

12

## Квантовый магнитометр для стабилизации нейтронного магнитного резонанса

© Е.Б. Александров, М.В. Балабас, С.П. Дмитриев,  
Н.А. Доватор, А.И. Иванов, М.И. Карузин,  
В.Н. Кулясов, А.С. Пазгалев, А.П. Серебров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
Всероссийский научный центр „Государственный оптический институт  
им. С.И. Вавилова“, С.-Петербург  
С.-Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН,  
Гатчина  
E-mail: nicolai.dovator@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 10 февраля 2006 г.

Описывается конструкция магнитометра на парах цезия, предназначенного для стабилизации нейтронного резонанса в эксперименте по поиску электрического дипольного момента нейтрона. Обосновывается выбор такого типа магнитометра и приводится оценка его чувствительности.

PACS: 07.55.Ge

Поиск электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона является одной из принципиальных задач фундаментальной физики [1]. Достигнутая на сегодняшний момент точность определения ЭДМ-нейтрона составляет величину  $d = 6.3 \cdot 10^{-26} \text{e} \cdot \text{cm}$  [2]. В настоящее время планируется постановка нового эксперимента по поиску ЭДМ с расчетной точностью  $10^{-27} - 10^{-28} \text{e} \cdot \text{cm}$ . С этой целью создается ЭДМ-спектрометр [3] с 4 нейтронными камерами общим объемом 30 л и повышенной напряженностью электрического поля (до 30 kV/cm).

Как известно, суть ЭДМ-эксперимента заключается в регистрации сдвига частоты магнитного резонанса сверххолодных нейтронов при включении и последующем реверсировании статического электрического поля. Из-за малости ожидаемого сдвига частоты (на уровне  $\sim 10^{-8}$  а.у.) ключевым элементом ЭДМ-спектрометра становится система стабилизации нейтронного магнитного резонанса.

В подготавливаемом эксперименте будут использоваться две системы стабилизации: пассивная в виде многослойного пермаллового

экрана, что позволяет существенно (до 5000 и более раз) снизить влияние внешних помех на магнитное поле (средняя величина магнитного поля внутри экрана  $B = 2000$  нТ задается с помощью соленоида, запитанного от источника высокостабильного тока) внутри нейтронных камер, а также активная, заключающаяся в производстве резонансного радиочастотного (РЧ) поля для нейтронов, частота которого изменяется в соответствии с остаточными вариациями магнитного поля внутри экрана, что в конечном счете и будет обеспечивать автоматическое поддержание нейтронных резонансных условий с требуемой точностью.

Для контроля внутреннего магнитного поля предполагается использовать 16 магнитоизмерительных датчиков, расположенных вокруг нейтронных камер (по четыре магнитометра для каждой камеры). Путем считывания их показаний и последующей обработки будет вырабатываться резонансное РЧ-поле для ультрахолодных нейтронов. Расчеты, проведенные при подготовке нового эксперимента с применением многокамерной конструкции ЭДМ-спектрометра, показывают, что для достижения чувствительности измерений электродипольного момента нейтрона  $\sim 2 \cdot 10^{-28} \text{e} \cdot \text{cm}$  абсолютная точность поддержания нейтронных резонансных условий (выраженная в виде аллановской дисперсии нестабильности магнитного поля) должна составлять  $\leq 1$  рТ для времени измерений  $\tau = 100\text{--}1000$  с. Это означает, что чувствительность магнитоизмерительных датчиков, предназначенных для контроля магнитного поля и выработки резонансного РЧ-поля для нейтронов, должна быть по крайней мере не хуже этой величины.

В качестве датчика магнитного поля было решено использовать квантовый магнитометр, основанный на оптической накачке атомов цезия и работающий в самогенерирующем режиме. Такой выбор обусловлен следующими причинами:

а) возможностью получения высокой чувствительности к вариациям магнитного поля, что связано с использованием цезиевых ячеек с антирелаксационным парафиновым покрытием, существенно увеличивающим времена спиновой релаксации до  $T_{1,2} \sim s$ , а также тем, что в поле  $B_0 = 2000$  нТ (рабочее поле для ЭДМ-спектрометра) происходит „схлопывание“ соседних магнитодипольных переходов ( $\Delta F = 0$ ,  $\Delta m_F = 1$ ) верхнего ( $F = 4$ ) сверхтонкого уровня  $6^2S_{1/2}$ -состояния атомов цезия, приводящее к достижению достаточно узкой резонансной линии цезия ( $\sim 1$  нТ) и малым сдвигам частоты магнитного резонанса;

