

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА РАССОГЛАСОВАНИЯ БАЛАНСНОЙ СХЕМЫ ГИРОСКОПА НА ЯМР

В. И. ПЕТРОВ¹

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30, office@eprib.ru)

А. С. ПАЗГАЛЁВ², А. К. ВЕРШОВСКИЙ³

(ФТИ им. Иоффе, С.-Петербург, ул. Политехническая, 26, antver@mail.ioffe.ru)

Аннотация

Проведено исследование основного фактора, деструктивно влияющего на характеристики балансной схемы гироскопа на ядерном магнитном резонансе (ЯМР) – эффекта рассогласования, обусловленного различием влияния поля щелочного металла на изотопы ксенона. Предложен способ минимизации этого эффекта посредством внесения локального градиента магнитного поля и подбора температуры рабочей газовой ячейки.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, газовая ячейка, лазерная накачка, прецессия, балансная схема.

Введение

Важнейшей задачей при создании гироскопа на ЯМР [1] является исключение неконтролируемых сдвигов нуля при определении угла поворота. Поэтому в нем используется балансная схема построения, использующая два ядерных парамагнетика, обладающих существенно разными гиромагнитными отношениями, что позволяет исключить влияние факторов, одинаковым образом воздействующих на оба вещества, в первую очередь вариаций магнитного поля. Однако балансная схема не позволяет устранить эффект рассогласования, или изотопический сдвиг, по-разному воздействующий на рабочие вещества. О существовании этой проблемы впервые было заявлено в работе [2] в 2013 г.

Нами предлагается гипотеза о возникновении эффекта рассогласования (ЭР) и технически несложно реализуемый способ минимизации и обнуления характеризующего ЭР параметра рассогласования посредством внесения локального градиента магнитного поля, компенсирующего градиент внутреннего, то есть созданного щелочными атомами, поля в рабочей газовой ячейке гироскопа на ЯМР.

Предлагаемый доклад посвящен исследованию балансной схемы гироскопа на ЯМР, в ходе которого определен основной деструктивный фактор балансной схемы – различие степени воздействия внутреннего поля на два изотопа ксенона. Предложен способ минимизации этого эффекта посредством управления локальным градиентом магнитного поля и температурой газовой ячейки.

Гипотеза о возникновении ЭР

Гироскоп на ЯМР основан на принципах квантовой оптики, взаимодействии света и вещества на основе их квантовой природы. В гироскопе в качестве датчиков вращения выступают атомы рабочего вещества – благородного газа ксенона (Xe).

Поведение магнитного момента атома или ядра в магнитном поле подобно поведению механического момента (волчка) в поле тяжести. Моменты прецессируют, и их наблюдаемая скорость прецессии зависит от скорости вращения системы координат Ω , что позволяет измерить эту скорость вращения, измеряя скорость прецессии.

Основным препятствием к этому является зависимость частоты прецессии от величины магнитного поля B_0 . Коэффициент пропорциональности между магнитным полем B и частотой прецессии ω называется гиромагнитным отношением γ . Простые оценки показывают, что магнитное поле невозможно стабилизировать с такой точностью, чтобы достичь точности гироскопа, сравнимой с точностью механических или оптических устройств. Поэтому в гироскопе на ЯМР ис-

¹ Научный сотрудник.

² Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

³ Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.

пользуется балансная (в первом приближении нечувствительная к величине магнитного поля) схема: вместо одного типа ядер используют два типа (изотопа), характеризующиеся разными величинами и знаками гиромагнитных отношений γ_1 и γ_2 . Это позволяет, решая систему из двух уравнений с двумя неизвестными, определить и скорость вращения системы, и величину магнитного поля. При этом стабильность ЯМГ полностью основана на стабильности отношения γ_1/γ_2 .

