

Градиентометрические исследования квантового магнитометра на парах цезия

© Е.Б. Александров,¹ М.В. Балабас,² С.П. Дмитриев,¹ Н.А. Доватор,¹ А.И. Иванов,² И.А. Краснощекова,³ В.Н. Кулясов,² В.В. Марченков,³ А.С. Пазгалев,¹ А.П. Серебров,³ В.А. Соловей,³ Г.Е. Шмелев³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,

194021 Санкт-Петербург, Россия

² Всероссийский научный центр „Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова“,

199034 Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН,

Санкт-Петербург, Россия

e-mail: nicolai.dovator@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 3 августа 2006 г.)

Описаны эксперименты по определению чувствительности и оптического сдвига выходной частоты магнитометра, основанного на оптической накачке атомов цезия и предназначенного для системы стабилизации нейтрального магнитного резонанса. Для этих экспериментов была использована градиентометрическая схема, позволяющая существенно уменьшить влияние вариаций магнитного поля на результаты измерений.

PACS: 07.55.Ge

Для изготавливаемого в настоящее время спектрометра [1], предназначенного для измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона с проектной точностью $10^{-27} - 10^{-28}$ е · см, будет использоваться 16-канальная система стабилизации нейтронного магнитного резонанса. В качестве базового элемента для такой системы был выбран магнитометр, основанный на оптической накачке атомов цезия и работающий в самогенерирующем режиме. Была разработана конструкция цезиевого магнитометра и изготовлен его рабочий макет [2]. Теоретический расчет, проведенный с учетом выходных параметров цезиевого магнитометра (таких, как крутизна сигнала цезиевого магнитного резонанса и соотношение сигнал/шум), дал значение его потенциальной чувствительности к вариациям магнитного поля ~ 1 фТ при времени измерений 100 с, что существенно превышает требуемую величину стабильности нейтронных резонансных условий (≤ 1 рТ) для планируемого ЭДМ-эксперимента.

Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию магнитовариационной чувствительности созданного цезиевого магнитометра. Были также проведены исследования другого магнитометрического параметра, а именно оптического сдвига выходной частоты магнитометра, особенно важного в свете долговременных (~ 1000 и более) измерений ЭДМ-нейтрона.

Лабораторная проверка магнитовариационной чувствительности порядка 1 фТ является достаточно сложной задачей как из-за естественных вариаций земного магнитного поля, так и наличия промышленных магнитных помех, которые, хотя и существенно подавляются с помощью ферромагнитного экрана, но тем не менее являются преобладающими источниками остаточных магнитных вариаций внутри него. Поэтому для экспериментального определения чувствительности

квантового магнитометра была использована градиентометрическая схема, состоящая из двух идентичных цезиевых магнитометров, размещаемых внутри экрана. Испытания проводились в ферромагнитном экране (с коэффициентом продольного экранирования ~ 1500), установленном вначале в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ, Гатчина, Россия), а затем в Paul-Scherrer Institute (PSI, Villigen, Швейцария). Для создания рабочего поля ЭДМ-спектрометра $B = 2000$ нТ использовался соленоид с корректирующими катушками, расположенный внутри экрана и запитанный от высокостабильного ($\delta I/I \sim 10^{-7}$) источника постоянного тока.

Суть измерений заключалась в том, что мы регистрировали разность показаний двух цезиевых магнитометров (расположенных вдоль оси соленоида, как можно ближе друг к другу), которая в приближении отсутствия градиента остаточных магнитных вариаций внутри экрана должна соответствовать суммарному собственному шуму магнитометров. С целью исключения переменной магнитной наводки от одного датчика на другой (из-за магнитного поля, создаваемого катушками) на каждый датчик одевался цилиндрический экран, изготовленный из алюминия толщиной 1.5 мм. Данные обработки (двухточечная аллановская дисперсия [3] разности показаний для различных времен усреднения) разности выходных частот этих магнитометров представлены на рис. 1, а. Как видно из этого рисунка, аллановская дисперсия такой разности (пересчитанная в единицах магнитной индукции $(B_1 - B_2) = (\gamma/2\pi)^{-1} \times (f_1 - f_2)$, где $\gamma/2\pi = 3.5$ Hz/nT, $f_{1,2}$ — выходные частоты магнитометров) имеет наименьшее значение $\sigma_a(B_1 - B_2) = 150$ фТ при $\tau = 20$ с. С учетом некоррелированности шумов двух независимых магнитометров имеем экспериментальную оценку чувствительности цезиевого магнитометра $\sigma_a(\delta B, \tau = 50 \text{ s}) = 2^{-1/2} \sigma_a(B_1 - B_2) \sim 110$ фТ. Расхождение оценок чув-

