

07;12

Проект векторного квантового M_X -магнитометра с лазерной накачкой

© А.К. Вершовский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: antver@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 1 сентября 2010 г.

Рассмотрена возможность создания магнитометрической схемы на базе двухлучевого M_X -магнитометра с лазерной накачкой, одновременно измеряющей модуль земного магнитного поля с абсолютной точностью 0.02 nT и два угла отклонения вектора земного магнитного поля с абсолютной точностью и чувствительностью не хуже 0.4'' (0.1 nT) при времени измерения $\tau = 1$ s. В отличие от подобных систем схема не нуждается в создании дополнительных магнитных полей.

Принцип работы большинства векторных магнитометров, использующих скалярные квантовые датчики с оптической накачкой [1,2], основан на законе сложения векторов: к вектору индукции измеряемого поля последовательно прибавляются известные вектора различной направленности и измеряется модуль результирующего поля [3]. В результате серии таких измерений вычисляется неизвестный вектор; в [4–6] описаны системы, использующие вращение дополнительных полей, благодаря чему измерение происходит квазинепрерывно.

Еще одна возможность использования квантового датчика в векторной магнитометрии предполагает использование зависимости амплитуды и фазы сигнала модуляции на ларморовской частоте пробного луча в магнитном M_X -резонансе от его направления по отношению к полю. В [7] описана реализация такой схемы: сигнал модуляции луча, параллельного вектору поля, разделяется на две ортогональные компоненты, соответствующие двум компонентам магнитного поля. Напряжения, пропорциональные этим компонентам, подаются на катушки, обнуляющие поперечные вариации поля; они же служат мерой отклонения вектора поля от начального значения. Согласно данным [7], такая схема характеризуется чувствительностью 0.1 nT за 1 s и дрейфами порядка 2–3 nT за сутки.

Общим недостатком практически всех устройств, использующих системы дополнительных магнитных полей, является отсутствие абсолютности измерений, так как вклад, вносимый дополнительными полями, по порядку величины сопоставимыми с величиной измеряемого поля, зависит от конфигурации катушек и силы тока в них, а следовательно, от температуры, влажности и ряда других факторов.

В настоящей работе предлагается существенная модификация схемы Usher и Fairweather [7], не предполагающая использования каких-либо дополнительных магнитных полей, а потому способная производить абсолютные измерения компонент вектора магнитного поля. Под абсолютностью здесь подразумевается, что: 1) магнитомер совершает измерение, опираясь только на фундаментальные константы; 2) процесс измерения не смещает измеряемые параметры; 3) возможна привязка измерений к мировой системе координат.

В частности, предлагается исключить из схемы [7] дополнительные магнитные поля и катушки, их создающие. Вместо того чтобы принудительно возвращать вектор измеряемого магнитного поля \mathbf{B} к направлению \mathbf{Z} , предполагается варьировать направление лазерного луча L_Z так, чтобы он следовал за вектором измеряемого магнитного поля. Такая схема предоставит возможность привязки измерений к мировой системе координат простым измерением положения луча L_Z . В качестве M_X -датчика предлагается использовать калиевый магнитомер на изолированной узкой линии [8].

Блок-схема предлагаемого устройства приведена на рис. 1. В ней используются M_X -датчик и два циркулярно поляризованных луча — луч $L_Z \parallel \mathbf{B}$ и луч $L_X \perp \mathbf{B}$, характеризующиеся интенсивностями I_Z и I_X . Использование вакуумной ячейки I с антирелаксационным покрытием позволяет, благодаря эффективному осреднению интенсивности луча по объему ячейки [9], использовать для накачки и детектирования лучи малого (< 4 mm) диаметра. Схема стабилизации полупроводникового лазера по резонансам насыщенного поглощения в K описана в [10,11].

