

07:12  
©1993

## МИКРОРЕЗОНАТОРНЫЙ ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*А.В.Листвин, В.Н.Листвин, В.Т.Потапов*

В настоящее время интенсивно разрабатываются волоконнооптические датчики физических величин с микрорезонаторным чувствительным элементом [1]. Малая жесткость чувствительного элемента позволяет измерять силы, сравнимые по величине с Ван-дер-Ваальсовским взаимодействием между атомами в твердом теле [2], а его малая масса обеспечивает высокую собственную частоту, необходимую для сохранения вибростойкости. С уменьшением жесткости возрастают тепловые флуктуации микрорезонатора, которые и ограничивают в большинстве случаев пороговую чувствительность микрорезонаторных датчиков [3].

В этой работе мы исследуем датчик магнитного поля на основе микрорезонатора, представляющего собой закрепленную с двух сторон металлическую ленту, колебания которой в инфранизкочастотном магнитном поле обусловлены силой Лоренца, возникающей при пропускании через ленту переменного тока. Амплитуда колебаний такого микрорезонатора регистрировалась с помощью торцевого интерферометра.

Кроме силы Лоренца  $F_L = [BL]L \cos \omega_0 t$ , где  $B$  — индукция измеряемого магнитного поля,  $I$  — амплитуда тока,  $L$  — длина ленты,  $\omega_0$  — собственная частота, на микрорезонатор воздействует стационарная флуктуационная сила  $F^\Phi$ , со спектральной плотностью  $(F_\omega^\Phi)^2 = \frac{2}{\pi} kT \frac{\omega_0}{Q} m$  [4], где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $Q$  — добротность микрорезонатора,  $m$  — его масса. В дальнейшем нас будет интересовать лишь уровень достижимой чувствительности при обнаружении регулярных воздействий, и мы не будем касаться квазистатических измерений, в которых уровень чувствительности определяется дрейфовыми характеристиками. В этом приближении значение минимально обнаружимой индукции магнитного поля имеет вид:

$$B_{\perp}^{\min} = \frac{\sqrt{4kTm\frac{\omega_0}{Q}} \Delta f}{IL}, \quad (1)$$

где  $B_{\perp}$  — компонента вектора индукции магнитного поля, лежащая в плоскости ленты и перпендикулярная ее оси,  $\Delta f$  —

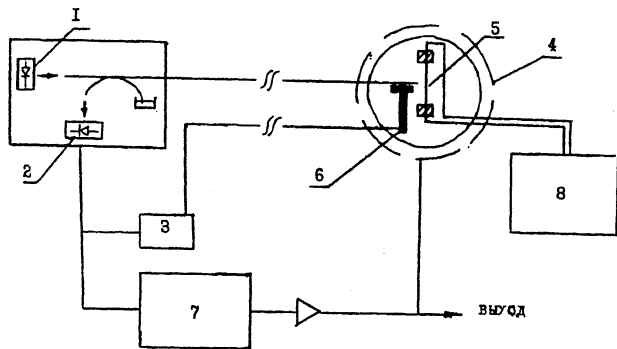


Рис. 1. Блок-схема датчика: 1 — светодиод, 2 — фотоприемник, 3 — блок стабилизации, 4 — катушка компенсации, 5 — лента, 6 — биморфная пьезокерамика, 7 — UNIPAN 233, 8 — генератор.

полоса частот, в которой производится усреднение сигнала. Для значений параметров, реализованных на эксперименте:  $f_0 = -\frac{\omega_0}{2\pi} = 855$  Гц,  $Q = 125$ ,  $I = 0.25$  А,  $L = 6$  мм,  $T = 300$  К,  $\Delta f = 1$  Гц, ширины ленты  $b = 1.5$  мм, толщины  $\alpha = 15$  мкм, плотности  $\rho = 9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, массы  $m = \rho abL = 1.2 \cdot 10^{-6}$  кг, получаем оценку:  $B_{\perp}^{\min} = 0.6$  нТл/Гц<sup>1/2</sup>.

