

09.2;11.3;14

Оптический магнитометрический датчик для магнитоэнцефалографического комплекса

© А.К. Вершовский, М.В. Петренко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: antver@mail.ioffe.ruПоступило в Редакцию 28 сентября 2022 г.
В окончательной редакции 16 января 2023 г.
Принято к публикации 16 января 2023 г.

Предложена новая реализация метода оптической накачки щелочных атомов в схеме высокочувствительного компактного однолучевого датчика ненулевого магнитного поля, позволяющая использовать его в составе магнитоэнцефалографического комплекса с удаленным лазерным источником накачки. Метод позволяет, в частности, осуществлять накачку массива датчиков единым источником модулированного по поляризации резонансного излучения, соединенным с датчиками посредством поддерживающих поляризацию оптоволокон. Проведен модельный эксперимент, подтверждающий принципиальную осуществимость и эффективность метода.

Ключевые слова: оптически детектируемый магнитный резонанс, квантовый магнитометр, магнитоэнцефалография.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.06.54817.19378

Последнее десятилетие характеризуется бурным ростом интереса к магнитным методам исследования сверхслабых полей головного мозга — к магнитоэнцефалографии (МЭГ). Главным образом этот процесс связан с появлением компактных оптических датчиков магнитного поля (МП), основанных на эффекте магнитного резонанса (МР) [1–6], способных по своим метрологическим параметрам конкурировать с дорогостоящими стационарными сверхпроводящими системами СКВИД [7]. Одновременно с появлением оптических датчиков SERF [1], способных работать только в „нулевом“ поле, т.е. в магнитоизолированных комнатах, начался процесс поиска решений, позволяющих компактизировать датчики ненулевого поля при сохранении их чувствительности, что позволило бы резко снизить требования к подавлению внешнего МП и его пространственных градиентов [6,8,9]. В частности, в [10] нами была предложена схема датчика ненулевого поля на щелочных атомах, удовлетворяющего требованиям МЭГ по всем основным параметрам (чувствительности, быстродействию и способности функционировать, не создавая радиочастотных помех соседним датчикам) и в то же время отличающегося предельной простотой и компактностью. Это преимущество обусловлено тем, что для накачки и детектирования МР было предложено использовать один луч с меняющейся во времени эллиптичностью: от левой эллиптической поляризации к линейной и далее к правой эллиптической. Частота луча настроена в резонанс с переходами со сверхтонкого уровня $F = I - 1/2$ основного состояния $S_{1/2}$ на ближайшие возбужденные уровни $F = I \pm 1/2$ ближайшего возбужденного состояния $P_{1/2}$ (две коротковолновые компоненты спектральной D_1 -линии щелочного металла) [11,12]. Оптическую накачку

атомных магнитных моментов осуществляет модулированная на частоте МР (ларморовской частоте) циркулярная компонента излучения (так называемая схема Белла–Блюма [13]), а детектирование МР производится на переходе $F = I + 1/2$, $m_F = F \leftrightarrow F - 1$ основного состояния по повороту на ларморовской частоте угла поляризации линейно поляризованной компоненты излучения (так называемая M_X -схема). В многочисленных однолучевых схемах, предлагавшихся ранее (см., например, [14–16]), простота конструкции достигалась за счет ухудшающих чувствительность компромиссов, таких как объединение лучей накачки и детектирования в один луч с неккими средними параметрами. В схеме [10] процессы накачки и детектирования разделены по времени в соответствии с фазами прецессии, и параметры луча в каждый момент времени оптимальны для текущего процесса, в результате чего оба процесса осуществляются с максимальной эффективностью.

