

УДК 01.04.00

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА РЕЗОНАНСА ОТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЗИЯ В ЯЧЕЙКЕ КВАНТОВОГО ДАТЧИКА ВРАЩЕНИЯ

А.Н. Шевченко, Е.А. Захарова

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация
Адрес для переписки: keasunrise@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 09.04.19, принята к печати 15.05.19
Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Шевченко А.Н., Захарова Е.А. Исследование зависимости качества резонанса от распределения цезия в ячейке квантового датчика вращения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 567–573. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573

Аннотация

Предмет исследования. Приведены результаты исследования влияния распределения цезия по стенкам газовой ячейки квантового датчика вращения на ширину и амплитуду параметрического резонанса в цезии. **Методы.** Теоретические и экспериментальные исследования выполнены с использованием математической модели и макета квантового датчика вращения, а также лабораторного стенда для исследования параметров газовой ячейки. Математическая модель применялась для расчета теоретического значения скорости релаксации цезия при различных температурах и последующего сопоставления этих данных с экспериментальными. Для экспериментального определения скорости релаксации цезия использовались данные о ширине параметрического резонанса в цезии, полученные на макете квантового датчика вращения. Исследования оптических свойств ячейки осуществлялись на лабораторном стенде в нерезонансном свете. В качестве источника нерезонансного света использован лазер с вертикальным излучателем, аналогичный применяемому в квантовом датчике вращения, отстроенный от номинальной длины волны. На лабораторном стенде определена оптимальная отстройка частоты оптического излучения от резонанса цезия, позволяющая снизить зависимость результатов измерений от температуры ячейки. Осуществлен подбор оптимальных параметров лазерного излучения, при которых лазер работает в штатном режиме, и отсутствуют колебания его мощности и поляризации. **Основные результаты.** В результате исследований показано, что нежелательное перераспределение цезия по газовой ячейке приводит к изменению прозрачности оптических каналов, что вызывает ухудшение отношения сигнал–шум и снижение фактора качества резонансной линии. Также показано, что уширение цезиевого резонанса вследствие оседания паров цезия на стенках газовой ячейки незначительно и находится на уровне погрешности измерений. **Практическая значимость.** Предложен и апробирован метод контроля интенсивности нерезонансного света лазерного излучателя после прохождения ячейки, позволяющий оперативно контролировать состояние каналов оптической накачки и детектирования макета квантового датчика вращения.

Ключевые слова

квантовый датчик вращения, ядерный магнитный резонанс, газовая ячейка, пары цезия, фактор качества резонансной линии

Благодарности

Выражаем признательность научному руководителю Безмену Глебу Владимировичу и коллегам за помощь в проведении исследований.

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573

RESEARCH OF MAGNETIC RESONANCE QUALITY FACTOR DEPENDENCE ON CESIUM DISTRIBUTION IN QUANTUM ROTATION SENSOR CELL

A.N. Shevchenko, E.A. Zakharova

Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation
Corresponding author: keasunrise@gmail.com

Article info

Received 09.04.19 accepted 15.05.19
Article in Russian

For citation: Shevchenko A.N., Zakharova E.A. Research of magnetic resonance quality factor dependence on cesium distribution in quantum rotation sensor cell. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 567–573 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573

Abstract

Subject of Research. The paper presents results of the experimental and theoretical studies on cesium distribution effect along the vapor cell walls of quantum rotation sensor on the quality of parametric resonance in cesium. **Methods.** Theoretical and experimental studies were performed using the mathematical model, quantum rotation sensor layout and the laboratory setup for the vapor cell parameters research. The mathematical model was used for calculation of cesium relaxation rate theoretical value at various temperatures and further comparison of these data with experimental ones. For the experimental determination of cesium relaxation rate, the data on the parametric resonance width in cesium obtained on the of the quantum rotation sensor model were used. Studies of the cell optical properties were carried out on a laboratory setup in non-resonant light. A laser with a vertical emitter similar to the one used in the quantum rotation sensor is applied as a source of non-resonant light, tuned away from the nominal wavelength. The optimal detuning of the optical radiation frequency from the cesium resonance was determined on the laboratory setup, that reduces the dependence of the measurement results on the cell temperature. Selection of laser radiation optimal parameters is performed for the normal mode of the laser operation and freedom from fluctuations in its power and polarization. **Main Results.** During the research it was shown that undesirable cesium redistribution in the vapor cell leads to the optical paths transparency change, which causes the deterioration of the signal-to-noise ratio and the decrease in the resonance line quality factor. In addition, it was shown that cesium resonance line broadening due to sedimentation of the cesium vapor on the cell walls is insignificant and is at the level of the measurement error. **Practical Relevance.** We have proposed and tested non-resonant light intensity control method for the laser emitter after passing through a vapor cell. This method provides for an operative state monitoring of the optical pumping channels and detecting of quantum rotation sensor layout.