б) возможностью работы при комнатной температуре из-за оптимального давления паров цезия при  $T \sim 20^\circ\text{C}$ , что существенно упро-

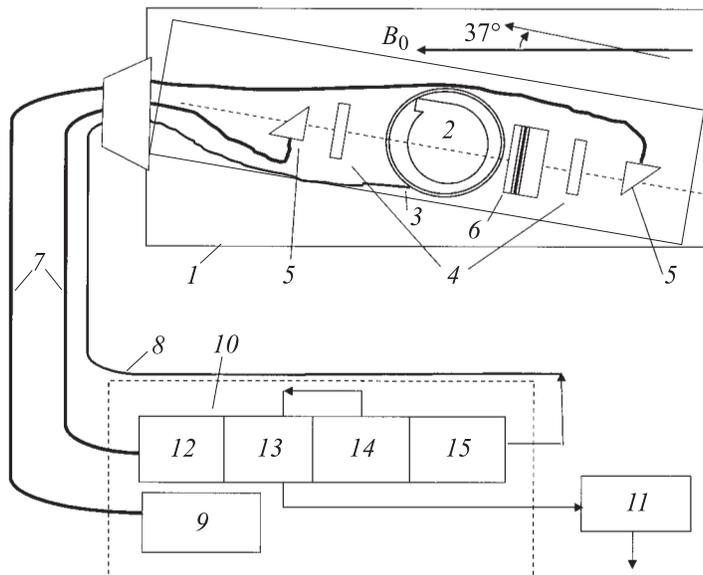
щает как конструкцию магнитометра, так и всего ЭДМ-спектрометра в целом;

в) возможностью применения отработанной конструкции малошумящего источника оптической накачки, основанного на использовании цезиевой спектральной лампы с ВЧ-разрядом;

г) возможностью построения самогенерирующей схемы ( $M_x$ -типа) квантового магнитометра, основанной на эффективной регистрации сигнала ларморовской прецессии атомов цезия и отличающейся повышенным быстродействием измерений  $t \sim T_{Cs}$ , где  $T_{Cs}$  — период ларморовской прецессии атомов цезия [4];

д) возможностью простого синтеза частоты нейтронного резонанса, так как соотношение между частотами магнитного резонанса атомов цезия и нейтронов  $\gamma_{Cs}/\gamma_n = 119.9$  близко к целочисленному значению 120 ( $\gamma_{Cs}$ ,  $\gamma_n$  — соответствующие гиромагнитные отношения). Таким образом, для выработки нейтронного резонансного РЧ-поля можно будет использовать простой аналоговый делитель (на 120) выходной частоты цезиевого магнитометра с точной подгонкой под частоту нейтронного резонанса путем небольшого изменения выходной частоты магнитометра с помощью управляемого фазовращателя в цепи обратной связи. Блок-схема цезиевого магнитометра, разработанного для ЭДМ-спектрометра, представлена на рис. 1. Этот магнитометр состоит из магнитооптического датчика и электронного блока.

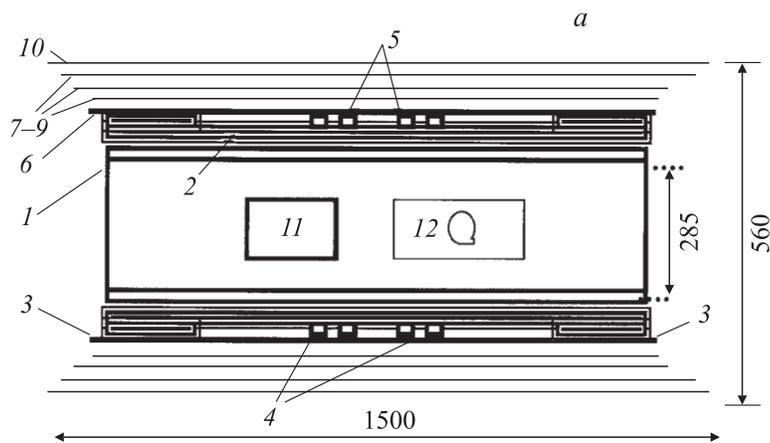
Магнитооптический датчик имеет вид пластикового цилиндра диаметром 10 см и длиной 20 см с двумя крышками, выполненными из оргстекла. Внутри пластиковой трубы размещается каркас из оргстекла, содержащий сферическую ячейку — вакуумированный стеклянный баллон диаметром 7 см с маленьким боковым отростком, в котором находится капля металлического цезия. Для уменьшения спиновой релаксации ориентированных атомов цезия внутренняя поверхность ячейки покрыта тонким слоем парафина. Внутренний каркас содержит также все необходимые оптические элементы: линзы, интерференционный фильтр, пропускающий только резонансную  $D_1$ -линию цезия, циркулярный поляризатор и призмы, использующиеся для поворота светового луча. Магнитный резонанс атомов цезия в ячейке возбуждается радиочастотным магнитным полем на частоте около 7 кГц с помощью пары РЧ-катушек, размещенных около ячейки. Входной световод (в конструкции использовались многожильные световоды нерегулярного типа) передает свет от цезиевой спектральной лампы