Луч L_Z обеспечивает оптическую накачку атомов щелочного металла, а луч L_X в резонансе оказывается модулирован вследствие взаимодействия с X -компонентой атомного момента; сигнал его модуляции S_{ref} , несущий информацию о модуле магнитного поля и о фазе M_X -резонанса вдоль оси X , используется в петле генерации M_X -магнитометра. Квадратурные сигналы с выходов цифрового синтезатора частоты 15 , привязанного по фазе к сигналу S_{ref} [12], используются в

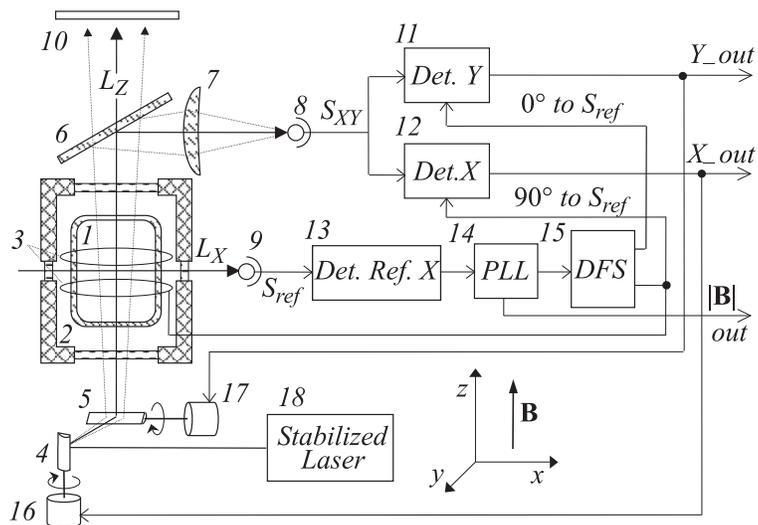


Рис. 1. Блок-схема векторного магнитометра: 1 — ячейка с парами К, 2 — термостат, 3 — катушки радиочастотного поля, 4, 5 — поворотные зеркала, 6 — зеркало, 7 — коллиматор, 8, 9 — фотоприемники, 10 — измеритель положения луча (позиционируемый фотоэлемент), 11, 12 — детекторы поперечных компонент поля, 13 — опорный (M_X) детектор, 14 — ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты), 15 — цифровой синтезатор частоты, 16, 17 — пьезодвигатели, 18 — полупроводниковый лазер, стабилизированный по резонансу в К.

качестве опорных при детектировании сигналов отклонения магнитного поля вдоль осей X , Y .

Когда луч L_Z точно параллелен магнитному полю, его модуляция отсутствует. При отклонении магнитного поля на угол Θ появляется (как в однолучевом M_X -датчике) сигнал модуляции луча L_Z на ларморовской частоте. Амплитуда сигнала S_{XY} пропорциональна $\sin(\Theta) \sin(90^\circ - \Theta)$, а его фаза зависит от направления отклонения магнитного поля. Сигнал S_{XY} может быть разложен на две ортогональные компоненты синхронными детекторами, сигналы с которых подаются в варианте [7] на дополнительные катушки, обнуляющие поперечные вариации поля, а в нашем варианте — на входы устройства позиционирования луча L_Z ; в

результате поддерживается постоянная параллельность луча L_Z вектору поля. Эти же сигналы содержат информацию о вариациях угла вектора магнитного поля.

Из существующих методик управления направлением лазерного луча наиболее перспективной представляется схема из двух поворотных зеркал 4, 5, приводимых в движение пьезодвигателями 16, 17. Она в принципе способна обеспечить соответствующий максимальным вариациям компонент вектора земного магнитного поля угол поворота луча $\Theta_{\max} \pm 2^\circ$ с разрешением $0.4''$ и быстродействием $\tau_L < 0.1$ s и может быть сделана в достаточной мере немагнитной.

Информация о вариациях Θ может считываться с управляющих входов пьезодвигателей, но абсолютные измерения потребуют измерений положения луча L_Z . Такие измерения могут производиться с помощью позиционируемого четырехсегментного фотоэлемента (или ПЗС-матрицы) 10 на любом расстоянии от датчика; для этого используется малая часть мощности луча L_Z , прошедшая сквозь зеркало 6.