Keywords

quantum rotation sensor, nuclear magnetic resonance, vapor cell, cesium vapor, resonance line quality factor

Acknowledgements

The authors express their appreciation to Gleb V. Bezmen, the supervisor, and other colleagues for research assistance.

Введение

С развитием передовых технологий, обеспечивающих компонентную базу для создания гироскопических устройств, основанных на применении квантовых эффектов, возродился интерес к разработке приборов квантовой электроники для решения задач навигации [1–3]. Целью разработки квантовых датчиков вращения (КДВ) является создание гироскопа, близкого по точностным характеристикам к гироскопам на эффекте Саньяка и превосходящего их по массогабаритным и эксплуатационным характеристикам [4–6].

Работа КДВ на эффекте ядерного магнитного резонанса основана на измерении частоты прецессии вектора намагниченности ядер изотопов ксенона, которые прецессируют в инерциальном пространстве с постоянной скоростью (ларморовской частотой), определяемой напряженностью магнитного поля, созданного вдоль оси чувствительности прибора. На подвижном основании измеряемая частота будет суммой ларморовской частоты и частоты вращения основания в инерциальном пространстве [7–11]. Для формирования макроскопического вектора намагниченности ядер изотопов ксенона и для детектирования частоты его прецессии используется накачка через спин-обменное взаимодействие ксенона с оптически ориентированным цезием и соответственно магнитометр на цезии. Указанные физические процессы происходят в газовой ячейке КДВ, которая обычно имеет кубическую форму и наполнена газовой смесью ксенона и азота, а также парами цезия [12–14]. В ячейку помещается металлический цезий в виде капли массой около 5 мг. В ходе эксплуатации КДВ давление насыщенных паров цезия регулируется посредством изменения температуры ячейки. При остывании прибора (после его выключения) происходит осаждение паров щелочного металла на наиболее холодные стенки, что приводит к перераспределению цезия по ячейке.

В работе исследовалось влияние нежелательного перераспределения цезия по стенкам газовой ячейки на фактор качества резонансной линии.

Факторы, определяющие чувствительность КДВ

В настоящей работе под термином фактор качества резонансной линии понимается параметр, определяющий минимальную погрешность измерения частоты резонанса $\delta\omega$ [15, 16]:

$$\delta\omega = \frac{1}{Q} \sqrt{\Delta f},$$

где Δf — полоса пропускания, Q — фактор качества резонансной линии.

Фактор качества резонансной линии определяется отношением сигнал–шум и скоростью релаксации рабочего вещества:

$$Q = \frac{1}{\sigma_N} \left. \frac{dS}{d\omega} \right|_{\Delta\omega=0} \approx \frac{S}{\sigma_N \Gamma},$$

где S — амплитуда сигнала, σ_N — спектральная плотность шума, $\Delta\omega$ — отстройка частоты радиополя (переменного магнитного поля, создаваемого катушками) от частоты магнитного резонанса, $\frac{dS}{d\omega}$ — крутизна резонанса, Γ — скорость релаксации рабочего вещества.

Физический смысл фактора качества резонансной линии поясняет рис. 1.

