

XXIV Международная научная конференция

НОВОЕ в
МАГНЕТИЗМЕ и
МАГНИТНЫХ
МАТЕРИАЛАХ



1 – 8 июля 2021 года
Сборник трудов

Москва, 2021

УДК 681.2.082.16, 53.082.79

ЗАВИСИМОСТЬ ПРЕДЕЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ БАЛАНСНОГО КВАНТОВОГО ЯМР ДАТЧИКА ВРАЩЕНИЯ ОТ РАЗМЕРА ГАЗОВОЙ ЯЧЕЙКИ

Петров В.И.

научный сотрудник АО «Концерн"ЦНИИ"Электроприбор»

Вершовский А.К.

д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе

***Аннотация.** Создание компактного балансного квантового датчика вращения (гироскопа) на эффекте ядерного магнитного резонанса в ксеноне представляет собой одну из наиболее насущных и перспективных задач современной метрологии. Предельная точность такого датчика ограничена эффектом изотопического сдвига, который, в свою очередь, обусловлен разницей времен релаксации двух изотопов ксенона в условиях пространственно неоднородной спин-обменной накачки ядерных магнитных моментов. В работе представлены зависимости величины изотопического сдвига от размера содержащей рабочее вещество газовой ячейки, полученные методами численного моделирования на основе данных эксперимента, а также рекомендации по оптимизации параметров ячейки при уменьшении её размеров.*

***Ключевые слова:** ядерный магнитный резонанс, прецессия ядерного момента, изотопический сдвиг, стабильность сдвига нуля*

DEPENDENCE OF THE ULTIMATE ACCURACY OF THE BALANCED QUANTUM NMR ROTATION SENSOR ON THE SIZE OF THE GAS CELL

Petrov V. I.

Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg 197046, Russia

Vershovskii A.K.

Ioffe Institute, St. Petersburg 194021, Russia

***Annotation.** Development of a compact balanced rotation sensor (gyroscope) based on the effect of nuclear magnetic resonance in xenon is one of the most needful and promising tasks of modern metrology. The accuracy of such sensor is limited by the effect of the isotope shift, which is caused by the difference in the relaxation times of two xenon isotopes under conditions of spatially inhomogeneous spin-exchange pumping of nuclear magnetic moments. The article presents the dependences of the isotope shift value on the size of the gas cell containing the working substance, obtained by numerical simulation methods based on experimental data, as well as recommendations for optimizing the decreasing in size cell parameters.*

***Keywords:** nuclear magnetic resonance, nuclear moment precession, isotope shift, zero shift stability*

На основе явления прецессии Лармора возможно построение квантового датчика вращения (КДВ). Для исключения магнитного шума применяется балансная схема КДВ,

использующая два ядерных парамагнетика (изотопа), обладающих разными величинами гиромагнитных отношений. Это позволяет, решая систему из двух уравнений с двумя неизвестными, определить и скорость вращения системы, и величину магнитного поля.

В 2013 г. было обнаружено [1], что соотношение между частотами ларморовской прецессии двух изотопов ксенона ^{129}Xe и ^{131}Xe , находящихся в одной ячейке, и возбуждаемых спин-обменом с атомами находящегося в той же ячейке щелочного металла, не сохраняется при изменении знака и степени поляризации щелочного металла (ЩМ). Было приведено значение относительной разности $\delta B_A = 0,0017$ величин эффективного внутреннего поля B_a , при измерении его магнитометрами на используемых изотопах ^{129}Xe и ^{131}Xe . Этот эффект был назван изотопическим сдвигом (ИС). Было показано [2], что ИС является основным фактором, ухудшающим долговременные точностные характеристики балансных датчиков. Наши экспериментальные исследования показали, что ИС не является постоянной величиной: при изменении температуры величина δB_A меняет не только значение, но и знак. Нами было высказано и впоследствии доказано предположение о том [3, 4], что эффект ИС вызван поглощением света оптической накачки в оптически плотной среде. Поляризованные преимущественно у фронтальной поверхности рабочей ячейки, т.е. в области, где внутреннее поле максимально, атомы Хе диффундируют по объему ячейки, усредняя неоднородное внутреннее поле. Чем больше время жизни атома Хе в поляризованном состоянии, тем ближе измеренное значение внутреннего поля к среднему по ячейке.