Кроме двух изотопов с ядерными моментами (изотопов Хе), в гироскопе на ЯМР используется третье вещество – щелочной металл (ЩМ) цезий Cs или рубидий Rb в парообразном состоянии. Он необходим и для того, чтобы передать моментам ядер ксенона ориентацию от света накачки, и для того, чтобы зарегистрировать прецессию ядер ксенона.

Магнитные моменты атомов ЩМ напрямую ориентируются светом, что приводит к возникновению магнитного поля внутри ячейки. Так как атомы ЩМ ориентированы вдоль вектора магнитного поля B_0 , то и созданное ими магнитное поле B_A (внутреннее поле) в среднем оказывается соосным с полем, задающим ось чувствительности. Направление внутреннего поля зависит от направления круговой поляризации накачивающего света.

При этом внутреннее поле измеряется атомами Хе не так, как любое другое магнитное поле, воздействующее на ячейку. Вследствие спин-обменного взаимодействия между ЩМ и Хе воздействие поля ЩМ на ядра Хе (так же как и обратное воздействие) оказывается примерно на три порядка сильнее, чем было бы в случае отсутствия прямого контакта (соударений) между атомами ЩМ и Хе. В этом проявляется так называемое спин-обменное усиление магнитного поля [3]; его величина индивидуальна для каждой пары веществ, участвующих во взаимодействии. Известно, что константы усиления при взаимодействиях между различными веществами (Rb и Kr, Rb и Хе, Cs и Хе и т.д.) могут различаться на несколько порядков, но до последнего времени ничего не было известно о различии этих коэффициентов при взаимодействии ЩМ с разными изотопами одного газа.

Однако в 2013 году была опубликована работа [2], авторы которой указали на наличие эффекта рассогласования (ЭР), т.е. на различие в значениях одного и того же внутреннего поля при измерении изотопами ^{129}Xe и ^{131}Xe . В своей работе они привели формулу, позволяющую вычислить относительное изменение частот прецессии изотопов ксенона при возникновении внутреннего поля; согласно [2], параметр рассогласования, численно равный относительному изменению частот прецессии при $B_A = B_0$, имеет фиксированную величину $\delta B_A = 0,0017$. Авторы не упомянули о зависимости этого параметра от каких-либо условий, видимо полагая данную величину константой по аналогии с константой спин-обменного усиления.

ЭР является деструктивным эффектом, определяющим жесткость требований к условиям функционирования гироскопа на ЯМР, в частности именно его наличие приводит к требованию к стабильности температуры рабочей ячейки гироскопа на ЯМР на уровне единиц мК. Обнуление ЭР позволило бы снизить это требование на два порядка. Нами проведены эксперименты с различными ячейками, при этом было отмечено, что параметр рассогласования принимает различные значения для разного состава газовой смеси. Исследование одной выбранной ячейки позволило установить наличие зависимости ЭР от температуры. Более того, нами были высказаны обоснованные предположения о природе ЭР и о возможности его обнуления.

Для определения величины рассогласования необходимо знать текущие значения внешнего B_0 и внутреннего B_A поля при различных поляризациях света накачки. В целях определения этих величин была проведена серия экспериментов, в которых накачка атомов цезия попеременно производилась светом с левой и правой круговой поляризацией (рис. 1).

В качестве магниточувствительного элемента использовались атомы ксенона – магнитное поле определялось по частоте их прецессии. При этом для определения внешнего поля вычислялась полусумма полей, измеренных атомами ксенона при разных поляризациях накачки, а для определения внутреннего поля – полуразность таких полей. Результаты исследования ячеек демонстрируют положительное приращение измеренного полного поля с ростом освещенности и/или концентрации паров металла для одной поляризации и отрицательное – для другой. Видно, что результаты измерения двумя изотопами Хе совпадают в пределах погрешности. Следует отметить, что измерение величины ЭР сопряжено с большой трудоемкостью – на одно измерение уходит порядка 30 минут, а каждая точка на графике представляет собой результат усреднения по ряду измерений.

