

02;07;12

## Однокомпонентный цезиевый магнитометр для измерения остаточной магнитной индукции в ферромагнитных экранах

© Н.А. Доватор

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 30 апреля 1998 г.

В окончательной редакции 11 января 1999 г.

Описывается простая конструкция малогабаритного цезиевого магнитометра, предназначенного для измерения остаточной магнитной индукции ( $B_0 \leq 1000$  нТ) в ферромагнитных экранах цилиндрической формы с внутренним диаметром  $\varnothing \geq 15$  мм. Такие измерения представляют интерес для технологического контроля магнитных экранов в процессе их изготовления.

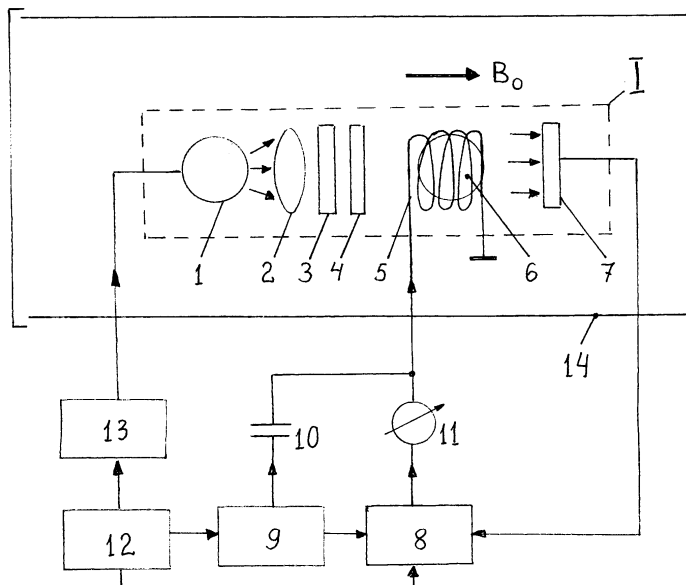
В отличие от квантовых магнитометров  $S_z$ - и  $S_x$ -типа, основанных на явлении двойного радиооптического резонанса (ДРОР) [1], при создании однокомпонентного цезиевого магнитометра использовался нерезонансный принцип формирования сигнала [2], пропорционального продольной (вдоль оптической оси магнитометра) составляющей магнитной индукции. Выбор такого принципа построения магнитометра был обусловлен тем, что для измерения слабых магнитных полей в области  $\pm 1000$  нТ трудно обойтись лишь одним типом квантового магнитометра, основанным, например, на использовании либо сигнала ДРОР (100 ÷ 1000 нТ), либо сигнала параметрического резонанса в ансамбле оптически ориентированных атомов (0 ÷ 10 нТ) [3,4].

Суть работы описываемого цезиевого магнитометра заключается в использовании зависимости поляризации атомов, подвергающихся воздействию циркулярно-поляризованного оптического излучения накачки, от величины угла между направлением магнитного поля и лучом света накачки. В стационарных условиях выражение для намагниченности

атомного ансамбля (вдоль луча накачки) имеет вид [3]:

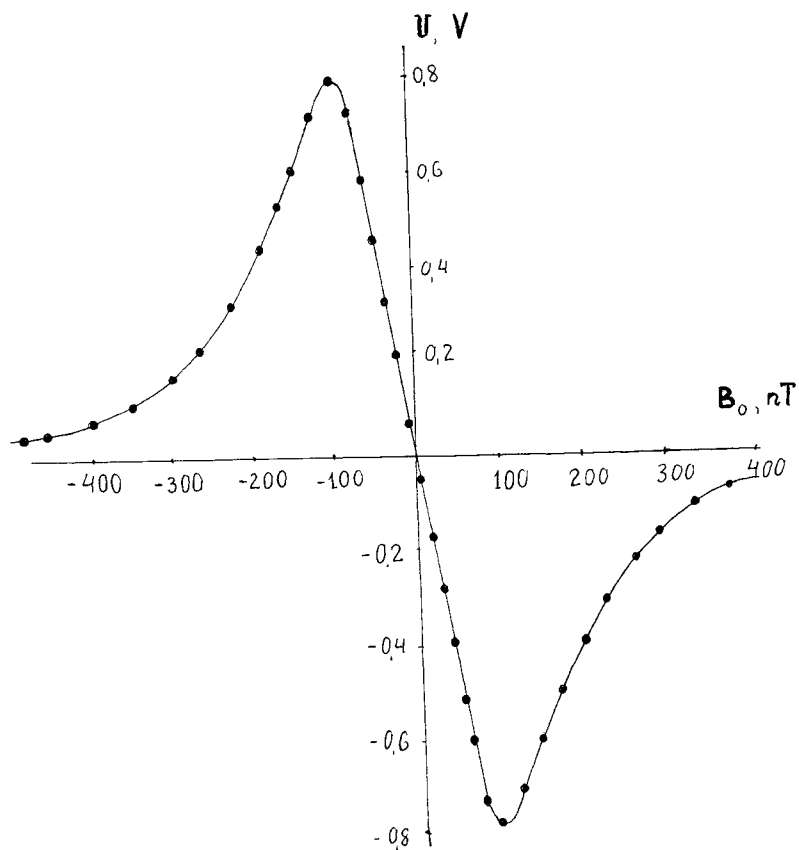
$$M = M_0 \frac{1 + \gamma^2 B_0^2 \tau_2^2}{1 + \gamma^2 B_0^2 \tau_2^2 + \gamma^2 B_1^2 \tau_1 \tau_2}, \quad (1)$$

где  $M_0$  — величина намагниченности, создаваемой светом накачки в отсутствие магнитного поля;  $B_0$ ,  $B_1$  — значения продольной и поперечной (по отношению к лучу накачки) компонент магнитной индукции;  $\gamma$  — гиромагнитное отношение;  $\tau_{1,2}$  — времена продольной и поперечной релаксации атомной намагниченности (с учетом оптической релаксации). Из (1) следует, что зависимость  $M(B_0)$  имеет вид симметричной кривой с минимумом при  $B_0 = 0$ . Поэтому, модулируя  $B_0$  с помощью дополнительного магнитного поля с индукцией  $B_M \cos \Omega_M t$  ( $\Omega_M \ll \tau_{2,1}^{-1}$ ), направленного вдоль оптической оси магнитометра, мы получим переменную составляющую намагниченности  $M^{\Omega_M}$ . Причем ее амплитуда и фаза будут зависеть от величины магнитной индукции  $B_0$  и ее направления (вдоль или навстречу лучу накачки). Поскольку поглощение накачивающего света ансамблем с оптически ориентированными атомами  $\delta S \sim (M_0 - M)$  [1], то магниточувствительный датчик (МЧД), включающий в себя лампу накачки, ячейку с цезием, модуляционную катушку и фотодетектор (рис. 1), представляет собой нуль-индикатор для продольной компоненты магнитной индукции (рис. 2). На основе такого нуль-индикатора и была построена автокомпенсационная схема квантового магнитометра (рис. 1). Для этого сигнал ошибки в виде переменной составляющей фототока (с частотой  $\Omega_M/2\pi = 80$  Hz) усиливался и после синхронного детектирования подавался (уже в виде сигнала постоянного тока) в модуляционную катушку в той фазе, при которой занулялась продольная компонента магнитной индукции в объеме ячейки с ориентированными атомами. При этом величина компенсирующего тока ( $J$ ) была пропорциональна значению индукции  $B_0$ . Достигнутая в настоящем магнитометре величина коэффициента автоподстройки (по магнитному полю) была  $\sim 750$ . Необходимая для такого типа квантового магнитометра калибровка ( $B_0 = \alpha J$ , где  $J$  — ток индикатора,  $\alpha$  — калибровочный коэффициент), а также его испытания осуществлялись с помощью экспериментальной установки со стабилизацией магнитного поля в ферромагнитном экране [5] и щелочно-гелиевого магнитометра [6], аттестованного ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.