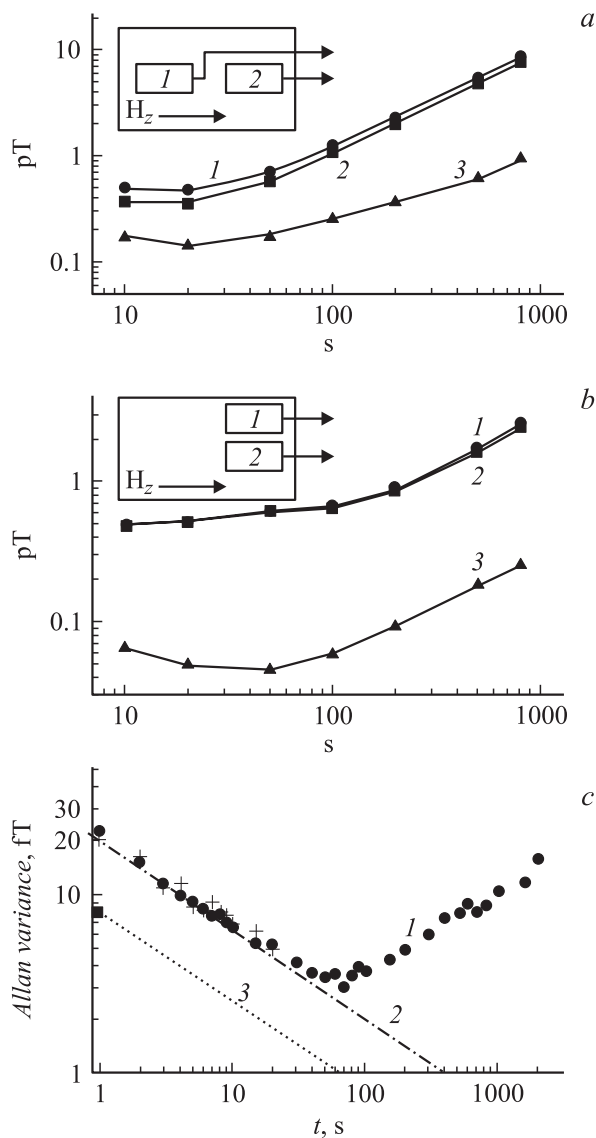


Рис. 1. *a, b*: 1, 2 — аллановские дисперсии показаний цезиевых магнитометров, 3 — аллановская дисперсия разности показаний этих магнитометров. Вставки на рисунках демонстрируют расположение магнитометров внутри экрана. *с*: 1 — экспериментальная зависимость чувствительности рубидиевого магнитометра от времени усреднения, 2, 3 — теоретическая зависимость чувствительности рубидиевого и соответственно цезиевого магнитометра. Зависимости получены на основе измеренных значений крутизны и соотношения сигнал/шум сигнала магнитного резонанса с учетом временной зависимости шумового тока фотоприемника типа $\tau^{-1/2}$ (см. [4] и [2]).

ствительности магнитометра, полученных экспериментально и теоретически, можно связать, в первую очередь, с градиентом вариаций магнитного поля в экране.

Для того чтобы уменьшить влияние такого градиента, мы разместили датчики в другой конфигурации (рис. 1, *b*). Результаты, приведенные на этом рисунке, наглядно демонстрируют уменьшение аллановской дисперсии в этом случае до значения $\sigma_a(\delta B, \tau = 50 \text{ s}) = 32 \text{ fT}$.