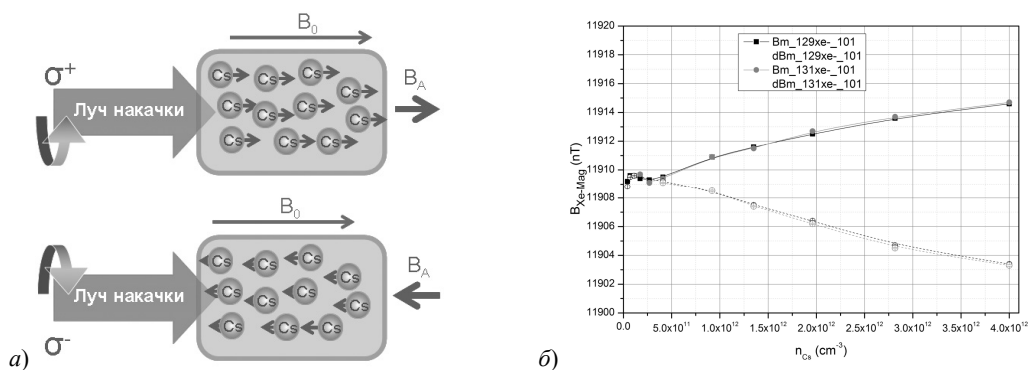


Рис. 1. Влияние поляризации света на накачку атомов цезия: а – иллюстрация ориентации накачки атомов цезия при воздействии света с разными круговыми поляризациями; б – экспериментальные зависимости магнитного поля, измеренного ядрами ксенона, от концентрации атомов цезия в объеме ячейки при двух поляризациях света накачки. Черный цвет – ^{129}Xe , серый – ^{131}Xe , сплошные линии – накачка поляризацией σ^+ , пунктир – накачка поляризацией σ^-

Нами было установлено, что ЭР обнуляется при совпадении времен релаксации свободной прецессии изотопов ксенона и выдвинута следующая гипотеза: эффект рассогласования объясняется неравенством времен релаксации изотопов в условиях наличия градиента магнитного поля.

Поясним эту идею схематически, изобразив газовую ячейку под действием поляризованного света накачки (рис. 2).

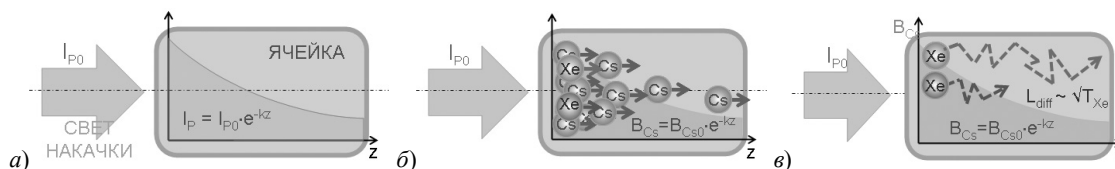


Рис. 2. Влияние физического размера газовой ячейки на величину внутреннего магнитного поля: а – распределение интенсивности света накачки по длине ячейки, б – соответствующее экспоненциальное снижение внутреннего магнитного поля ячейки, в – долгоживущий атом усредняет внутреннее поле по всем значениям, а короткоживущему изотопу достаются только максимальные значения

На рис. 2, а представлено экспоненциально затухающее распределение интенсивности света накачки внутри ячейки. На рис. 2, б показано, что степень поляризации атомов ЦМ и ксенона распределена в пространстве в соответствии с распределением интенсивности накачки. Внутреннее поле ячейки, созданное поляризованными атомами ЦМ, также соответствует этому закону. Вероятность поляризации ядер ксенона пропорциональна степени поляризации ЦМ, и, следовательно, изначальное (еще не сглаженное диффузией) распределение плотности поляризованных ядер ксенона также соответствует этому закону. Здесь следует пояснить, что время жизни поляризованного состояния атомов ЦМ составляет десятки микросекунд, и атом ЦМ за время жизни не успевает существенно изменить свое положение в пространстве; напротив, время жизни поляризованного состояния ядер Хе составляет десятки секунд, и они за это время успевают многократно продиффундировать по объему ячейки.

