

# О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КРИОГЕННОГО ФЕРРОМАГНИТНОГО ГИРОСКОПА

© Л.А.Левин

(Поступило в Редакцию 11 апреля 1995 г.)

В настоящее время в ряде стран (США, Великобритания) ведутся работы по поиску и исследованию криогенных чувствительных элементов с неподвижным носителем кинетического момента для бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Одно из направлений создания таких устройств основано на использовании момента количества движения (спина) элементарных частиц — протонов и электронов. В этих частицах момент количества движения жестко связан с магнитным моментом, при этом их оси у протонов направлены в одну сторону, а у электронов — в противоположные. Отношение момента количества движения к магнитному моменту называется магнитомеханическим (гиромагнитным) отношением [1]. Жесткая связь между моментом количества движения и магнитным моментом выражается зависимостью магнитной индукции от угловой скорости

$$B = \frac{\omega}{\gamma}, \quad (1)$$

где  $B$  — магнитная индукция в Тл,  $\omega$  — угловая скорость в с,  $\gamma$  — магнитомеханическое отношение в Тл·с (А·с·кг).

Известные три физических явления, соответствующие (1), на основе которых принципиально могут быть построены гироскопические устройства. Во-первых, это магниторезонансный эффект, лежащий в основе криогенного ядерного гироскопа (КЯГ). В КЯГ носителем кинетического момента является ансамбль атомов изотопа He [2]. КЯГ — наиболее исследованный и разработанный гироскоп этой группы, он содержит сферическую кварцевую ячейку, заполненную смесью газобразных  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$ , расположенную внутри системы сверхпроводящих магнитных экранов, обеспечивающих высокую однородность и стабильность магнитного поля, а также систему оптической поляризации, систему накачки, высокостабильный опорный генератор. Съём информации осуществляется с помощью сверхпроводящего квантового интерференционного детектора-сквида, самого чувствительного измерителя изменения магнитного потока.

Зависимость магнитной индукции, возбуждаемой вращением, имеет вид

$$B_{\text{я}} = \frac{\omega}{\gamma_{\text{я}}}, \quad (2)$$

где для  $^3\text{He}$   $\gamma_{\text{я}} \simeq 2.1 \cdot 10^8 \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

Для КЯГ считается приемлемым измерение угловой скорости  $10^{-2} \text{ рад/с} \approx 7.7 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$  [2]. При такой скорости  $B_{\text{я}} \simeq 3.7 \cdot 10^{-17} \text{ Тл}$ . Если диаметр сферической ячейки взять равным  $3.16 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , то магнитный поток, возбуждаемый вращением, будет равен  $\phi_{\text{я}} \simeq 3.7 \cdot 10^{-20} \text{ Вб}$ .

Сквид измеряет магнитный поток в долях кванта магнитного потока  $\phi_0$  ( $\phi_0 = 2.07 \cdot 10^{-15}$  Вб), тогда  $\phi_{\text{я}} \simeq 1.8 \cdot 10^{-5} \phi_0$ . Задача измерения такого потока сложная, но реальная. В настоящее время чувствительность отдельных сквидов достигает  $10^{-6} \phi_e$  [3].

Второе физическое явление, обеспечивающее выполнение (1), — это намагничённость, возникающая при вращении сверхпроводника, так называемый момент Лондона [4]. В этом случае роль носителя кинетического момента играют сверхпроводящие электроны. Зависимость магнитной индукции момента Лондона от угловой скорости имеет вид

$$B_{\text{л}} = \frac{\omega}{\gamma_{\text{л}}}. \quad (3)$$

Здесь  $\gamma_{\text{л}} \simeq 8.8 \cdot 10^{10}$  А·с·кг<sup>-1</sup>. Для  $\omega = 10^{-2}$  0/4 получим магнитную индукцию  $B_{\text{л}} \simeq 8.7 \cdot 10^{-20}$  Тл, что для  $S = 10^{-2}$  м<sup>2</sup> даёт магнитный поток  $\phi_{\text{л}} \simeq 4.4 \cdot 10^{-8} \phi_0$ . Такой поток не может быть измерен даже сквидом. Магнитомеханическое отношение состоит только из фундаментальных физических постоянных,  $\gamma_{\text{л}} = e/(2m)$ , где  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона, и нет никаких практических путей увеличения потока. Момент Лондона используется для определения ориентации быстровращающихся сверхпроводящих тел, например сферического ротора криогенного гироскопа с электростатическим подвесом [5]. В настоящее время момент Лондона не представляет интереса для создания на его основе гироскопа.