Во втором варианте размещения датчиков расстояние между их центрами уменьшилось с 20 до 10 см, а кроме того, при таком варианте размещения датчиков большую роль в уменьшении градиента начинает играть поперечный коэффициент магнитного экранирования, а не продольный, который обычно на порядок меньше первого.

Дополнительным подтверждением важности учета градиента вариаций при определении чувствительности квантовых магнитометров может служить работа [4], посвященная вопросу чувствительности самогенерирующих магнитометров на парах щелочных металлов. В этой работе с помощью одной ячейки, содержащей два изотопа рубидия (^{85}Rb и ^{87}Rb), была получена самогенерация одновременно на двух частотах, соответствующих магнитному резонансу для щелочных атомов этих изотопов. Таким образом удавалось исключить влияние градиента вариаций магнитного поля на результаты измерения чувствительности щелочного магнитометра. На рис. 1, *с* представлена зависимость этой чувствительности от времени измерения, полученная в работе [4]. Из этого рисунка следует, что в условиях подавления шума магнитного поля чувствительность возрастает с ростом времени измерения пропорционально $\tau^{-1/2}$ вплоть до $\tau \sim 100 \text{ s}$, после чего чувствительность начинает уменьшаться. Причиной этого могут быть, например, параметрические сдвиги частоты магнитного резонанса (световые сдвиги, сдвиги, вызываемые температурным дрейфом фазы усилителя обратной связи, ОС и т.д.), которые начинают доминировать над дробовыми шумами в области инфранизких частот. Следует отметить, что для цезиевого градиентометра минимум аллановской диаграммы (рис. 1, *b*) достигается несколько раньше, а величина минимума значительно больше, из чего можно сделать вывод, что и в лучшем случае градиентометрическое подавление шумов магнитного поля не является совершенным для использованного нами экрана. Однако практически полное подобие цезиевого магнитометра исследованному в работе [4] рубидиевому двухизотопному магнитометру позволяет оценить чувствительность цезиевого магнитометра в окрестности минимума аллановской диаграммы исходя из его дробового предела. Для цезиевого и рубидиевого магнитометров использовались однотипные сферические ячейки с внутренним антирелаксационным покрытием, а также одинаковые по конструкции и исполнению электронные блоки: усилитель ОС и ВЧ-генератор для возбуждения спектральной лампы. Оба магнитометра заметно отличались только спектральной структурой оптических линий накачки и спектров поглощения. Нетрудно убедиться, что это различие должно приводить к более существенным световым сдвигам частоты магнитного резонанса для случая рубидиевого магнитометра. Поэтому оценка чувствительности цезиевого магнитометра по аналогии с рубидиевым не кажется завышенной. Поскольку чувствительность рубидиевого магнитометра при $\tau = 100 \text{ s}$ оказалась вдвое меньше дробового предела (см. теоретическую зависимость для рубидия на

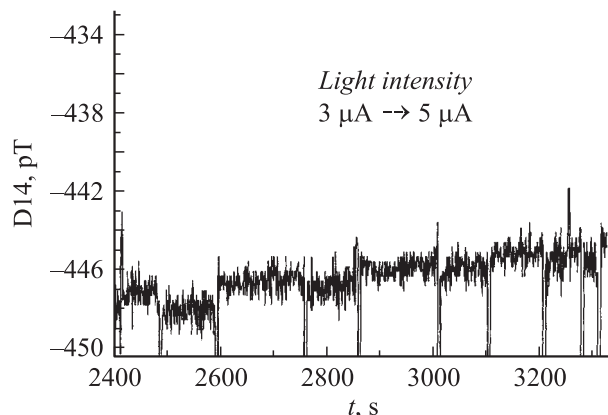


Рис. 2. Разность показаний двух цезиевых магнитометров при изменении интенсивности света накачки в одном из них.