Основным недостатком предложенной схемы, как было отмечено в [10], является сложность передачи излучения с модулированной эллиптичностью по оптоволокну, что особенно существенно в комплексах МЭГ, в которых один мощный лазер используется для оптической накачки массива датчиков, к каждому из которых излучение передается по отдельному оптоволокну (здесь необходимо пояснить, что датчики ненулевого поля на ячейках с щелочными атомами и буферным газом для достижения необходимой чувствительности, как правило, требуют значительных — единицы и десятки милливольт — мощностей излучения, и поэтому в них не удается интегрировать маломощные VCSEL-лазеры, как это сделано в датчиках нулевого поля SERF [17]). Использование общего источника накачки позволяет не только существенно упростить и удешевить схему, но

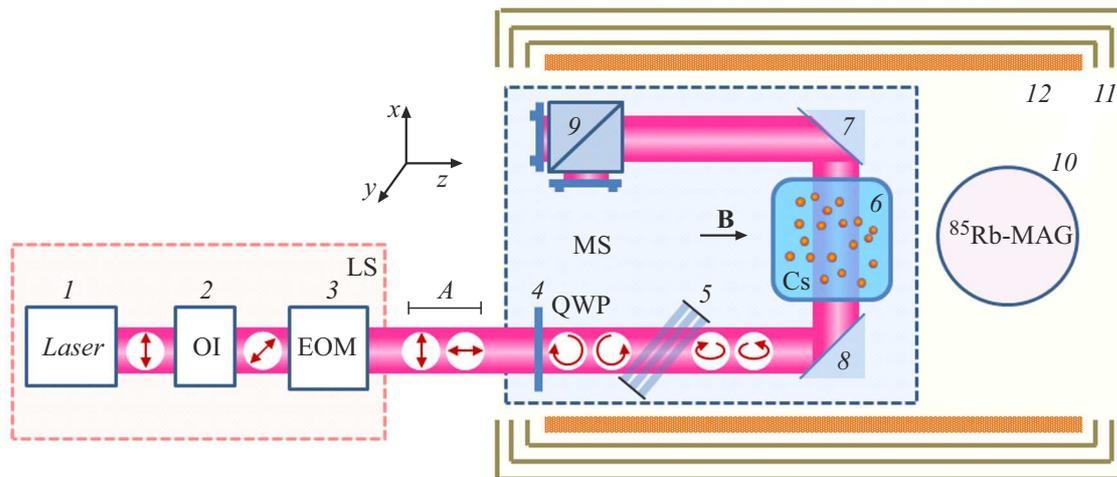


Рис. 1. Упрощенная схема эксперимента. LS — источник излучения, MS — макет магнитометрического датчика. 1 — лазер, 2 — оптический изолятор (OI), 3 — электрооптический модулятор поляризации (EOM), 4 — четвертьволновая пластина (QWP), 5 — регулируемый линейный поляризатор, 6 — газовая ячейка с парами Cs, 7, 8 — зеркала, 9 — балансный фотоприемник, 10 — магнитометр (MAG) на основе ^{85}Rb , 11 — магнитный экран, 12 — соленоид, A — участок, на котором излучение может быть передано по оптоволокну. Стрелками указаны состояния поляризации луча, соответствующие (после электрооптического модулятора) двум полупериодам модуляции.

и снизить технические шумы за счет вычитания общего шума накачки.

В настоящей работе для решения этой задачи предлагается использовать стандартное одномодовое поддерживающее поляризацию (SM-PM) оптоволокну, через которое будет передаваться линейно поляризованное излучение, соответствующее собственным модам оптоволокну. Таких мод у PM-волокна две, они характеризуются ортогональными (s и p) поляризациями, распространяющимися вдоль собственных осей оптоволокну. Фазовая задержка между модами не определена, что препятствует передаче излучения с эллиптической поляризацией. Соответственно, мы предлагаем передавать по SM-PM-оптоволокну полностью линейно поляризованное излучение, азимут поляризации которого модулирован со скважностью 50%: полпериода ларморовской частоты передается p -поляризация, полпериода — s -поляризация. Установленная на выходе оптоволокну четвертьволновая пластина (QWP), оси которой расположены под углом 45° к осям оптоволокну, преобразует эти две поляризации в круговые: левую и правую соответственно. Установленный после QWP регулируемый линейный поляризатор (например, расположенное под углом полупрозрачное зеркало или стопка стекол — так называемая „стопа Столетова“) преобразует круговую поляризацию в эллиптическую. В излучении появится необходимая для детектирования линейная компонента, причем направление ее поляризации будет определяться исключительно ориентацией поляризатора.

