитометры с динамической поляризацией ядер используют в качестве рабочего вещества дисульфат пероксиламин $K_2[(SO_3)_2NO]$, так же, как и современные растворы радикалов, которые не могут находиться в жидком состоянии при низкой температуре и не смогут быть пригодным для динамической поляризации. Однако предварительный анализ показывает [1], что имеется принципиальная возможность найти такое вещество, способное работать при температурах около 0.3 К. Это позволило бы увеличить чувствительность ещё на два порядка.

В данной статье предлагается использовать сверхнизкие температуры для измерения магнитных полей с высоким разрешением и точностью, благодаря кратному увеличению времени прецессии.

В настоящий момент большой научный интерес вызывает исследование процессов, протекающих в веществе при сверхнизких температурах и физических полей, порождаемых ими. Например, интенсивно развиваются теории квантовых компьютеров и ультрахолодных атомов. Прогресс в этой области был отмечен Нобелевской премией по физике 2012 года, которую получили Дэвид Вайнлэнд (США) и Серж Арош (Франция). Нобелевский комитет сформулировал их достижения следующим образом: «создание прорывных технологий манипулирования квантовыми системами, которые сделали возможным измерение отдельных квантовых систем и управление ими». В этом же ряду Нобелевская премия по физике 2018 г., присуждённая Артуру Эшкину (США) за оптический пинцет, и Нобелевская премия по физике 2022 г., которую получили Антон Цайлингер (Австрия), Ален Аспе (Франция) и Джон Клаузер (США) за исследования квантово-перепутанных состояний фотонов. Появились экспериментальные работы с более убедительной демонстрацией квантового превосходства за счёт больших вычислительных ресурсов квантового процессора — как сверхпроводящего, так и фотонного [2].



Принципы построения сверхнизкотемпературного гелиевого ядерного магнитометра

Важнейшим параметром, определяющим чувствительность ядерного магнитометра, является отношение сигнал/шум. Уравнение для начальной амплитуды сигнала свободной ядерной прецессии после приложения импульса, поворачивающего вектор ядерной намагниченности на 90° , имеет следующий вид [3]:

$$U_0 = \frac{2N_0 H_0 \gamma Q S \xi W}{3kT}, \quad (1)$$

где N_0 — число прецессирующих ядер, H_0 — постоянное поляризирующее поле, γ — гиромагнитное отношение ядра, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, Q — добротность приёмного контура, S — площадь поперечного сечения катушки, W — число витков катушки, ξ — фактор заполнения контура. Этот сигнал прецессирует с частотой Ларморовской прецессии $\omega = \gamma H_1$ (где H_1 — величина измеряемого поля) и уменьшается по закону $U_c = U_0 \exp(-t/T_2)$, где T_2 — время ядерной спин-спиновой релаксации. Общая ядерная намагниченность падает также по экспоненциальному закону и характеризуется временем спин-решёточной релаксации T_1 . Время T_1 определяет время непрерывной работы магнитометра после выключения поляризирующего поля H_0 , т.к. свободную прецессию после её окончания (окончания не очень короткого времени T_2) можно просто получить, восстанавливая суммарный вектор 180° импульсом. Время T_1 определяет также продолжительность поляризации ядер постоянным магнитным полем H_0 и для полной поляризации ядер при данной температуре берётся равной $(5 \div 10)T_1$.

Уравнение, определяющее среднеквадратичную амплитуду шума, записывается уравнением Найквиста и имеет вид [3]

$$U_w = \sqrt{4kT\Delta\omega(R_{шк} + R_{шy})}, \quad (2)$$

где $R_{шк}$ — активное шумовое сопротивление приёмной катушки, $R_{шy}$ — активное шумовое сопротивление усилительного устройства, $\Delta\omega$ — полоса пропускания усилительного тракта. Тогда уравнение, определяющее отношение сигнал/шум, имеет вид [4]

$$\frac{U_c}{U_w} = \frac{N_0 H_0 \gamma Q S \xi W}{3(kT)^{3/2} \Delta\omega^{1/2} (R_{шк} + R_{шy})} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right). \quad (3)$$

Из анализа этого отношения видно, что уменьшение температуры является основным путём, позволяющим существенно увеличить чувствительность магнитометра.

Действительно, уменьшение температуры до 0.3°K , что сравнительно нетрудно осуществить на простой установке [1], увеличивает отношение сигнал/шум в 1300 раз.