И, наконец, третье явление — это намагничённость, возникающая при вращении тел из ферромагнитных и парамагнитных материалов, так называемый эффект Барнетта [6]. Это — эффект, обратный широко известному из курса физики эффекту Эйнштейна-де Гааза — вращению ферромагнитного цилиндра, помещённого внутри соленоида, при изменении направления магнитного поля в соленоиде. Эффект Барнетта известен с 1914 г., он в основном использовался для определения магнитомеханического отношения различных материалов. С точки зрения классической физики эффект Барнетта объясняется прецессией спина электрона. Выражение эффекта Барнетта для ферромагнитного материала отличается от (1) только постоянным коэффициентом и имеет вид

$$B_{\text{Б}} = \frac{\omega}{\gamma_{\text{Б}}} \mu, \quad (4)$$

здесь  $\gamma_{\text{Б}} = e/m \simeq 1.7 \cdot 10^{11}$  А·с·кг<sup>-1</sup>,  $\mu$  — относительная безразмерная магнитная проницаемость.

Из сравнения (2) и (4) получим

$$\frac{B_{\text{Б}}}{B_{\text{я}}} = \frac{\gamma_{\text{я}}}{\gamma_{\text{Б}}} \mu = 1.24 \cdot 10^{-3} \mu. \quad (5)$$

Для получения магнитной индукции эффекта Барнетта, равной или большей, чем в КЯГ, необходимо иметь  $\mu \geq 800$ .

Напомним кратко некоторые свойства ферромагнитных материалов [7,8]. Ферромагнитный материал состоит из большого количества очень небольших областей — доменов. Внутри каждого домена спины

нескомпенсированных (ферромагнитных) электронов должны быть направлены в одну сторону (спонтанная намагниченность). Однако, тепловая энергия нарушает стройный порядок и только при очень низких температурах спины всех электронов направлены в одну сторону (это первая причина, требующая применения криогенных температур). При низкой температуре имеет место насыщение намагниченности. Такое состояние для тела, состоящего из многих доменов, энергетически не самое выгодное. Для снижения энергии рядом расположенные домены имеют противоположное направление спинов электронов и, таким образом, в целом ферромагнитное тело является нейтральным в магнитном отношении. В слабых магнитных полях, когда  $B$  значительно меньше  $B_c$  — коэрцитивной силы, что соответствует режиму работы предполагаемого ферромагнитного гироскопа (КФГ), намагниченность ферромагнитного тела при вращении осуществляется смещением границ доменов (при угловой скорости 1 Гц (один оборот в секунду)  $B_B \approx 10^{-9}$  Тл =  $10^{-5}$  Гс). Домены, направление магнитного момента которых совпадает с направлением поля, будут увеличивать свой объем за счет доменов с противоположным направлением. В слабых полях его процесс линейный и обратимый, в этой области гистерезис отсутствует. Так как момент количества движения и магнитный момент в электроне жестко связаны, то поведение ферромагнитного тела при вращении будет аналогично поведению в слабых магнитных полях. Домены, у которых момент количества движения совпадает с направлением момента количества движения, сообщенного телу, будут увеличивать свой объем за счет доменов с противоположно направленными спинами.

Отметим, что эффект Барнетта имеет место до температуры Кюри 200–800 °С ферромагнитного материала, однако измерение столь малых магнитных потоков невозможно без применения сверхпроводящих магнитных экранов и сквида, поэтому гироскоп, основанный на эффекте Барнетта, должен работать при низких температурах.

Итак, если имеется ферромагнитный материал, который в рабочих условиях (5 К) обеспечит  $\mu \leq 800$ , то принципиально возможно создать криогенный ферромагнитный гироскоп с чувствительностью не хуже КЯГ. Конечно, сегодня сравнивать его характеристики с КЯГ, работы по которому ведутся уже почти 20 лет, по крайней мере не солидно, однако некоторые простые вопросы можно рассмотреть.