Данных, приведенных на рис. 1 из работы [5], достаточно для того, чтобы разделить вклады объемной и пристеночной релаксации для обоих изотопов ксенона, и в дальнейшем варьировать в модели величину суммарного давления P при сохранении отношения парциальных давлений P_{N_2} и P_{Xe} . Эти данные позволили нам модифицировать численную модель, описанную в [4], и дополнить ее зависимостями скоростей релаксации Хе от температуры ячейки и суммарного давления газовой смеси. Структура, описывающая атомный ансамбль в нашей численной модели, графически представлена на рис. 1.

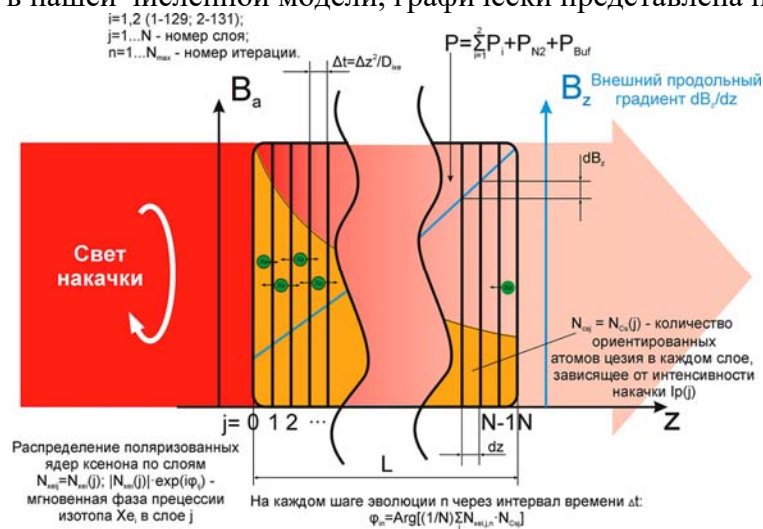


Рис. 1. Физическая основа численной модели. Ячейка делится в направлении распространения света накачки на $j=1 \dots N$ слоёв, в каждом из которых вычисляется распределение поляризованных ядер каждого i -го Хе ($i=1, 2$; 1 – ^{129}Xe , 2 – ^{131}Xe), их фаза прецессии ϕ_j , на каждом n -ом ($n=1 \dots N_{max}$) шаге итерации. Время шага итерации определяется как среднее время прохождения одного слоя ячейки $\Delta t = \Delta z^2 / D_{Xe}$, где D_{Xe} – коэффициент диффузии ксенона в цезии.

Ниже представлены расчётные зависимости температурного сдвига нуля балансного датчика вращения от суммарного давления P ; расчет основан на модифицированной модели [4, 5] и данных [5] об оптимальных температурах и давлениях. На последующих рисунках представлены иллюстративные расчётные зависимости поведения сдвига нуля балансного датчика вращения от давления и температуры для кубических ячеек с длиной ребра L от 1 до 20 мм. Используя эти зависимости, можно оценить пригодность ячейки соответствующего

размера для построения датчика вращения навигационного класса с допуском на сдвиг нуля $0,001$ °/час/мК, учитывая, что точность системы термостабилизации может составить от 1 до 10 мК.