Отличия характеристик излучения в предлагаемой схеме от требуемых в [10] сводятся к тому, что модуляция эллиптичности осуществляется не по синусоидальному, а по прямоугольному временному закону,

и тем самым как круговая, так и линейная компонента все время присутствуют в излучении и характеризуются постоянной интенсивностью, что ранее нами было определено как компромисс, который может привести к ухудшению параметров. В стандартной двухлучевой схеме Белла–Блюма влияние формы модуляции было исследовано в [18]. Было показано, что прямоугольная модуляция хотя и приводит к незначительному уширению сигнала МР, но тем не менее позволяет достичь близких значений предельной чувствительности. Однако предположение о том, что это верно и для однолучевой схемы, требует доказательства. Поэтому мы смоделировали соответствующие условия накачки и исследовали параметры МР.

Измерения производились на установке, описанной в [10,18], которая представляет собой помещенный в стабилизатор МП макет магнитометрического датчика с внешним источником накачки. Кубическая ячейка размером $8 \times 8 \times 8$ mm содержала насыщенные пары цезия и азот под давлением ~ 100 Торг и размещалась в центральной области многослойного магнитного экрана, в котором с помощью схемы активной стабилизации поддерживалась индукция МП $\sim 12 \mu\text{T}$. В качестве активного элемента магнитометра, обеспечивающего стабилизацию МП, был выбран изотоп ^{85}Rb . Это позволило избежать влияния генерируемого магнитометром радиочастотного поля на атомы Cs. В схему макета также были включены четвертьволновая пластина и регулируемый линейный поляризатор, представляющий собой стопку из $N = 1-12$ стеклянных плоскопараллельных пластин, закрепленных под углом Брюстера (рис. 1), с тем, чтобы минимизировать ослабление выбранной линейной поляризации.

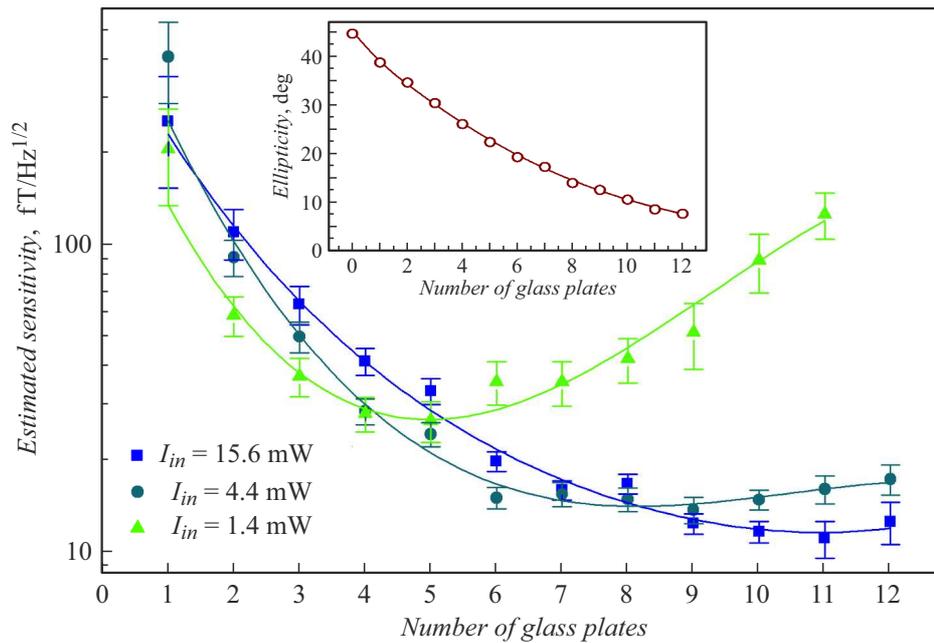


Рис. 2. Оценка предельной (ограниченной дробовым шумом) чувствительности при трех значениях входной интенсивности I_{in} в зависимости от количества пластин в стопе Столетова. Соединительные линии проведены для облегчения восприятия. На вставке — зависимость эллиптичности луча от количества пластин в стопе Столетова.