Блок-схема датчика изображена на рис. 1. Колебания ленты считывались с помощью интерферометра Фабри-Перо низкого контраста, зеркала в котором образованы торцом световода и поверхностью ленты. Интерферометр был выполнен на основе волоконно-оптического зонда, разработанного "Физоптикой" с одномодовым смесителем, источником излучения 32 ДЛ-105 и фотоприемником ФД 271. Расстояние между зеркалами (порядка нескольких десятков микрон) подбиралось из условия получения максимальной видности ( $\sim 0.6$ ) интерференционной картины. Стабилизация рабочей точки интерферометра осуществлялась по среднему значению отраженной от него мощности. Напряжение, вырабатываемое в цепи обратной связи блока стабилизации подавалось на биморфную пьезокерамику, на которую был приклеен световод. Датчик был охвачен цепью отрицательной обратной связи по магнитному полю с петлевым усилением  $\sim 3600$ . Катушка компенсации из 40 витков была намотана на кварцевый цилиндр диаметром 3 см в один слой. Чувствительный элемент и биморфная керамика с приклеенным световодом крепились на основании цилиндра.

Основная технологическая проблема была связана с зависимостью собственной частотной ленты от температуры.

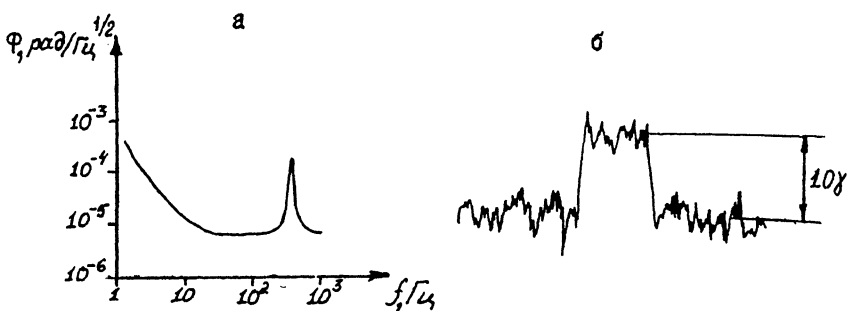


Рис. 2. а — спектр шумов датчика, б — отклик датчика на приращение магнитного поля 10  $\gamma$ .

Эту зависимость удалось практически полностью устранить за счет изгиба ленты, который не повлиял на диаграмму направленности датчика.

Спектр шумов интерферометра с микрорезонатором приведен на рис. 2, а. Спектральная плотность шумов на частотах  $f > 30$  Гц составила  $7 \cdot 10^{-6}$  рад/Гц<sup>1/2</sup>, что применимо на порядок меньше (как видно из этого рисунка) флуктуаций фазы на собственной частоте микрорезонатора, обусловленных его тепловыми колебаниями. Таким образом, в исследуемом датчике пороговая чувствительность ограничивается тепловыми флуктуациями микрорезонатора, которые в пересчете к фазе составляют величину  $\phi^{\min} \sim 2 \cdot 10^{-4}$  рад/Гц<sup>1/2</sup>. Измеренный экспериментально коэффициент преобразования  $S$  составил 25 рад/Гс соответственно для пороговой чувствительности получаем:  $B_{\perp}^{\min} = \frac{\phi^{\min}}{S} \cong 0.8$  нТл/Hz<sup>1/2</sup>, что близко к приведенной выше оценке. На рис. 2, б приведены результаты прямых измерений пороговой чувствительности датчика, при этом чувствительный элемент датчика помещался в два магнитных экрана из  $\mu$ -металла со степенью экранирования  $\sim 10^3$ . Пороговая чувствительность, оцененная по дисперсии шумов в этой записи, составила 1 нТл/Гц<sup>1/2</sup>.

В заключение отметим, что чувствительность того же порядка достигнута в последних разработках волоконно-оптических датчиков на магнитострикционном эффекте в магнитомягких аморфных сплавах [5]. Предлагаемый нами датчик выгодно отличается простой конструкцией и снижением требований к чувствительности интерферометра, и перспективен для применения в разведочной геофизике.

## Список литературы

- [1] *Culshaw B., Dakin J.* Optical fiber sensors: System and application. Boston, M.A. Artech House, 1989. V. 2. 799 p.
- [2] Эдельман В.С. // ПТЭ. 1991. В. 1. С. 24-42.
- [3] Брагинский В.Б., Манукин А.Б. Измерение малых сил в физических экспериментах. М.: Наука, 1974. 152 с.
- [4] Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1981. 640 с.
- [5] *Koo K.P., Bucholtz F., Dangenais D.M., Dandridge A.* IEEE Photonics Technology Letters. 1989. V. 1. N 12. P. 464-466.

Институт радиотехники  
и электроники РАН,  
Фрязинская часть

Поступило в Редакцию  
7 июля 1993 г.

---