Для увеличения степени поляризации ядер, от которых зависит амплитуда сигнала, а значит чувствительность и точность измерений, нужно их поляризовать при низкой и сверхнизкой температурах. Аппаратура для получения температуры 0.3 К состоит из двух дьюаров с общим вакуумом и азотным экраном в пальце. Вакуумное пространство сосудов откачивается только форвакуумным насосом, что позволяет после залива азота быстро охладить внутренние части прибора. Внутри немагнитного дьюара находится при сверхнизких температурах для поляризации сверхпроводящий соленоид, что увеличит поляризирующее поле в 100 раз (500 Гс — поляризирующее поле в существующих соленоидах, по сравнению с 50 000 Гс сверхпроводящего соленоида). Кроме того, использование сверхпроводящего соленоида и для приема прецессирующего ядерного сигнала приведёт к увеличению добротности приемного контура более чем в 1000 раз ($Q = 100$ в существующих магнитометрах по сравнению с $Q > 10^5$ для сверхпроводящего приёмного соленоида). Тогда общая полоса пропускания приёмного тракта будет определяться входным контуром, а полосой пропускания самого усилителя ($\Delta\omega^{1/2}$) можно пренебречь. Далее произойдёт также снижение активного сопротивления шумов контура ($R_{шк}$) до очень малой величины. Таким образом, уровень шума всего усилительного тракта будет определяться шумами первого каскада усилителя, а его, в свою очередь, можно уменьшить на несколько порядков [5], помещая входной усилительный элемент в зону низких температур. Тем самым получим выигрыш больше 10^2 . Кроме того, уровень шума первого каскада усилителя можно уменьшить, включая параллельно несколько транзисторов или применяя транзисторы с увеличенными размерами перехода [6]. Дальнейший путь повышения чувствительности магнитометра — это нахождение рабочего вещества, способного при сверхнизкой температуре производить динамическую поляризацию ядер. Самым существенным моментом в предлагаемом магнитометре является то, что рабочим ядерным веществом служит сам He^3 . Измерения, проведённые в Ленинградском государственном университете, показали, что при температуре 1.2 К He^3 находится в жидком состоянии и имеет время спин-решёточной релаксации T_1 порядка 10 минут, при 1 К — около 20 минут. Добавление 15% He^3 увеличивает это время до часа и более [7].

Экспериментальные измерения показали, что времена релаксации He^3 можно увеличить до нескольких десятков часов, снижая температуру до 0.3 К и добавляя He^4 . Снижение температуры до 0.003 К, видимо, приведёт к ещё большему удлинению времени T_1 спин-решёточной релаксации. Получение таких низких температур в данном случае произойдёт автоматически за счёт адиабатического размагничивания при добавлении в жидкий He^3 жидкого He^4 [8]. Как видим, понижение температуры не только существенно увеличивает чувствительность магнитометра, но и, что не менее важно, удлиняет времена релаксации рабочего вещества до нескольких дней и более. А это, в свою очередь, не менее важно, т.к. позволяет практически измерять магнитные поля в непрерывном режиме.

При этом уменьшается нагрев сверхнизкотемпературной гелиевой ванны, упрощается схема переключения сверхпроводящего поляризующего соленоида (времена для устранения переходных процессов будут вполне достаточно), упрощается конструкция магнитометра и т.д. В существующих магнитометрах, при времени релаксации 2–10 с, время переходных процессов длится более 20 мкс и занимает существенную часть рабочего времени.

Выбор в качестве рабочего вещества ядра He^3 , видимо, является единственно приемлемым, т.к. другие ядра, имеющие большое гиромагнитное отношение γ , при сверхнизких температурах будут находиться в твёрдом состоянии и иметь очень короткое время T_2 (порядка 10^{-5} с) при очень длинных T_1 . Короткие времена релаксации T_2 не позволят технически просто осуществить восстановление свободной прецессии и понизят точность магнитометра.

Амплитуда сигнала при этом уменьшится в 0.443 раза, т.к. относительная интенсивность сигнала при равных полях поляризаций для $\text{He}^3 = 0.443$. Для других ядер с большим γ будут такие значения

$$H^1 = 1, F^{19} = 0.83, CO^{59} = 0.28 \text{ и т.д. [2].}$$

Таким образом, в настоящее время существующие ядерные магнитометры, не использующие сверхнизкие температуры и динамическую поляризацию, имеют чувствительность 10^{-5} – 10^{-6} Гс. С динамической поляризацией эта чувствительность повышается до 10^{-8} Гс. При этом магнитометры имеют импульсный режим работы следующего вида: 2 секунды измерения поля и 15 секунд идёт на поляризацию ядер.