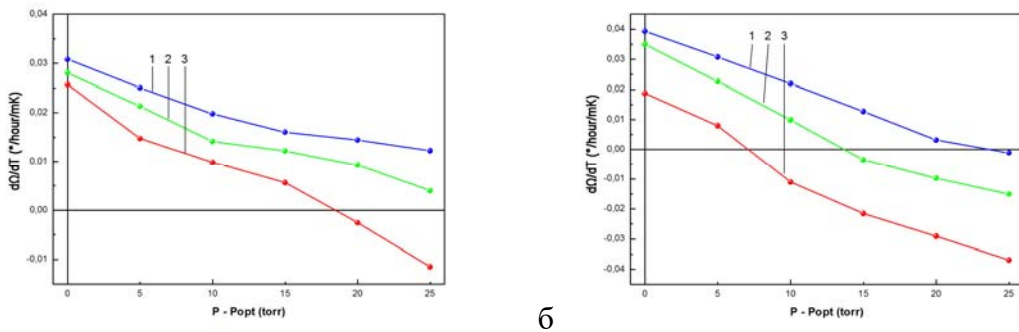


Рис. 2. Расчётные зависимости температурного сдвига нуля балансного датчика вращения при суммарном давлении, превышающем оптимальное; а - для ячейки 20 мм, 1 – $T_{opt}-3$ °C, 2 – T_{opt} , 3 – $T_{opt}+3$ °C; б – для ячейки 10 мм, 1 – $T_{opt}-3$ °C, 2 – T_{opt} , 3 – $T_{opt}+3$ °C.

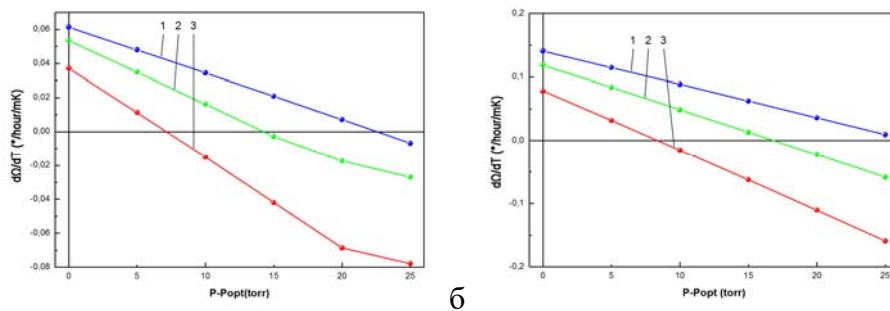


Рис. 3. Расчётные зависимости температурного сдвига нуля балансного датчика вращения при суммарном давлении, превышающем оптимальное; а - для ячейки 5 мм, 1 – $T_{opt}-3$ °C, 2 – T_{opt} , 3 – $T_{opt}+3$ °C; б – для ячейки 2 мм, 1 – $T_{opt}-3$ °C, 2 – T_{opt} , 3 – $T_{opt}+3$ °C.

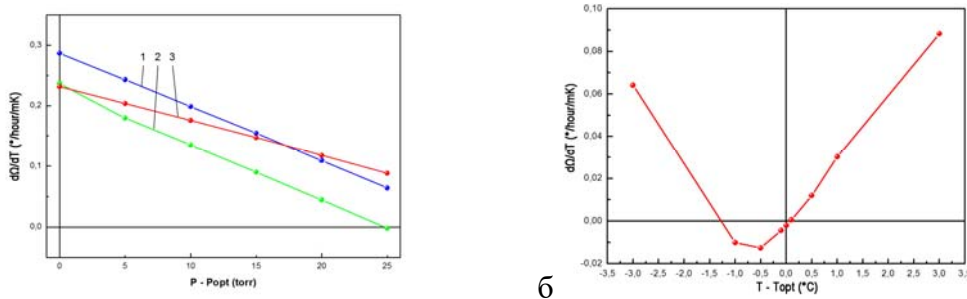


Рис. 4. Расчетные зависимости температурного сдвига нуля балансного датчика вращения для ячейки 1 мм при суммарном давлении, превышающем оптимальное; а – от давления при 1 – $T_{opt}-3$ °C, 2 – T_{opt} , 3 – $T_{opt}+3$ °C; б – от температуры при $P = P_{opt}+25$ торр.

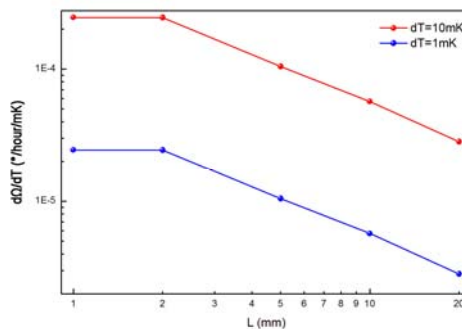


Рис. 5. Предельно достижимая стабильность сдвига нуля квантового датчика вращения для ячеек в диапазоне размеров от 1 до 20 мм в диапазоне стабильности температуры от 1 до 10 мК.

