

Возможное устройство криогенного ферромагнитного гироскопа

© Л.А. Левин, С.Л. Левин

(Поступило в Редакцию 27 мая 1997 г.)

Рассмотрены три простейшие схемы устройства нового физического прибора, основанного на явлении Барнетта. Показано, что наиболее реальным является устройство со специальным типом электрически разомкнутого сверхпроводящего магнитного экрана. Описано устройство прибора.

В [1] рассмотрена принципиальная возможность создания нового криогенного ферромагнитного гироскопа (КФГ) — датчика угловой скорости. КФГ основан на использовании эффекта Барнетта [2] — возникновения магнитного поля при вращении ферромагнитного тела. В [1] показано, что известны три физических явления возбуждения магнитного поля при вращении различных тел. Это — магниторезонансный эффект в ^3He , момент Лондона в сверхпроводниках и эффект Барнетта. Для получения в КФГ магнитной индукции, равной индукции, возникающей в давно разрабатываемом ядерном гироскопе (КЯГ) с ^3He [3], необходимо, чтобы относительная безразмерная магнитная проницаемость ферромагнитного тела была ≥ 800 . При этом показано, что КФГ должен быть значительно проще КЯГ.

В настоящей работе рассматриваются некоторые варианты устройства КФГ. В [1] отмечалось, что простейшая схема КФГ представляет собой ферромагнитный стержень, помещенный внутри цилиндрического сверхпроводящего, электрически разомкнутого экрана. На стержень нанесена сверхпроводящая чувствительная обмотка, соединенная в сверхпроводящий короткозамкнутый контур с входной обмоткой сквида. Однако эта схема имеет два недостатка. Во-первых, простой цилиндрический разомкнутый магнитный экран обеспечивает низкий коэффициент экранирования, во-вторых, обмотка, нанесенная непосредственно на ферромагнитный стержень, обладает большой индуктивностью, что уменьшает ток во входной обмотке сквида и затрудняет согласование обмотки со входом сквида. В принципе возможна установка ферромагнитного стержня в цилиндрическом замкнутом сверхпроводящем экране, но в этом случае резко возрастают габариты сверхпроводящего экрана из-за компенсирующего магнитного поля, возникающего внутри экрана, или должны быть уменьшены размеры стержня, что ведет к снижению чувствительности прибора. Итак, оба варианта с простым разомкнутым и замкнутым экранами мало пригодны для создания реального КФГ.

Для создания работоспособного КФГ предлагается использовать специальный электрически разомкнутый сверхпроводящий экран. Он представляет собой практически цилиндрический, разрезанный по образующей экран с большой зоной перекрытия места разреза (например, по так называемой схеме "змеи, глотающей свой хвост" [4]). Если в такой схеме обеспечить отношение высоты зазора к длине зоны перекрытия

зазора 1:10, то коэффициент экранирования будет составлять порядка 10^5 – 10^6 . Дальнейшее уменьшение отношения будет повышать коэффициент экранирования. Эта схема и принята нами в рассматриваемом далее устройстве [5].

К этому типу экрана относится, например, цилиндр с очень узким разрезом по образующей порядка 0.01–0.1 мм и большой толщиной стенки 2–3 мм. Такой экран кроме увеличения коэффициента экранирования позволяет экранировать чувствительную обмотку, нанесенную на него, от ферромагнитного материала и примерно в μ раз уменьшать ее индуктивность.

Внутри экрана установлен ферромагнитный стержень. Диаметр стержня и внутренний диаметр экрана должны быть близки друг к другу ($D_c \approx D_e$), так чтобы на внутренней поверхности экрана действовало поле, близкое к индукции Барнетта B_B . Ток, который создается на внутренней стороне экрана для компенсации поля B_B , протекает по внешней поверхности экрана, перенося поле B_B на поверхность экрана. Это поле возбуждает ток в сверхпроводящей чувствительной обмотке, намотанной на поверхность экрана и соединенной в короткозамкнутый сверхпроводящий контур с входной обмоткой сквида. Для исключения утечки тока ширина экрана должна быть несколько меньше длины ферромагнитного стержня.

Ток, возбужденный в чувствительной обмотке, пропорциональный скорости вращения прибора, течет по входной обмотке сквида, создавая поток, который измеряется сквидом. По-видимому, вместо чувствительной обмотки может быть использован электрически разомкнутый экран.

Магнитный поток, созданный за счет эффекта Барнетта, в ферромагнитном стержне

$$\Phi_B = B_B S = \frac{\mu \Omega}{\gamma_B} S, \quad (1)$$

где μ — относительная безразмерная магнитная проницаемость материала стержня, Ω — угловая скорость вращения, S — поперечное сечение стержня, γ_B — магнитомеханическое отношение ($\gamma_B = 1.7 \cdot 10^{11} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$).

При условии $D_c = D_e$ поток экрана

$$\Phi_e = I_e L_e = \Phi_B = \frac{\mu \Omega}{\gamma_B} S, \quad (2)$$

где $I_e L_e$ — ток и индуктивность экрана.

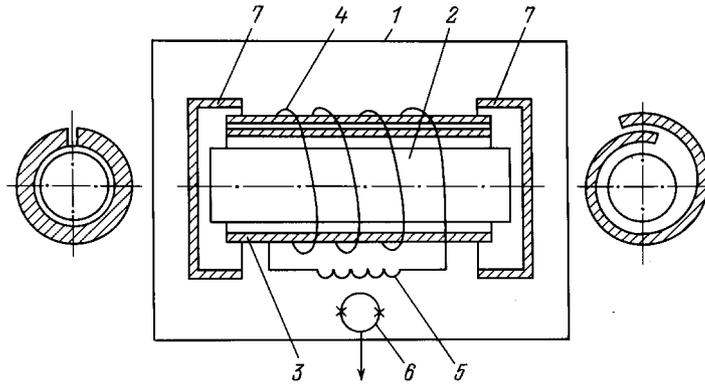


Схема устройства КФГ.