При температурах 0.3 К магнитометр будет иметь выигрыш в отношении сигнал/шум в 6×10^9 раз, что позволит увеличить чувствительность магнитометров без динамической поляризации до 6×10^{15} Гс, с динамической поляризацией до 6×10^{17} Гс. Естественно, долговременное измерение магнитных полей с такой точностью в настоящее время, видимо, невозможно, т.к. долговременная относительная стабильность опорной частоты квантовых стандартов, относительно которой необходимо производить измерения, не превышает 10^{-13} Гц в год (точность 0.5×10^{-12} Гц в год). Однако кратковременные относительные измерения таких малых полей могут иметь практическое применение.

Из выше приведённого следует, что поляризация рабочего вещества (в качестве которого выбран He^3) при сверхнизких температурах увеличивает чувствительность и время непрерывной работы магнитометра до величин, которые невозможно в настоящее время получить каким-либо другим известным нам способом. Применение сверхнизкотемпературного гелиевого ядерного магнитометра для проведения измерений магнитного поля Земли с околоземной орбиты позволит повысить точность и частоту измерений магнитного поля Земли на качественно более высоком уровне.

Заключение

Предполагаемая принципиальная схема сверхнизкотемпературного гелиевого ядерного магнитометра предназначена для измерения полного вектора напряжённости магнитного поля, а также имеет преимущество относительно трехкомпонентного магнитометра Джозефсона, зависящего от точности установки ортогональности компонент.

В конце семидесятых и начале восьмидесятых годов мы с Арнольдом Ивановичем Черницыным занимались непродолжительное время сверхнизкотемпературным гелиевым ядерным магнитометром. В то время элементная база была на значительно более низком уровне, что создало трудности при дальнейшем развитии наших исследований. Несмотря на это, Арнольду Ивановичу Черницыну удалось впервые в мире достичь в 1964 году температуру 0.3 К, о чем сообщается в [1]. Сейчас, когда создание отечественных высокочувствительных приборов является необходимым условием не только развития, но и выживания российской науки и промышленности, эти исследования стали опять актуальными.

Работа выполнена в рамках Федеральной программы «Изучение структуры, физических и вещественных характеристик и геодинамики литосферы, сейсмической активности и закономерностей размещения полезных ископаемых в регионе дальневосточных морей и северо-западном секторе Тихого океана», рег. № 124022100082-4.

Список литературы

1. Корепанов В.Д., Черницын А.И., Швец А.Д. Аппаратура для исследования ЯМР при температурах до 0.30 К // ПТЭ. 1965. № 3. С. 139–141.
2. Бетеров И.И. Квантовые компьютеры и ультрахолодные атомы // Природа. 2023. № 4. С. 3–13.
DOI: 10.7868/S0032874X23040014
3. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972. 448 с.
4. Абрагам А. Ядерный магнетизм. М.: Из-во иностранной литературы, 1963. 551 с.
5. Леше А. Ядерная индукция. М.: Из-во Ин. лит, 1963. 234 с.
6. Волгин Л.И., Левченко Д.Г., Зарукин А.И., Багимов А.И., Вязовкин А.А. Малошумящий селективный усилитель // ПТЭ. 1980. № 1. С. 134–137.
7. Морозов А.А. Ядерно-резонансный генератор с динамической поляризацией ядер в магнитном поле земли // Ядерный магнитный резонанс. 1969. С. 138–145.
8. Бородин П.М., Мельников А.В., Морозов А.А., Чернышев Ю.С. Ядерный магнитный резонанс в земном поле. Л.: изд-во ЛГУ, 1965. 232 с.

Поступила 06 февраля 2024 г.

ULTRA-LOW TEMPERATURE HELIUM NUCLEAR MAGNETOMETER

TSOVBUN N.M.

doi: 10.25210/jfop-2401-OZWREZ | edn: OZWREZ

A schematic diagram of the design of an ultra-low-temperature helium nuclear magnetometer is proposed. A brief description of a metal cryostat for creating ultra-low temperatures is given. Methods for obtaining low temperatures are proposed and free precession signals are considered.