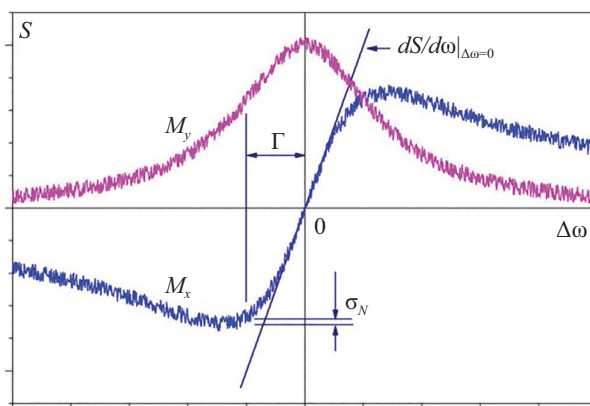


Рис. 1. Пояснение физического смысла фактора качества резонансной линии, где M_x — дисперсный контур резонанса, M_y — лоренцевский контур резонанса

Из рис. 1 видно, что крутизна резонанса $\frac{dS}{d\omega}$ может быть определена как отношение амплитуды сигнала S к полуширине резонансной линии, которая имеет значение скорости релаксации Γ . Далее в работе будет рассмотрено влияние распределения цезия в ячейке КДВ на скорость релаксации щелочного металла и на амплитуду сигнала, которая меняется вследствие изменения прозрачности стенок газовой ячейки.

Исследование скорости релаксации щелочного металла

Скорость релаксации определяется такими факторами, как релаксация цезия на стенках ячейки, поглощение атомов стенками, потеря атомов в резервуаре, спин-обменное и световое уширение линии резонанса:

$$\Gamma = \Gamma_{1wall} + \Gamma_{2wall} + \Gamma_{hole} + \Gamma_{coll} + \Gamma_{light} \tag{1}$$

где Γ_{1wall} — релаксация на стенке ячейки, Γ_{2wall} — поглощение атомов стенками, Γ_{hole} — потеря атомов в резервуаре, Γ_{coll} — спин-обменное уширение, Γ_{light} — световое уширение.

Значения слагаемых выражения (1) поясняются в [15]. Математическая модель, использованная для расчета скорости релаксации цезия, также учитывает уширение линии резонанса под воздействием переменного магнитного поля.

Экспериментально определить скорость релаксации щелочного металла можно, измерив полуширину линии резонанса. На рис. 2 приведен пример записи линии цезиевого резонанса при варьировании напряженности поля вдоль оси чувствительности КДВ и постоянной частоте радиополя.

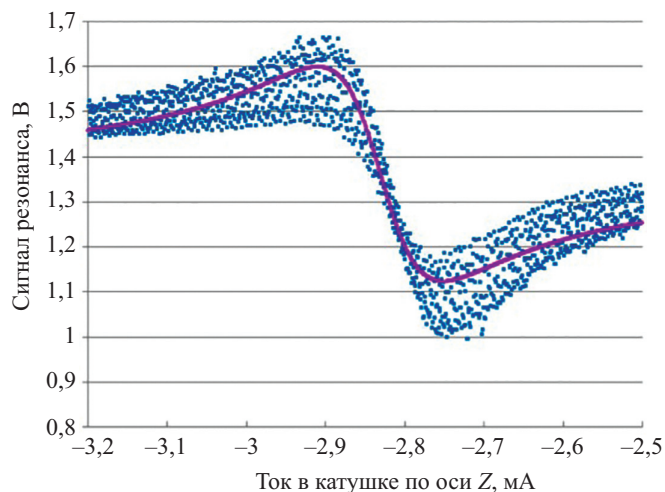


Рис. 2. Вид сигнала параметрического резонанса цезия

При аппроксимации линии цезиевого резонанса дисперсной кривой можно найти его ширину по току для расчета скорости релаксации по следующей формуле:

$$\Gamma = \gamma \Delta I_z K,$$

где γ — гиромагнитное отношение; ΔI_z — полуширина линии резонанса цезия, определяется по току в катушке Z , задающей ось чувствительности КДВ; K — коэффициент катушки Z .

На основе экспериментальных данных о ширине цезиевого резонанса было проведено исследование влияния осаждения паров щелочного металла на стенки ячейки на скорость релаксации цезия (таблица).