**Рис. 1.** Блок-схема магнитометра: 1 — платформа, 2 — рабочая ячейка, 3 — РЧ-катушки, 4 — линзы, 5 — призма, 6 — циркулярный поляризатор +  $D_1$ -фильтр, 7 — световоды, 8 — РЧ-кабель, 9 — блок спектральной лампы, 10 — усилитель обратной связи, 11 — частотомер, 12 — фотодиод, 13 — широкополосный усилитель, 14 — автоматическая регулировка усиления, 15 — фазовращатель.

в магнитооптический датчик с целью оптической накачки цезиевых атомов, а выходной световод передает свет, прошедший через ячейку, на фотодиод, чтобы зарегистрировать модуляцию интенсивности света, происходящую в результате спиновой прецессии атомов цезия.

Электронный блок состоит из усилителя обратной связи и стабилизированного по току ВЧ-генератора, возбуждающего разряд в цезиевой спектральной лампе. В свою очередь, усилитель обратной связи (см. рис. 1) состоит из фотодиода ФД (использовался малошумящий кремниевый фотодиод с  $p-i-n$ -структурой), широкополосного усилителя УШ с полосой пропускания 0.01–20 кГц, выполненного с использованием микросхем с низким уровнем шума, фазовращателя ФВ с возможностью



**Рис. 2.** *a* — лабораторная магнитная система, предназначенная для настройки и испытания цезиевого магнитометра (размеры в см): 1 — корпус соленоида, 2 — основная обмотка соленоида, 3 — корректирующие катушки, 4 — модуляционные кольца, 5 — кольца протяжки поля, 6 — внутренний экран — „Армко“, 7–9 — основные оболочки экрана „пермаллой 79НМ“, 10 — защитный экран „Армко“, 11 — магнитометр стабилизатора поля, 12 — исследуемый магнитометр; *b* — зависимость выходного сигнала цезиевого магнитометра, полученная путем сканирования частоты внешнего РЧ-генератора, подключенного к его РЧ-катушкам. На том же рисунке представлена запись внутреннего шума магнитометра (полученная при отключенном РЧ-генераторе).

регулировки фазы, а также системы автоматической регулировки усиления АРУ, необходимой для стабилизации тока, питающего РЧ-катушки магнитометра. Чтобы обеспечить температурную независимость фазового сдвига усилителя обратной связи, мы применяли пассивные электронные компоненты с высокой температурной стабильностью.

Рабочий макет магнитометра был испытан и настроен с помощью экранированной лабораторной установки (рис. 2, *a*), состоящей из многослойного ферромагнитного экрана, соленоида с системой коррекции градиента вдоль его оси и системы активной стабилизации внутреннего магнитного поля. Установка обеспечивала магнитное поле с индукцией  $B \sim 2000$  нТ с однородностью  $0.2$  нТ/см в двух зонах протяженностью  $\sim 10$  см. Система стабилизации поля [5], основанная на использовании