Оценим δB_\perp — чувствительность поперечных компонент вектора поля при измерении за одну секунду. Максимальный сигнал S_{XY} достигается в стандартном для однолучевого M_X -датчика расположении, т.е. при $\Theta = 45^\circ$. Минимальный угол $\delta\Theta$, который может быть зарегистрирован системой, определяется условием

$$\left(\frac{S}{N}\right)_0 \frac{\sin(\delta\Theta) \cos(\delta\Theta)}{\sin(45^\circ) \cos(45^\circ)} = 1, \quad (1)$$

где $(S/N)_0$ — отношение сигнал/шум r.m.s. (root mean square) в схеме однолучевого M_X -магнитометра при $\Theta = 45^\circ$, измеренное за $\tau = 1$ s;

$$\delta\Theta \cong \sin(\delta\Theta) \cong \frac{1}{2} \left(\frac{S}{N}\right)_0^{-1}. \quad (2)$$

Следовательно, в поле $50 \mu\text{T}$ чувствительность $\delta\beta_\perp = B \sin(\delta\Theta) = 0.1$ nT достигается при $(S/N)_0 = 2.5 \cdot 10^5$. Сравним это значение с существующими данными; так, в [10,11] описан эксперимент, в котором в калиевом M_X -датчике была достигнута рекордная чувствительность $\delta\beta = 1/Q \equiv \text{MHz}/S = 2 \cdot 10^{-15} \text{ THz}^{-1/2}$ при следующих параметрах: диаметр вакуумной ячейки $D = 15$ cm; $\Theta = 45^\circ$; интенсивность накачки $I_0 = 3$ (здесь I определена через световое уширение резонанса:

$I = (\Gamma - \Gamma_d)/\Gamma_d$, Γ — полная ширина резонанса, Γ_d — ширина в отсутствие света накачки); мощность лазера $P \approx 2.5 \mu\text{W}$; температура ячейки $T = 42^\circ\text{C}$; концентрация атомов $n_0 = 4.77 \cdot 10^{12}$ такая, что оптическая плотность ячейки — $x_0(n, D) \approx 1.6$. При этом S/N в пересчете к $\tau = 1$ s составляло $S/N \approx 8.8 \cdot 10^4$, что почти втрое меньше, чем необходимо для реализации заявленной в [7] чувствительности. Но, согласно (2), чувствительность угловых измерений не связана с Γ , а потому она может быть повышена увеличением интенсивности I_Z и концентрации $n(T)$ атомов в ячейке.

Выражения для $S(I)$, $\gamma(I)$ были приведены в [1,2]. Их обобщение для произвольных параметров накачки дано в [9]; графики этих зависимостей для областей $I = I_0$, $n > n_0$ приведены на рис. 2. Из них следует, что увеличением n отношение S/N можно повысить менее чем в два раза; кроме того, рост n сопровождается быстрым ростом требуемой мощности лазера P , что приводит к быстрому росту световых сдвигов. Таким образом, увеличение n представляется менее целесообразным, чем увеличение I .

Троекратное увеличение S/N в векторном канале потребует примерно 9-кратного увеличения I_Z ; чувствительность M_x -датчика при этом несколько уменьшится и в $(I_Z + I_X)/(I_{Z0} + I_{X0}) = 5$ раз увеличатся световые и параметрические сдвига M_x -резонанса. Увеличение I_Z имеет смысл до тех пор, пока: 1) световые сдвиги не превышают допустимый порог; 2) уровень технических шумов лазерного излучения не превышает уровень дробовых шумов; 3) чувствительность модульного измерения превосходит чувствительность измерения компонент.

Таким образом, обеспечить чувствительность векторной схемы на уровне 0.1 нТ за 1 s представляется возможным в схеме калиевого магнитометра [10] при интенсивности накачки $I = 5I_0$ ($P \approx 12 \mu\text{W}$); при этом M_x -датчик будет характеризоваться чувствительностью на уровне $4 \text{ fT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ и стабильностью на уровне 10 рТ. Погрешность, связанная с неопределенностью физических констант, также находится на уровне 10 рТ [13], так что абсолютную точность M_x -датчика можно оценить в 20 рТ.

Для численного моделирования процесса измерения магнитного поля была написана модификация программы, описанной в [6]. Ядро программы представляет собой модель M_x -магнитометра, параметры резонанса в которой описываются уравнениями [9], а динамика амплитуды M_x -резонанса учитывается отдельно вводом временной задержки.