Таблица. Сравнение теоретических и экспериментальных данных о скорости релаксации

Температура, °С	Скорость релаксации Γ , Гц		
	Расчет по математической модели	Измерение 11.06.2018	Измерение 06.08.2018
60	705	515	530
65	717	530	510
70	732	555	500
75	759	581	550
80	792	605	570

В соответствии с экспериментальными результатами, полученными за несколько месяцев наблюдений, скорость релаксации цезия не изменилась, несмотря на видимое ухудшение прозрачности стенок ячейки из-за осевших паров цезия. Данный эффект может быть объяснен тем, что ячейка КДВ не содержит антирелаксационного покрытия и при соударении атомов цезия со стенкой ячейки вероятность их релаксации близка к единице и не увеличивается при наличии на стенке металлического цезия. В исследуемой ячейке для предотвращения релаксации цезия на стенках применяется буферный газ — азот. Применение буферного газа значительно снижает скорость диффузии атомов цезия и с учетом их времени жизни можно считать, что атомы цезия неподвижны в ячейке.

Таким образом, роль пристеночной релаксации в уширении линии цезиевого резонанса незначительна в сравнении с релаксацией, вызванной соударениями с изотопами ксенона, а также оптическим уширением и уширением радиополем.

Исследование изменения прозрачности стенок газовой ячейки

Неконтролируемое перераспределение цезия по стенкам газовой ячейки, вызванное оседанием его паров или перемещением капель металлического цезия вследствие механических воздействий, приводит к изменению прозрачности стенок газовой ячейки и соответственно к изменению амплитуды сигнала, вызванному изменением эффективной мощности накачки и изменением амплитуды сигнала детектирования. Поскольку данный эффект может явиться причиной потери работоспособности КДВ, необходимо решить задачу оперативного контроля прозрачности стенок ячейки.

Для отработки методики исследования изменения прозрачности стенок газовой ячейки был создан лабораторный стенд, в который установлены вертикально излучающий лазер, аналогичный применяемому в макете КДВ, ячейка и фотоприемник (рис. 3).

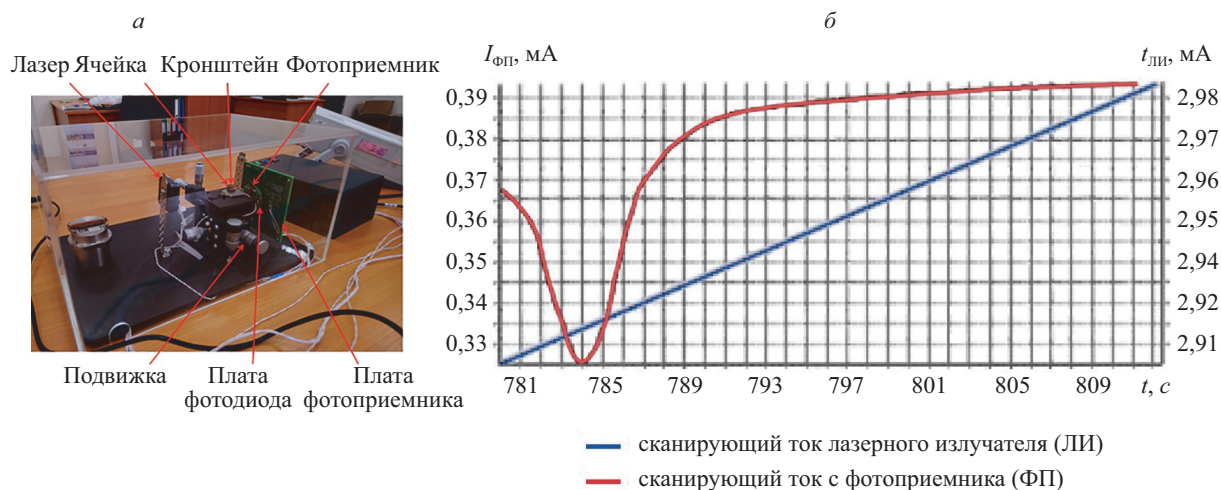


Рис. 3. Лабораторный стенд для исследования оптического резонанса в парах цезия.

a — фото стенда, *б* — график изменения тока на фотоприемнике при линейном увеличении тока накачки лазера

Мощность светового потока, прошедшего через ячейку и приходящего на фотоприемник, определяется:

- 1) мощностью излучения на выходе лазера;
- 2) уровнем резонансного поглощения в рабочем веществе;
- 3) потерями в пассивных оптических элементах, включая потери на стенках ячейки.