Рис. 2, в демонстрирует диффузию поляризованных атомов ксенона внутри ячейки. Длина пробега атома зависит от времени жизни поляризованного состояния. Таким образом, атом более долгоживущего изотопа успевает испытать воздействие всех значений внутреннего поля – от самого большого до самого маленького, и в среднем частота его прецессии определяется полем, усредненным по всей ячейке. Атом изотопа, характеризуемого меньшим временем жизни, преимущественно находится под воздействием поля у передней стенки ячейки, и для него в среднем внутреннее поле оказывается большим, чем для первого.

Следовательно, для возникновения ЭР необходимо одновременное выполнение двух условий:

- 1) наличие разности времен релаксации двух изотопов,
- 2) наличие градиента полного магнитного поля в ячейке.

Эффект ЭР минимален при температуре T_{eq} , обеспечивающей равенство времен жизни изотопов; в нашем эксперименте такая температура составила $T_{eq} = 76^\circ\text{C}$. На рис. 3 приведены графики зависимости разности времен релаксации изотопов ^{129}Xe и ^{131}Xe (рис. 3, а) и величины δB_A (параметра рассогласования) от градиента внешнего поля (рис. 3, б) при $T = T_{eq}$.

Зависимость величины ЭР от градиента магнитного поля также отмечена в работе 2018 года [4]; эффект рассогласования, или изотопический сдвиг, ее авторы (как и мы) связывают с неоднородностью плотности атомов Хе при наличии градиента магнитного поля в ячейке. Но, в отличие от нас, они объясняют неоднородность плотности Хе неоднородностью температуры в рабочей ячейке; мы же показали, что эффект ЭР остается значительным и при малых температурных градиентах (в нашем эксперименте они не превышали $0,5^\circ\text{C}$ на размере ячейки), и дали объяснение этому. В [4] также приводится график квадратичной зависимости скорости релаксации от градиента поля – подобную зависимость ранее отметили и китайские исследователи [5].