Результаты измерений приведены на рис. 2. Сравнение параметров МР с приведенными в [10] показывает, что предложенная модификация схемы не приводит к существенному ухудшению ее параметров. В частности, оценка предельной кратковременной чувствительности по отношению амплитуды резонанса к его ширине и спектральной плотности дробового шума фототока составляет ~ 11 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ при быстродействии порядка $\Gamma/(2\pi) = 500$ Hz. Возможность использования данной схемы в комплексах МЭГ подтверждается результатами работы [19], в которой показано, что при использовании массива из 128 скалярных оптических датчиков с чувствительностью на уровне 70 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ и полосой пропускания 100 Hz при усреднении по 100 записям прогнозируется точность локализации одиночных нейронных диполей (~ 10 nA · m) порядка 1 см. Повышение чувствительности датчиков до 7–10 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ при тех же условиях позволяет обеспечить точность локализации 1 мм.

Быстродействие схемы определяется полушириной МР и может быть дополнительно увеличено при повышении температуры рабочей ячейки одновременно с увеличением мощности оптической накачки. Ширина МР определяет также допустимую неоднородность МП, т.е. максимальную разницу магнитных полей в точках расположения отдельных датчиков.

Оптимум по чувствительности достигается при эллиптичности $\sim 10.5^\circ$, что соответствует относительной интенсивности циркулярно поляризованной компоненты 36% и полностью согласуется с данными [10].

В нашем эксперименте линейный поляризатор располагался таким образом, чтобы электрический вектор **E** линейной компоненты излучения был параллелен вектору МП **B**; при накачке D_1 -линией это позволяет минимизировать уширение МР линейной компонентой излучения, исключив ее деструктивное взаимодействие с наиболее населенными в результате оптической накачки уровнями $F = I + 1/2, m_F = \pm F$. При повороте датчика вокруг его оси (проходящей через центр ячейки в направлении распространения света — вдоль оси x на рис. 1) параллельность векторов **E** и **B** может быть обеспечена выбором направления оси поляризатора. Это позволит вращать датчик вокруг его оси на 360° без ухудшения его параметров, что следует считать дополнительным преимуществом предлагаемой схемы.