Учет нестабильности мощности светового излучения на выходе лазера можно осуществить, применяя оптическую схему, в которой в каналы накачки и детектирования установлены дополнительные светоделительные кубы, которые позволят контролировать интенсивность светового потока до ячейки. Однако такие кубы, отщепляя часть лазерного излучения, снижают его мощность примерно на 10 %, ухудшая эффективность накачки и детектирования. С учетом достаточно высокой стабильности лазерных излучателей, используемых в КДВ [17], предлагается методика, позволяющая контролировать состояние оптических каналов, используя только интенсивность излучения после ячейки.

Результаты экспериментальных исследований показали, что для обеспечения неизменной от пуска к пуску мощности лазерного излучения требуется не только стабильная температура кристалла лазера и тока накачки, но и постоянная температура корпуса лазера.

Поглощение света рабочим веществом зависит от длины волны лазерного излучения и от температуры ячейки, поскольку температура ячейки определяет давление насыщенных паров цезия. При отстройке от оптического резонанса зависимость от концентрации паров цезия значительно падает, однако слишком большая отстройка не допустима, поскольку работа лазера будет происходить не в штатном режиме, что может привести к нестабильности характеристик излучения. На лабораторном стенде были определены оптимальные параметры по отстройке от частоты резонанса цезия, при которых лазер работает в штатном режиме, и отсутствуют колебания его мощности и поляризации. Отстройка от частоты резонанса цезия производилась изменением тока накачки лазерного излучателя.

Предложенная методика была опробована на макете КДВ. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 4.

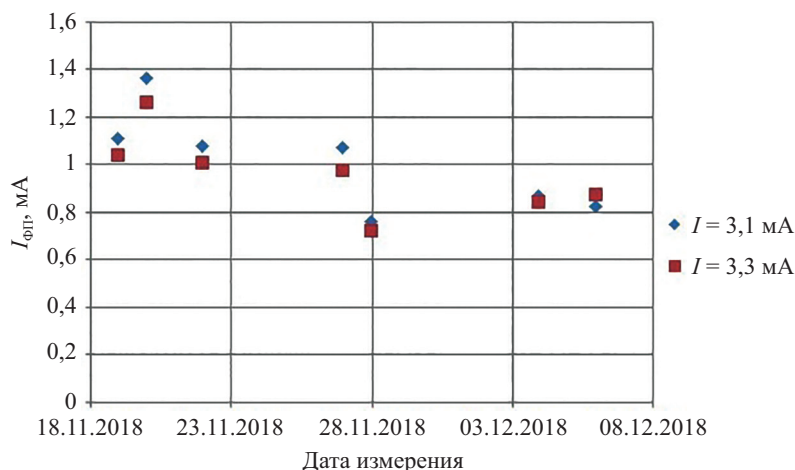


Рис. 4. Изменение с течением времени тока на фотоприемнике, стоящем после газовой ячейки, при заданных токах накачки лазерного излучения (3,1 и 3,3 мА)

В ходе экспериментальных исследований было определено, что за 3 недели снижение интенсивности накачки составило 35,6 %, детектирования 30,3 % — это привело к снижению фактора качества резонансной линии на 8 %. Приведенная методика не позволяет различить, чем именно вызвано снижение мощности: ухудшением прозрачности ячейки или деградацией лазера, в связи с чем было принято решение о переборке оптической схемы датчика.

Заключение

Таким образом, по результатам экспериментальных и теоретических исследований сделан вывод о том, что оседание паров цезия на стенки газовой ячейки не приводит к значительному уширению цезиевого резонанса, и изменение этого параметра не может являться достоверным признаком нежелательного перераспределения цезия по газовой ячейке. Также в работе показано, что изменение прозрачности оптических каналов из-за осаждения цезия приводит к ухудшению отношения сигнал–шум и к снижению качества резонанса. Предложенный в работе метод контроля интенсивности нерезонансного света, прошедшего через ячейку, позволяет оперативно контролировать состояние каналов оптической накачки и детектирования.