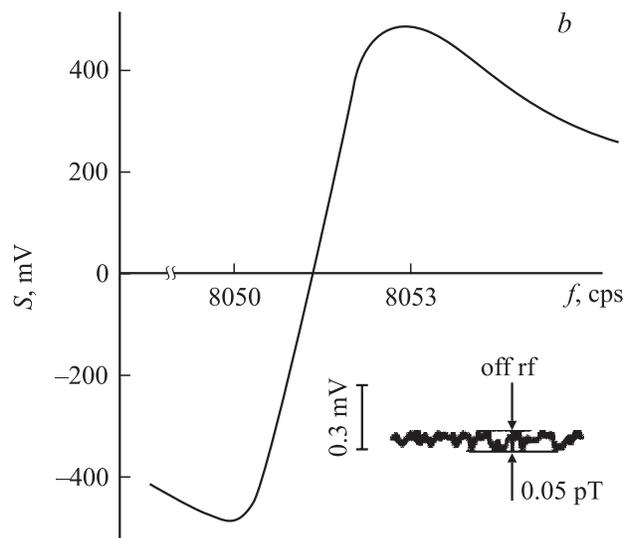


Рис. 2 (продолжение).

в качестве магниточувствительного датчика квантового магнитометра  $M_z$ -типа, позволяла снизить остаточные вариации магнитного поля до уровня не хуже 0.02 nT за время наблюдения 1 min при постоянной времени регистрирующего тракта 1 s.

Для определения потенциальной магнитовариационной чувствительности цезиевого магнитометра была использована обычная методика, заключающаяся в записи сигнала спиновой прецессии атомов цезия при разомкнутой петле обратной связи, а также характерных шумов макета при выключенном радиополе. Пример зависимости выходного сигнала магнитометра (использовалась процедура синхронного детектирования выходного сигнала) от частоты ( $f$ ) высокостабильного внешнего генератора, подключенного к РЧ-катушкам, представлен на рис. 2, *b*. Для расчета чувствительности мы использовали стандартную формулу

$$\delta B_{p-t-p} = (\gamma/2\pi)^{-1} N (dS/df)^{-1} \text{ при } \tau = T_{sd}, \quad (1)$$

где  $\delta B_{p-t-p}$  — минимальное (peak-to-peak) изменение магнитного поля, фиксируемое магнитометром,  $dS/df$  — крутизна выходного сигнала ( $S$ )

магнитометра вблизи резонансной частоты,  $N$  — размах шумового напряжения (регистрируемое при времени усреднения  $\tau$ ) на выходе усилителя при выключенном РЧ-поле,  $T_{sd}$  — постоянная времени синхронного детектирования. В соответствии с выражением (1) и измеренными значениями  $S$  и  $N$  (см. рис. 2,  $b$ ) потенциальная чувствительность нашего магнитометра составляет величину  $\delta B_{p-t-p} = 50$  фТ при времени усреднения  $\tau = 1$  с. При пересчете на характерные времена усреднения данных в планируемом ЭДМ-эксперименте (например,  $\tau = 100$  с) мы имеем теоретическую чувствительность магнитометра, выраженную в виде среднеквадратичной величины для нестабильности магнитного поля:

$$\sigma_{rms}(\delta B, \tau = 100 \text{ s}) \sim 0.85 \text{ фТ (с учетом того, что } \delta B_{p-t-p} \sim 6 \sigma_{rms}).$$

При этом предполагается, что временная зависимость шума имеет вид  $N(\tau) \sim \tau^{-1/2}$ , поскольку основным источником шума в магнитометре является дробовой шум фотодетектора при его засветке от цезиевой лампы.

Полученная таким образом оценка чувствительности разработанного квантового магнитометра показывает его полную пригодность для построения многоканальной системы стабилизации нейтронного магнитного резонанса.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 04-02-17440, 05-02-17826) и ОФН РАН (программа „Оптическая спектроскопия и стандарты частоты“).

## Список литературы

- [1] Кландор-Клайнротхаус Г.В., Штаудт А. Неускорительная физика элементарных частиц. М.: Наука, Физматлит, 1997. 528.
- [2] Алтарев И.С., Борисов Ю.В. и др. // ЯФ. 1996. Т. 59. № 7. С. 1204–1224.
- [3] <http://nrd.pnpi.spb.ru/LabSereb/edm2005.pdf>.
- [4] Dyal P., Johnson R., Giles J. // RSI. 1969. V. 40. N 4. P. 601–604.
- [5] Блинов Е.В., Дмитриев С.П., Кулешов П.П., Окуневич А.И. // Тез. ВСООАМ. Л.: ФТИ, 1986. С. 52.