Таким образом, в работе показано, что предложенная нами ранее схема компактного однолучевого датчика, предназначенного для работы в составе магнитоэнцефалографического комплекса, может быть модифицирована с тем, чтобы исключить передачу от источника накачки к датчику эллиптически поляризованного излучения. Это позволяет использовать одномодовое оптоволокно для передачи излучения от удаленного лазерного источника накачки. Тем самым устраняется последнее принципиальное препятствие на пути построения магнитоэнцефалографической системы ненулевого поля на основе однолучевых оптических датчиков.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] I.K. Kominis, T.W. Kornack, J.C. Allred, M.V. Romalis, *Nature*, **422** (6932), 596 (2003). DOI: 10.1038/nature01484
- [2] J. Iivanainen, M. Stenroos, L. Parkkonen, *NeuroImage*, **147**, 542 (2017). DOI: 10.1016/j.neuroimage.2016.12.048
- [3] E. Boto, S.S. Meyer, V. Shah, O. Alem, S. Knappe, P. Kruger, T.M. Fromhold, M. Lim, P.M. Glover, P.G. Morris, R. Bowtell, G.R. Barnes, M.J. Brookes, *NeuroImage*, **149**, 404 (2017). DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.01.034
- [4] K.-M.C. Fu, G.Z. Iwata, A. Wickenbrock, D. Budker, *AVS Quantum Sci.*, **2** (4), 044702 (2020). DOI: 10.1116/5.0025186
- [5] N.V. Nardelli, A.R. Perry, S.P. Krzyzewski, S.A. Knappe, *EPJ Quantum Technol.*, **7** (1), 11 (2020). DOI: 10.1140/epjqt/s40507-020-00086-4
- [6] M.E. Limes, E.L. Foley, T.W. Kornack, S. Caliga, S. McBride, A. Braun, W. Lee, V.G. Lucivero, M.V. Romalis, *Phys. Rev. Appl.*, **14** (1), 011002 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.14.011002
- [7] D. Cohen, *Science*, **175** (4022), 664 (1972). DOI: 10.1126/science.175.4022.664
- [8] R. Zhang, W. Xiao, Y. Ding, Y. Feng, X. Peng, L. Shen, C. Sun, T. Wu, Y. Wu, Y. Yang, Z. Zheng, X. Zhang, J. Chen, H. Guo, *Sci. Adv.*, **6** (24), eaba8792 (2020). DOI: 10.1126/sciadv.aba8792
- [9] Y. Guo, S. Wan, X. Sun, J. Qin, *Appl. Opt.*, **58** (4), 734 (2019). DOI: 10.1364/AO.58.000734
- [10] M.V. Petrenko, A.S. Pazgalev, A.K. Vershovskii, *Phys. Rev. Appl.*, **15** (6), 064072 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.064072
- [11] T. Scholtes, V. Schultze, R. IJsselsteijn, S. Woetzel, H.-G. Eyer, *Phys. Rev. A*, **84** (4), 043416 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevA.84.043416
- [12] Е.Н. Попов, В.А. Бобрикова, С.П. Воскобойников, К.А. Баранцев, С.М. Устинов, А.Н. Литвинов, А.К. Вершовский, С.П. Дмитриев, В.А. Картошкин, А.С. Пазгалёв, М.В. Петренко, *Письма в ЖЭТФ*, **108** (8), 543 (2018). DOI: 10.1134/S0370274X18200043 [E.N. Popov, V.A. Bobrikova, S.P. Voskoboinikov, K.A. Barantsev, S.M. Ustinov, A.N. Litvinov, A.K. Vershovskii, S.P. Dmitriev, V.A. Kartoshkin, A.S. Pazgalev, M.V. Petrenko, *JETP Lett.*, **108** (8), 513 (2018). DOI: 10.1134/S0021364018200122].
- [13] W.E. Bell, A.L. Bloom, *Phys. Rev. Lett.*, **6** (6), 280 (1961). DOI: 10.1103/PhysRevLett.6.280
- [14] V. Schultze, B. Schillig, R. IJsselsteijn, T. Scholtes, S. Woetzel, R. Stolz, *Sensors*, **17** (3), 561 (2017). DOI: 10.3390/s17030561
- [15] A.L. Bloom, *Appl. Opt.*, **1** (1), 61 (1962). DOI: 10.1364/AO.1.000061
- [16] S. Groeger, G. Bison, J.-L. Schenker, R. Wynands, A. Weis, *Eur. Phys. J. D*, **38** (2), 239 (2006). DOI: 10.1140/epjd/e2006-00037-y
- [17] J. Iivanainen, R. Zetter, L. Parkkonen, *Hum. Brain Mapp.*, **41** (1), 150 (2020). DOI: 10.1002/hbm.24795
- [18] А.К. Вершовский, М.В. Петренко, *ЖТФ*, **91** (5), 840 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.05.50698.337-20 [A.K. Vershovskii, M.V. Petrenko, *Tech. Phys.*, **66**, 821 (2021). DOI: 10.1134/S106378422105025X].
- [19] R.J. Clancy, V. Gerginov, O. Alem, S. Becker, S. Knappe, *Phys. Med. Biol.*, **66** (17), 175030 (2021). DOI: 10.1088/1361-6560/ac18fb