Литература

1. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1. С. 3–16.
2. Fang J.C., Qin J. Advances in atomic gyroscopes: a view from inertial navigation applications // *Sensors*. 2012. V. 12. N 5. P. 6331–6346. doi: 10.3390/s120506331
3. Feng D. Review of quantum navigation // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. V. 237. P. 032027. doi: 10.1088/1755-1315/237/3/032027
4. Simpson J.H., Fraser J.T., Greenwood I.A. An optically pumped nuclear magnetic resonance gyroscope // *IEEE Transactions on Aerospace*. 1963. V. 1. N 2. P. 1107–1110. doi: 10.1109/ta.1963.4319483
5. Larsen M., Bulatowicz M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: for DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program // *Proc. IEEE Int. Frequency Control Symposium*, 2012. doi: 10.1109/fcs.2012.6243606
6. Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалёв А.С., Пешехонов В.Г. Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // *Гироскопия и навигация*. 2018. Т. 26. № 1. С. 55–80. doi: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080
7. Мейер Д., Ларсен М. Гироскоп на ядерном магнитном резонансе для инерциальной навигации // *Гироскопия и навигация*. 2014. № 1 (84). С. 3–13.
8. Умарходжаев Р.М., Павлов Ю.В., Васильев А.Н. История разработки гироскопа на основе ядерного магнитного резонанса в России в 1960–2000-е годы // *Гироскопия и навигация*. 2018. Т. 26. № 1 (100). С. 3–27. doi: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.003-027
9. Попов Е.Н., Баранцев К.А., Литвинов А.Н., Курапцев А.С., Воскобойников С.П., Устинов С.М., Ларионов Н.В., Ликумович Л.Б., Ушаков Н.А., Шевченко А.Н. Частотная линия ядерного магнитного резонанса в квантовом датчике вращения: негативное влияние ядерные схемы детектирования // *Гироскопия и навигация*. 2016. Т. 24. № 4 (95). С. 3–13. doi: 10.17285/0869-7035.2016.24.4.003-013
10. Литманович Ю.А., Вершовский А.К., Пешехонов В.Г. Гироскоп на основе явления ядерного магнитного резонанса: прошлое, настоящее, будущее // *Материалы пленарного заседания 7-й Российской мультиконференции по проблемам управления*. СПб., 2014. С. 35–42.
11. Попов Е.Н., Баранцев К.А., Ушаков Н.А., Литвинов А.Н., Ликумович Л.Б., Шевченко А.Н., Скляр Ф.В., Медведев А.В. Характер сигнала оптической схемы квантового датчика вращения на основе ядерного магнитного резонанса // *Гироскопия и навигация*. 2018. Т. 26. № 1 (100). С. 93–106. doi: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.093-106
12. Walker T.G., Larsen M.S. Spin-exchange-pumped NMR gyros // *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*. 2016. V. 65. P. 377–405. doi: 10.1016/bs.aamop.2016.04.002
13. Шевченко А.Н., Кузьмин А.Г., Титов Ю.А. Масс-спектрометрическое измерение состава газовых смесей в ячейках квантового датчика вращения // *Научное приборостроение*. 2018. Т. 28. № 2. С. 62–68.
14. Шевченко А.Н., Кислицина Е.А. Методика формирования требований к градиенту магнитного поля при определении метрологических характеристик ячеек ядерного магнитного гироскопа // *Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО*. СПб., 2018. С. 176–179.
15. Вершовский А.К., Пазгалев А.С. Оптимизация фактора качества магнитного M_x -резонанса в условиях оптической накачки // *Журнал технической физики*. 2008. Т. 78. № 5. С. 116–124.
16. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. Физические основы квантовой магнитометрии. М.: Наука, 1972. 448 с.
17. Малеев Н.А., Блохин С.А., Бобров М.В., Кузьменков А.Г., Кулагина М.М., Устинов В.М. Источник лазерного излучения для компактного гироскопа на эффекте ЯМР // *Гироскопия и навигация*. 2018. Т. 26. № 1. С. 81–92. doi: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.081-092