Магнитный поток входной обмотки сквида

$$\Phi_c = I_0 L_c = \frac{\mu \Omega S}{\gamma_B} \frac{L_c}{L_0 + L_c}, \quad (3)$$

где I_0 — ток в короткозамкнутом сверхпроводящем контуре, протекающий через входную обмотку сквида с индуктивностью L_c ; L_0 — индуктивность чувствительной обмотки.

Обозначим $L_c/L_0 + L_c = K$ — коэффициент передачи потока. В сложных схемах этот коэффициент более громоздкий, чем в (3), как правило, он состоит из соотношений между индуктивностями и взаимными индуктивностями элементов, входящих в прибор. Практическая величина $K \sim 10^{-1} - 10^{-3}$. Измерение магнитного потока Барнетта возможно, если $\Phi_c \geq \Phi_{nc}$, где Φ_{nc} — шум сквида. Тогда

$$\Phi_c = \Phi_{nc} = \frac{\mu \cdot \Omega \cdot S \cdot K}{\gamma_B}, \quad (4)$$

откуда чувствительность КФГ к угловой скорости будет равна

$$f = \frac{\Phi_{nc} \gamma_B}{2\pi \cdot \mu \cdot S \cdot K}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что для повышения чувствительности КФГ необходимо увеличивать μ материала, S и K . Например, при $\Phi_{nc} = 10^{-5} \Phi_0$ ($\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ Wb — квант магнитного потока), $\mu = 800$, $S = 10^{-3}$ м², $K = 10^{-2}$ получим f порядка 10^{-7} с⁻¹.

Упрощенная схема КФГ представлена на рисунке. Внутри корпуса 1 находятся жестко связанные с ним ферромагнитный стержень 2 и сверхпроводящий магнитный экран 3, возможные формы которого показаны справа и слева на том же рисунке. На экране 3 намотана сверхпроводящая чувствительная обмотка 4, соединенная с входной обмоткой 5 сквида 6. Для повышения коэффициента экранирования с боков установлены сверхпроводящие крышки-экраны 7. Отношение высоты зазоров и длины перекрытия экранов 3 и 7 1:10.

Известно, что при вращении сверхпроводящего тела, например сплошного или полого замкнутого цилиндра,

в нем возникает магнитное поле — момент Лондона [1]. В электрически разомкнутом экране 3 момент Лондона не возникает. Для исключения его влияния на измерение поля эффекта Барнетта необходимо, чтобы крышки-экраны 7 были разрезаны соответствующим образом. При этом отношение высоты зазора к зоне перекрытия должно быть $\leq 1:10$, т.е. крышка должна быть сравнительно толстой, а разрез очень узким.

Есть еще некоторые детали, которые могут быть использованы при создании и использовании КФГ. Охлаждение прибора до рабочей температуры для исключения захвата магнитного потока сверхпроводящими деталями должно производиться в условиях практически нулевого магнитного поля, особенно вблизи температуры перехода материала в сверхпроводящее состояние.

В качестве ферромагнитного материала стержня желательно использовать монокристалл, а ось легкого намагничивания совмещать с осью стержня.

Ферромагнитные материалы шумят даже при весьма низких температурах. Для снижения уровня магнитного шума целесообразно покрытие поверхности ферромагнитного стержня немагнитным материалом с низким омическим сопротивлением при рабочей температуре, например чистой медью.

Известно, что у сквида ниже некоторой частоты $f_n \approx 0.1 - 1.0$ Hz резко возрастает уровень шума. Для устранения этого эффекта целесообразно модулировать сигнал более высокой частотой и демодулировать на выходе сквида.

Если на электрически разомкнутом экране разместить дополнительную обмотку (обмотки), то существенно расширяется возможность КФГ, он сможет при соответствующей системе управления измерять даже угловое ускорение и угол поворота.

Предложено устройство нового физического прибора — КФГ. Чувствительный элемент КФГ (стержень с экраном) не имеет никаких движущихся частей и не требует для работы никакой дополнительной энергии, он не выделяет тепла. Поэтому очень удобен для криогенных устройств, а его срок службы бесконечен.

Сравнение известных проектов устройств криогенных гироскопов — датчиков угловой скорости (криогенного ядерного гироскопа (КЯГ) [3], криогенного ферромагнитного гироскопа (КФГ)) показывает, что устройство КФГ является наиболее простым и надежным. По чувствительности КЯГ и КФГ находятся на близком уровне. Имеется принципиальная возможность повышения чувствительности КФГ за счет применения ферромагнитного материала с большим μ .

Список литературы

- [1] *Левин Л.А.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 4. С. 192–195.
- [2] *Barnett S.J.* // Rev. Modern Phys. 1935. Vol. 7. P. 129–166.
- [3] *Woodman K.F., Franks P.W., Richards M.D.* // Rev. J. Navigation. 1987. Vol. 40. N 3. P. 336–384.
- [4] *Sullivan D.B., Dziuba R.F.* // Rev. Sci. Instr. 1974. Vol. 45. P. 517.
- [5] *Буравлев А.П., Ландау Б.Е., Левин Л.А., Левин С.Л.* Криогенный ферромагнитный гироскоп. А.С. № 2084825. БИ. № 20. 1997.