**Рис. 1.** Блок-схема цезиевого магнитометра: 1 — цезиевая спектральная лампа; 2 — линза; 3 — интерференционный светофильтр, пропускающий  $D_1$ -линию цезия; 4 — циркулярный поляризатор; 5 — модуляционная катушка, используемая также в системе автоподстройки в роли катушки обратной связи; 6 — рабочая ячейка; 7 — фотодетектор; 8 — селективный усилитель с синхронным детектором; 9 — НЧ генератор; 10 — разделительный конденсатор; 11 — индикатор; 12 — блок питания; 13 — ВЧ генератор разряда в цезиевой лампе, 14 — ферромагнитный экран.

Следует отметить некоторые особенности конструкции описываемого магнитометра. Во-первых, это небольшие размеры его МЧД ( $\text{Ø}15 \times 200 \text{ mm}$ ), что было достигнуто путем использования в качестве рабочей ячейки миниатюрной стеклянной кюветы сферической формы ( $\text{Ø}10 \text{ mm}$ ), содержащей пары цезия (при комнатной температуре) и в качестве буферного газа — неон при давлении 200 torr, а также резонансной цезиевой лампы аналогичных размеров и фотодиода ФД-24К в немагнитном исполнении. Такие размеры МЧД позволили проводить измерения остаточного магнитного поля, а следовательно,



**Рис. 2.** Выходное напряжение синхронного детектора при разомкнутой петле обратной связи и  $B_1 = 40$  нТ.

и продольного коэффициента экранирования ( $K = B_1/B_2$ , где  $B_1$  — составляющая внешнего магнитного поля, направленная вдоль оси ферромагнитного экрана цилиндрической формы,  $B_2$  — аналогичная компонента остаточного магнитного поля внутри экрана) для ферромагнитных экранов с внутренним диаметром  $\varnothing \geq 15$  мм. Во-вторых, с целью упрощения конструкции мы обошлись без принудительного

создания поперечного магнитного поля  $B_1$ , необходимого для работы цезиевого магнитометра. То, что такое поле необходимо, легко видеть из выражения (1). Действительно, положив  $B_1 = 0$ , мы видим:  $M = M_0$  при любых значениях  $B_0$ , что автоматически означает также отсутствие сигнала ошибки в условиях модуляции этой величины. Экспериментально было установлено, что магнитометр уверенно функционирует, если  $30 \text{ нТ} < B_1 < 300 \text{ нТ}$ . В реальных условиях, когда проводились измерения продольного коэффициента экранирования одно- или двухслойного ферромагнитного экрана (находящегося в Земном магнитном поле), в качестве поперечного поля  $B_1$  достаточно было использовать остаточное поперечное (перпендикулярное оси экрана) магнитное поле внутри экрана.

В результате испытаний однокомпонентного цезиевого магнитометра были получены следующие результаты: диапазон измерения продольной компоненты магнитной индукции  $\pm 1000 \text{ нТ}$ ,<sup>1</sup> чувствительность к вариациям магнитного поля  $0.02 \text{ нТ}$  при погрешности измерений  $\sim 3 \text{ нТ}$ .<sup>2</sup>

## Список литературы

- [1] Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скромный Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972. 448 с.
- [2] Slocum R.E. // Rev. Phys. Appl. 1970. V. 5. P. 109–112.
- [3] Александров Е.Б., Бонч-Бруевич, Ходовой В.А. // Опт. и спектр. 1967. Т. 23. С. 282–284.
- [4] Cohen-Tannoudji C., Dupont-Roc C., Haroche J., Laloe F. // Rev. Phys. Appl. 1970. V. 5. P. 95–108.
- [5] Блинов Е.В., Дмитриев С.П., Кулешов П.П., Окуневиц А.И. // Тез. ВСОАМ. Л.: ФТИ, 1986. С. 52.
- [6] Блинов Е.В., Житников Р.А., Кулешов П.П. // ЖТФ. 1979. Т. 49. С. 588–601.

---

<sup>1</sup> Диапазон работы квантового магнитометра определяется полосой захвата по магнитному полю, которая, как в любой статической системе авторегулирования, зависит от ширины дискриминаторной характеристики и коэффициента передачи управляющего элемента (в нашем случае — от постоянной катушки обратной связи).

<sup>2</sup> Превышение погрешности измерений описываемого магнитометра над его чувствительностью в основном обусловлено световым сдвигом линии магнитного резонанса атомов цезия [1] и погрешностью калибровки, необходимой для данного типа магнитометра.