References

1. Peshekhonov V.G. Gyroscopic systems: current status and prospects. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 111–118. doi: 10.1134/S2075108711030096
2. Fang J.C., Qin J. Advances in atomic gyroscopes: a view from inertial navigation applications. *Sensors*, 2012, vol. 12, no. 5, pp. 6331–6346. doi: 10.3390/s120506331
3. Feng D. Review of quantum navigation. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 237, p. 032027. doi: 10.1088/1755-1315/237/3/032027
4. Simpson J.H., Fraser J.T., Greenwood I.A. An optically pumped nuclear magnetic resonance gyroscope. *IEEE Transactions on Aerospace*, 1963, vol. 1, no. 2, pp. 1107–1110. doi: 10.1109/ta.1963.4319483
5. Larsen M., Bulatowicz M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: for DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program. *Proc. IEEE Int. Frequency Control Symposium*, 2012. doi: 10.1109/fcs.2012.6243606
6. Vershovskii A.K., Litmanovich Yu.A., Pazgalev A.S., Peshekhonov V.G. Nuclear magnetic resonance gyro: threshold characteristics. *Gyroscopy and Navigation*, 2018. vol. 26, no. 1, pp. 55–80. (in Russian) doi: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080
7. Meyer D., Larsen M. Nuclear magnetic resonance gyro for inertial navigation. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, no. 1, pp. 3–13. (in Russian)
8. Umarchodzhaev R.M., Pavlov Yu.V., Vasilyev A.N. History of NMR gyroscope development in Russia in 1960–2000s. *Gyroscopy and Navigation*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 3–27. (in Russian) doi: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.003-027
9. Popov E.N., Barantsev K.A., Litvinov A.N., Kuraptsev A.S., Voskoboinikov S.P., Ustinov S.M., Larionov N.V., Liokumovich L.B., Ushakov N.A., Shevchenko A.N. Frequency line of nuclear magnetic resonance in quantum rotation sensor: negative effect of detection circuit. *Gyroscopy and Navigation*, 2016, vol. 24, no. 4, pp. 3–13. (in Russian) doi: 10.17285/0869-7035.2016.24.4.003-013
10. Litmanovich Yu.A., Vershovskii A.K., Peshekhonov V.G. Gyroscope based on the effect of nuclear magnetic resonance: past, present, future. *Proc. 7th Russian Multiconference on Control Problems, Plenary Meeting*. St. Petersburg, 2014, pp. 35–42. (in Russian)
11. Popov E.N., Barantsev K.A., Ushakov N.A., Litvinov A.N., Liokumovich L.B., Shevchenko A.N., Slyarov F.V., Medvedev A.V. Behavior of signal from optical circuit of quantum rotation sensor based on nuclear magnetic resonance. *Gyroscopy and Navigation*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 93–106. (in Russian) doi: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.093-106
12. Walker T.G., Larsen M.S. Spin-exchange-pumped NMR gyros. *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2016, vol. 65. pp. 377–405. doi: 10.1016/bs.aamop.2016.04.002
13. Shevchenko A.N., Kuzmin A.G., Titov Yu.A. Mass-spectrometric measurement of the gas mixtures composition in the cells of a quantum rotate sensor. *Scientific Instrument Engineering*, 2015, vol. 28, no. 2, pp. 62–68. (in Russian)
14. Kislitsina E.A., Shevchenko A.N. Magnetic field gradient requirements determination to identify a nuclear magnetic resonance gyroscope metrological characteristics. *Almanac of the ITMO University Young Scientists Scientific Papers*. St. Petersburg, 2018, pp. 176–179. (in Russian)
15. Vershovskii A.K., Pazgalev A.S. Optimization of the Q factor of the magnetic M_x resonance under optical pump conditions. *Technical Physics*, 2008, vol. 53, no. 5, pp. 646–654. doi: 10.1134/S1063784208050198
16. Pomerantsev N.M., Ryzhkov V.M., Skrotsky G.V. *Physical Fundamentals of Quantum Magnetometry*. Moscow, Nauka Publ., 1972, 448 p. (in Russian)
17. Maleev N.A., Blokhin S.A., Bobrov M.V., Kuzmenkov A.G., Kulagina M.M., Ustinov V.M. Laser source for compact nuclear magnetic resonance gyroscope. *Gyroscopy and Navigation*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 81–92. (in Russian) doi: 10.17285/0869-7035.2018.26.1.081-092

Авторы

Шевченко Александр Николаевич — заместитель начальника лаборатории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, Scopus ID: 57209169813, ORCID ID: 0000-0002-6303-0544, Standw.shev@gmail.com

Захарова Елена Андреевна — инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-8660-7385, keasunrise@gmail.com

Authors

Alexander N. Shevchenko — Deputy laboratory head, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, Scopus ID: 57209169813, ORCID ID: 0000-0002-6303-0544, Standw.shev@gmail.com

Elena A. Zakharova — engineer, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-8660-7385, keasunrise@gmail.com