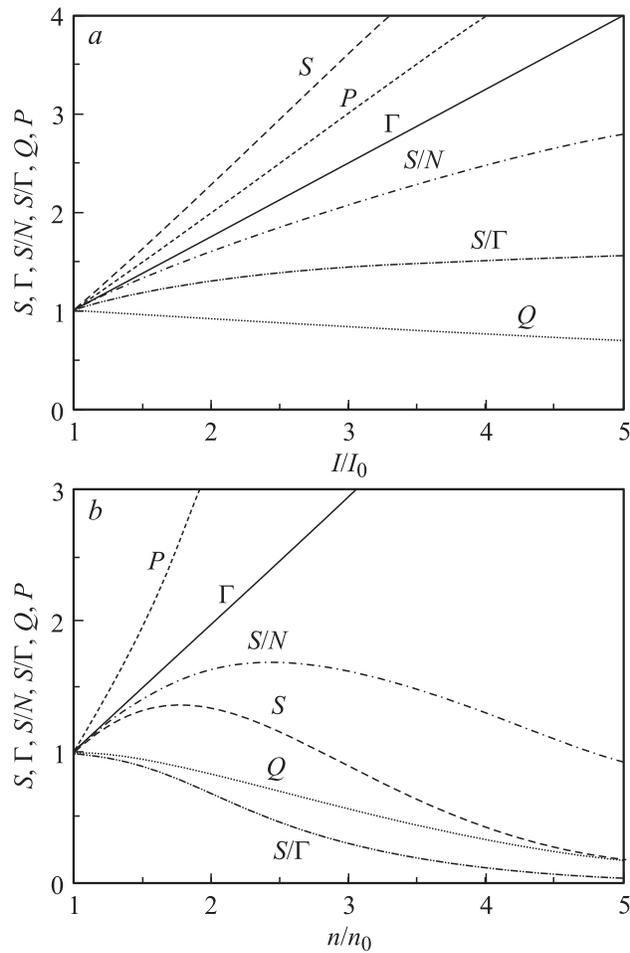


Рис. 2. Зависимость основных параметров M_x -резонанса (S , Γ , S/N , S/Γ , $Q = S/(N\Gamma)$) и мощности источника накачки P от: a — приведенной интенсивности накачки I/I_0 , b — приведенной концентрации атомов n/n_0 . Все параметры нормированы на их значения в оптимуме по Q .

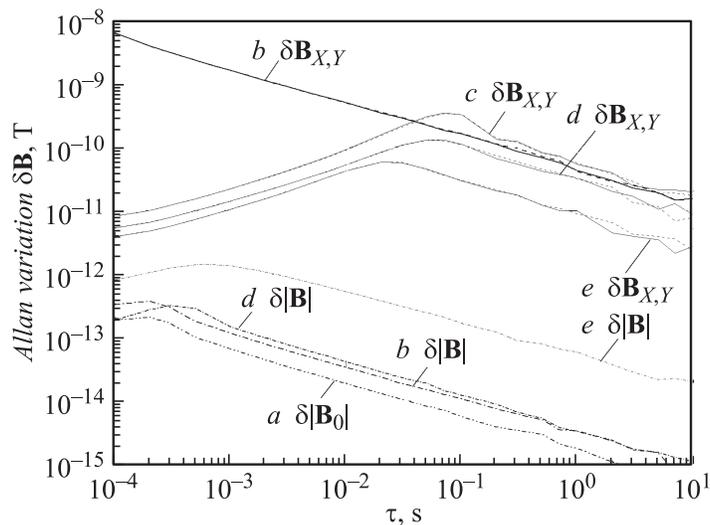


Рис. 3. Аллановская вариация отклика моделей: *a* — калиевый модульный магнитометр с ячейкой 15 см; *b–d* — вектор магнитометра, $I = 5I_0$ ($I_Z = 9I_{Z0}$, $I_X = I_{X0}$), $n = n_0$; *c* — то же с учетом динамики M_X -сигнала и времени отклика системы позиционирования луча L_Z ; *d* — то же при $n = 2n_0$; *e* — то же при $n = n_0$, $I = 100I_0$ ($I_Z = 199I_{Z0}$, $I_X = I_{X0}$).