Выводы

Приведённые данные расчётов дают представление о предельно достижимой стабильности сдвига нуля квантовых датчиков вращения, построенных на газовых ячейках с изотопами ксенона ^{129}Xe и ^{131}Xe в широком диапазоне размеров ячеек и давлений газовой смеси при температурах, близких к оптимальным по светопропусканию. Отмечается, что при сочетании оптимальной температуры и давления, несколько превышающем оптимальное, вполне возможно подавление сдвига нуля, обусловленного эффектом изотопического сдвига, до уровня ниже $0,001$ °/час/мК на ячейках всех исследованных размеров. При этом снижение размера ячейки ниже 1 мм приведёт к значительному усилению неоднородности внутреннего поля ячейки вследствие критического влияния пристеночной релаксации, что, в свою очередь, вызовет сложнопрогнозируемые изменения изотопического сдвига, и как следствие – сдвига нуля датчика.

Список использованных источников:

1. Bulatowicz, M., Griffith, R., Larsen, M., Mirijanian, J., Fu, C. B., Smith, E., Snow W. M., Yan, H., and Walker, T.G. Laboratory Search for a Long-Range T-Odd, P-Odd Interaction from Axionlike Particles Using Dual-Species Nuclear Magnetic Resonance with Polarized ^{129}Xe and ^{131}Xe Gas // PRL, vol.111, 2013 - pp.102001.
2. Walker T., Larsen M. Chapter eight–spin-exchange-pumped NMR gyros // Adv. At. Mol. Opt. Phys. Vol. 65, 2016 - p. 373–401.
3. Вершовский А. К., Пазгалёв А. С., Петров В. И. Природа эффекта рассогласования частот прецессии ядер ^{129}Xe и ^{131}Xe при спин-обменной накачке атомами щелочного металла // Журнал технической физики. № 7, т. 44, 2018 - с. 88 - 94.
4. Petrov V.I., Pazgalev A.S., Vershovskii A.K. Isotope Shift of Nuclear Magnetic Resonances in ^{129}Xe and ^{131}Xe Caused by Spin-Exchange Pumping by Alkali Metal Atoms // IEEE Sensors Journal. Vol. 20, № 2, 2020 - p. 760–766.
5. Вершовский А. К., Петров В. И. Моделирование размерных зависимостей изотопического сдвига ЯМР в ксеноне // Гироскопия и навигация. Т.28, №2 (109). 2020 - с. 11-24.
6. Happer, W., Miron, E., Schaefer, S., Schreiber, D., W. A. van Wijngaarden, and Zeng X. Polarization of the nuclear spins of noble-gas atoms by spin exchange with optically pumped alkali-metal atoms // Phys. Rev. A. Vol. 29, № 6. 1984 - p. 3092–3110.
7. Zeng, X., Wu, Z., Call, T., Miron, E., Schreiber, D., and Happer, W. Experimental determination of the rate constants for spin exchange between optically pumped K, Rb, and Cs atoms and ^{129}Xe nuclei in alkali-metal – noble-gas van der Waals molecules // Phys. Rev. A. Vol. 31, № 1. 1985 - p. 260–278.
8. Hsu, J., Wu, Z., Happer, W. Cs induced ^{129}Xe nuclear spin relaxation in N_2 and He buffer gases // Physics Letters A. Vol. 112, № 3. 1985 - p. 141–145.
9. Wu, Z., Schaefer, S., Cates, G. D., and Happer W. Coherent interactions of the polarized nuclear spins of gaseous atoms with the container walls // Phys. Rev. A. Vol. 37, № 4. 1988 - p. 1161–1175.
10. Wu, Z., Happer, W., Kitano, M., and Daniels, J. Experimental studies of wall interactions of adsorbed spin-polarized ^{131}Xe nuclei // Phys. Rev. A. Vol. 42, № 5. 1990 - p. 2774–2784.
11. Вершовский А.К., Пазгалёв А.С. Оптимизация фактора качества магнитного Мх-резонанса в условиях оптической накачки // ЖТФ. № 5. 2007 - с. 116–124.