Прежде всего принцип действия. Имеется стержень из ферромагнитного материала, состоящий из большого количества доменов с противоположно направленными спинами нескомпенсированных электронов. При изменении скорости вращения стержня для сохранения неизменным общего момента количества движения часть спинов, направление которых не совпадает с сообщенным вращением, должна будет изменить свое направление на обратное (проекция спина на любую ось может иметь только два значения  $\pm(\hbar/2) \simeq 5.2 \cdot 10^{-33}$  Дж·с). Так как со спином жестко связан магнитный момент (магнитный момент электрона  $\mu_e = 9.28 \cdot 10^{-24}$  Дж·Тл<sup>-1</sup>), то это приведет к изменению магнитной индукции в соответствии с выражением (4). Изменение магнитного потока будет зафиксировано сквидом. Зависимость магнитного потока от угловой скорости — однозначная функция, т.е. прибор является гироскопом — датчиком угловой скорости.

Несколько слов об устройстве. Простейшая схема КФГ представляет собой стержень из ферромагнитного материала, помещенный внутрь сверхпроводящего электрически разомкнутого экрана для защиты от помех. На стержень намотана сверхпроводящая обмотка, соединенная последовательно со входной обмоткой сквида. Это пока все. Имеются некоторые тонкости по экранированию, передаче сигнала на сквид, моменту Лондона, снижению шума ферромагнитного материала и т. д., но простейшая схема такова.

Принципиальным является вопрос, имеются ли ферромагнитные материалы с  $\mu \geq 800$  при  $T = 4$  К. В работе [9] приведены сведения о материале VITROVAG-6025, который в этих условиях имеет  $\mu = 8-14 \cdot 10^3$ . В работе [10] показано, что до частоты 100 Гц материал GRIOPERM-10 имеет  $\mu = 2.5 \cdot 10^5$ . В работе [11] для нескольких пермаллоев дана зависимость  $\mu_{\text{нач}}$  от температуры: при  $T = 4$  К  $\mu_{\text{нач}} = 2 \cdot 10^4, 3 \cdot 10^4, 6 \cdot 10^4$ . Если можно реализовать это в гироскопе, то чувствительность его будет на 1-2 порядка выше, чем КЯГ. Кроме того, увеличению чувствительности должна способствовать значительно большая плотность носителей в ферромагнитном стержне ( $\sim 10^{22}$ ), чем в газообразном  $^3\text{He}$ .

Безусловно, при разработке встретятся проблемы, некоторые из них видны уже сейчас. Это — остаточная намагниченность, шум материала, шум сквида, и т. д. Некоторые пути преодоления влияния этих факторов известны.

Итак, если возможно реализовать в рабочих условиях  $\mu \leq 800$ , то пока не видно принципиальных препятствий против создания криогенного ферромагнитного гироскопа на основе эффекта Барнетта. Сравнительная простота прибора и, следовательно, более низкая стоимость, возможность повышения чувствительности, более высокая надежность, чем в КЯГ, делают целесообразным его дальнейшее исследование.

#### Список литературы

- [1] Дензгуб В.М., Смирнов В.Г. Единицы величин. Справочник. М.: Изд-во стандартов, 1990.
- [2] Woodman K.F., Franks P.W., Richards M.D. // Rev. J. Navigation. 1987. Vol. 40. N 3. P. 366-384.
- [3] Кларк Дж. // Принцип действия и применение сквидов. 1989. Т. 77. № 8. С. 118-137.
- [4] Hendricks J.B., King C.A., Rorschach H.E. // J. Low. Temp. Phys. 1971. Vol. 4. N 2. P. 209-229.
- [5] Lockhart J.M., Cheung S., Gill D.K. IEEE Trans. Instr. and Measur. 1987. Vol. IM-36. N 2. P. 170-174.
- [6] Barnett S.J. // Rev. Modern. Phys. 1935. Vol. 7. P. 129-166.
- [7] Куттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
- [8] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Физика сплошных сред. М.: Мир. Т. 7.
- [9] Prodi G.A., Vitole S. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 66. N 12. P. 5984-5987.
- [10] Gerdonio M., Ricei F.F., Romoni G.L. // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. N 11. P. 4799-4802.
- [11] Реймбот Г. Магнитные материалы и их применение. Л.: Энергия, 1974.