Численное моделирование полностью подтвердило приведенные выше оценки. На рис. 3 показаны диаграммы Аллана [14]: *a* — для модели модульной схемы [10,11], *b* — для модели векторного магнитометра ($I = 5I_0$) на ее основе. Диаграмма рис. 3, *c*, построенная при тех же параметрах с учетом времени отклика амплитуды сигнала магнитного M_X -резонанса и системы позиционирования луча L_Z , демонстрирует излом при времени осреднения $\tau \approx 0.1$ с; это время примерно соответствует ожидаемому быстродействию системы. Рис. 3, *d* соответствует двукратному увеличению концентрации атомов $n = 2n_0$, что (при $I = 5I_0$) приводит к дополнительному росту P в 3.3 раза. Рис. 3, *e* демонстрирует принципиальную возможность повышения чувствительности в каналах X , Y до 0.01 нТ за 1 с при увеличении интенсивности накачки до $I = 100I_0$.

Во всех случаях статическая ошибка измерения отсутствует; точность измерения за фиксированное время определяется статистическим разбросом показаний. Единственным фактором, приводящим к возникновению систематической ошибки в каналах X , Y , является сдвиг детекторов I_1 , I_2 , который не должен превышать относительной погрешности угловых измерений: $\delta S_{X,Y}/S_{X,Y} < 0.6 \cdot 10^{-4}$. Ни световые сдвиги M_X -резонанса, ни ошибки установки фазы φ в схеме M_X -датчика, ни ошибки позиционирования луча L_X не приводят к возникновению статической ошибки в каналах X , Y .

Таким образом, аналитически и методами численного моделирования показано, что магнитометрическая схема на основе M_X -датчика с лазерной накачкой позволяет осуществлять одновременное измерение модуля поля с абсолютной точностью порядка 0.02 нТ и двух углов отклонения вектора поля с абсолютной точностью лучше 0.4'' (0.1 нТ) при $\tau = 1$ с. В отличие от большинства подобных систем она не нуждается в создании дополнительных магнитных полей, а потому характеризуется высокой абсолютной точностью углового измерения.

Точность схемы не зависит от точности ее позиционирования в пространстве: по сути, она является измерителем модуля вектора магнитного поля и одновременно лазерным визуализатором его направления, т. е. компасом. Дополнительным достоинством схемы является отсутствие генерируемых ею магнитных помех, что позволит использовать ее в магнитометрических обсерваториях совместно с другими устройствами.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Автор благодарит Е.Б. Александрова и А.С. Пазгалева за полезные дискуссии.

Список литературы

- [1] *Dehmelt H.G.* // Phys. Rev. 1957. V. 105. P. 1487–1489.
- [2] *Bloom A.L.* // Appl. Opt. 1962. V. 1. N 1. P. 61–68.
- [3] *Lamden R.J.* // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1969. V. 2. N 2. P. 125–130.
- [4] *Alexandrov E.B., Balabas M.V., Kulyasov Vol. N., Ivanov A.E., Pazgalev A.S., Rasson J.L., Verhovski A.K., Yakobson N.N.* // Meas. Sci. Technol. 2004. V. 15. P. 918–922.

- [5] Вершовский А.К., Балабас М.Б., Иванов А.Э., Кулясов В.Н., Пазгалев А.С., Александров Е.Б. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 1. С. 115–120.
- [6] Вершовский А.К. // Опт. спектр. 2006. Т. 101. В. 2. С. 341–349.
- [7] Fairweather A.J., Usher M.J. // J. Physics E: Scient. Instr. 1972. V. 5. P. 986–990.
- [8] Александров Е.Б., Бонч-Бруевич В.А., Провоторов С.В., Якобсон Н.Н. // Опт. спектр. 1985. Т. 58. В. 3. С. 953–954.
- [9] Вершовский А.К., Пазгалев А.С. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 5. С. 116–124.
- [10] Александров Е.Б., Балабас М.В., Вершовский А.К., Иванов А.Е., Якобсон Н.Н., Величанский В.Л., Сенков Н.В. // Опт. спектр. 1995. Т. 78. В. 2. С. 325–333.
- [11] Alexandrov E.B., Balabas M.V., Puzgalev A.S., Vershovskii A.K., Yakobson N.N. // Laser Physics. 1996. V. 6. N 2. P. 244–251.
- [12] Вершовский А.К., Пазгалев А.С. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 7. С. 108–112.
- [13] Александров Е.Б., Вершовский А.К. // УФН. 2009. Т. 179. В. 6. С. 605–637.
- [14] Allan D.W. // Proc. IEEE. 1966. V. 54. N 2. P. 221–231.