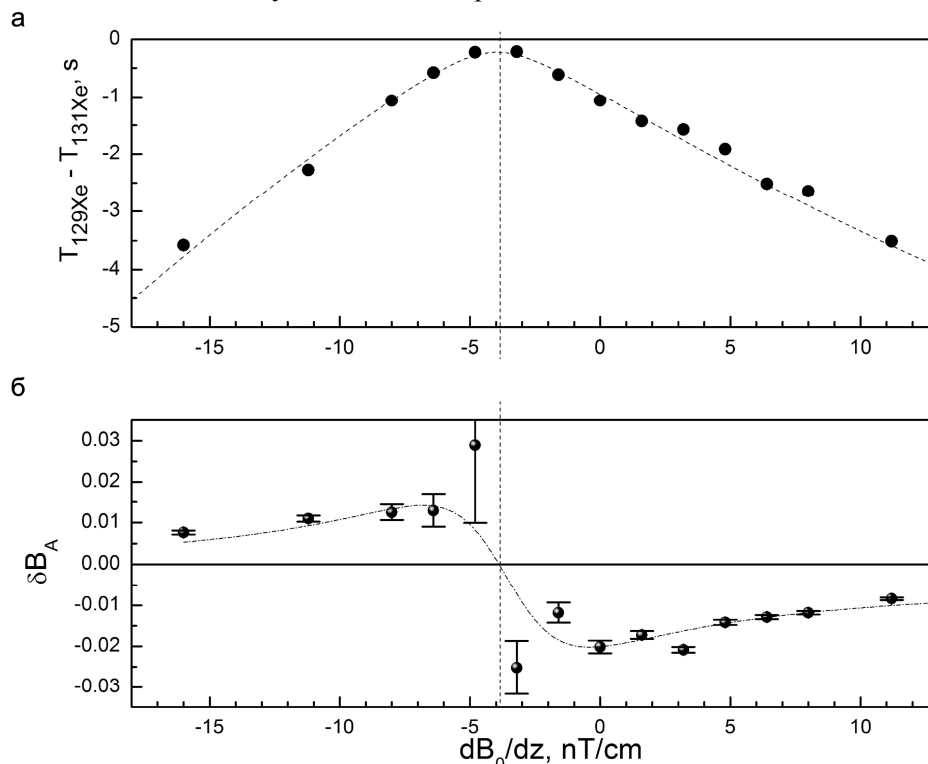


Рис. 3. Компенсация ЭР внесенным градиентом магнитного поля: а – зависимость разности времен релаксации изотопов ^{129}Xe и ^{131}Xe от градиента внешнего поля; б – зависимость величины δB_A (параметра рассогласования) от градиента внешнего поля

Как видно из рис. 3, б, величина ЭР стремится к нулю в области частичной компенсации градиента внутреннего поля B_A ; существенно, что даже при $T = T_{eq}$, но ненулевом градиенте нарушается равенство времен жизни изотопов Хе (рис. 3, а) и появляются условия для возникновения ЭР. Таким образом, возможно управлять ЭР при помощи внесения компенсирующего градиента магнитного поля на объеме ячейки; в сочетании с подбором температуры это позволит обнулить ЭР и, как следствие этого, снизить требования к стабильности температуры рабочего объема гироскопа на ЯМР на два порядка.

Заключение

Основной вывод на данном этапе заключается в том, что исследуемым параметром – величиной эффекта рассогласования – вполне можно управлять и обнулять его, во-первых, подбирая такую температуру рабочей ячейки, которая обеспечит равенство времен релаксации изотопов, и, во-вторых, компенсируя градиент внутреннего поля в ячейке. Такая компенсация градиента одновременно приведет к увеличению времен релаксации изотопов ксенона и, следовательно, к повышению чувствительности гироскопа на ЯМР.

В дальнейшем планируется продолжение работ по исследованию ЭР и влияния на него градиента магнитного поля, а также построение численной модели поведения атомов в условиях неоднородности внутреннего поля, которое позволит точнее интерпретировать результаты эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kanegsberg, E.**, A nuclear magnetic resonance (NMR) gyro with optical magnetometer detection, *SPIE, Laser Inertial Rotation Sensors*, 1978, vol. 157, pp. 73–80.
2. **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, *Physical Review Letters*, 2013, vol. 111, pp.102001.
3. **Grover, B.C.**, Noble-Gas NMR Detection through Noble-Gas-Rubidium Hyperfine Contact Interaction, *Physical Review Letters*, 1978, vol. 40, no. 6, pp. 391–392.
4. **Romalis, M., Kornack, T.**, Low Drift Nuclear Spin Gyroscope, January 2018, Final Report for Chip-scale combinatorial atomic navigator (C-SCAN) Program (2018).
5. **Xiaohu Liu, Chang Chen, Tianliang Qu, Kaiyong Yang & Hui Luo**, Transverse spin relaxation and diffusion-constant measurements of spin-polarized ^{129}Xe nuclei in the presence of a magnetic field gradient, *Nature, Scientific Reports* 6, Article number: 24122 (2016).

V. I. Petrov (Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint Petersburg), A. S. Pazgalev, A. K. Vershovskii (Ioffe Institute, Saint Petersburg)

Investigation of the effect of frequency mismatch in the balanced scheme of a NMR gyroscope

The factor that most destructively influences the characteristics of the balanced scheme of a NMR gyroscope, namely, the frequency mismatch effect due to the difference in the effect of the alkali metal field on xenon isotopes, has been investigated. A method is proposed for minimizing this effect by introducing a local magnetic field gradient and selecting the proper temperature of the gas cell.