рис. 1, *c*), можно оценить пороговую чувствительность цезиевого магнитометра величиной $\sigma_{rms} \leq 2$ фТ (при $\tau = 100$ с). Что касается долговременной стабильности цезиевого магнитометра (при τ до 1000 с), то согласно вышеприведенным рассуждениям, она должна быть не хуже 10 фТ, что полностью отвечает требованиям для планируемых измерений ЭДМ-нейтрона [1].

Необходимо отметить, что помимо чувствительности другой важной характеристикой являются сдвиг выходной частоты магнитометра и его временная стабильность. Среди возможных причин частотного сдвига наиболее существенной является влияние света накачки на выходную частоту магнитометра. Это связано, во-первых, с хорошо известными механизмами оптического сдвига первого и второго рода [5], во-вторых, с неразрешенной структурой линии магнитного резонанса щелочных атомов [6] и в-третьих, с влиянием фазовой характеристики цепи обратной связи [7] (в результате, например, оптической зависимости емкости фотодиода, а также влияния изменения оптического уширения при неточной 90° настройке сдвига фазы в цепи обратной связи).

Сдвиг частоты магнитометра, обусловленный влиянием неразрешенной структуры линии магнитного резонанса цезия, в нашем случае является существенно подавленным. Это объясняется тем, что в рабочем магнитном поле $B = 2 \mu\text{T}$ частоты зеемановских переходов для отдельного сверхтонкого состояния цезия (в нашем случае с $F = 4$) практически совпадают (разница их составляет ~ 0.01 Hz, что почти на два порядка меньше ширины линии магнитного резонанса).

Несмотря на приведенный выше прогноз относительно долговременной стабильности выходных показаний сконструированного цезиевого магнитометра мы провели специальный эксперимент по оценке сдвига частоты сконструированного магнитометра в результате изменения интенсивности света накачки. Использовалась обычная (продольная) градиентометрическая схема, представленная ранее (рис. 1, *a*). При этом в одном из датчиков мы специально изменяли интенсивность

света накачки (в другом она оставалась фиксированной) и регистрировали разность показаний магнитометров (рис. 2). На рисунке видно, что сдвиг показаний цезиевого магнитометра не превышает 1 фТ при изменении света накачки на 70%. Это означает, что поддержание стабильности света накачки на уровне $\sim 4\%$ (технически достижимое путем стабилизации генератора возбуждения для газоразрядной цезиевой лампы) должно обеспечить собственную стабильность магнитометра на уровне ~ 60 фТ.

Из результатов выполненных экспериментальных исследований и теоретических оценок можно сделать однозначный вывод о том, что сконструированный цезиевый магнитометр удовлетворяет всем повышенным требованиям планируемого эксперимента по измерению ЭДМ-нейтрона с точностью $10^{-27} - 10^{-28}$ е · см и может быть взят за основу при изготовлении полномасштабной (состоящей из 16 магнитометров, расположенных вокруг камер с ультрахолодными нейтронами) системы стабилизации нейтронных резонансных условий для ЭДМ-спектрометра.

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

Авторы выражают благодарность руководству Paul-Scherrer Institute (R. Eichler, H. Gäggeler) за предоставленную возможность проведения исследования, а также сотрудникам этого института (R. Henneck, M. Daum, A. Pichmaier, K. Kohlik, K. Kirch, S. Ritt) за помощь в работе.

Список литературы

- [1] <http://nrd.pnpi.spb.ru/LabSereb/edm2005.pdf>
- [2] Александров Е.Б., Балабас М.В., Дмитриев С.П. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 14. С. 58.
- [3] Allan D.W. // Proc. IEEE. 1966. Vol. 54. N 2. P. 221.
- [4] Александров Е.Б., Балабас М.В., Вершовский А.С., Пазгалев А.С. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 66. С. 118.
- [5] Happer W. // Rev. Mod. Phys. 1972. Vol. 44. N 2. P. 169.
- [6] Ando S. // Jpn. Appl. Phys. 1965. Vol. 4. N 10. P. 793.
- [7] Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скоцкиий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972. 448 с.