

12

Датчик постоянного магнитного поля на основе пьезоэлектрического кольца

© И.М. Крыканов, А.Б. Коплик, Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин

Московский государственный институт радиотехники, электроники
и автоматики (технический университет)
E-mail: fetisov@mirea.ru

Поступило в Редакцию 26 февраля 2010 г.

Описан датчик постоянного магнитного поля на основе радиально поляризованного пьезоэлектрического кольца, по одному из электродов которого течет переменный ток. Принцип работы датчика основан на комбинации силы Ампера и пьезоэффекта. Датчик обладает чувствительностью до 0.2 V/kOe и линейной зависимостью выходного сигнала от поля в диапазоне до сотен килоэрстед.

Принцип действия датчиков магнитных полей основан на физических эффектах, величина которых зависит от напряженности поля [1]. Для получения сигнала датчиков в виде электрического напряжения используют комбинированные эффекты, объединяющие какой-либо зависящий от поля эффект с пьезоэффектом. Основным эффектом при этом может быть, например, действие поля на проводник с током (сила Ампера) или магнитострикция [2]. Комбинацию силы Ампера с пьезоэффектом получают в композитных структурах проводник–пьезоэлектрик за счет механической связи между компонентами; она обеспечивает линейную зависимость сигнала от поля и поэтому представляет несомненный интерес для применений.

Датчик поля на основе комбинации силы Ампера с пьезоэффектом был реализован в виде пьезоэлектрического диска, механически соединенного по образующей с металлическим кольцом, по которому пропускали переменный ток [3]. Чувствительность описанной конструкции составляла $\sim 3.2 \text{ mV/kOe}$, при амплитуде переменного тока 1 А.

В данной работе предложен и исследован датчик постоянного магнитного поля в виде пьезоэлектрического кольца с металлическими электродами, принцип действия которого также основан на комбинации силы Ампера с пьезоэффектом. Датчик отличается простотой конструкции и за счет использования акустического резонанса кольца имеет на

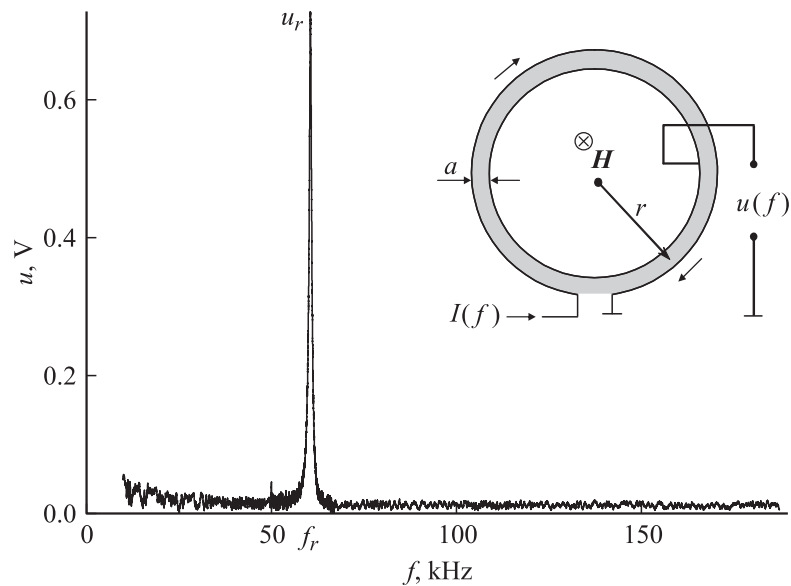


Рис. 1. Зависимость напряжения u , генерируемого кольцом PZT, от частоты тока f , текущего по электроду кольца, при $I = 0.3 \text{ A}$ и $H = 1 \text{ кОе}$. На вставке показана геометрия датчика.

два порядка более высокую чувствительность, чем датчик на основе диска.

Конструкция датчика схематически изображена на вставке рис. 1, *a*. Кольцо из пьезоэлектрика со средним радиусом r , толщиной a и шириной b поляризовано в радиальном направлении. На внутреннюю и внешнюю поверхности кольца нанесены проводящие электроды толщиной δ . Один из электродов (внешний или внутренний) разрезан и по нему пропускается переменный ток $I(f) = I \cos(2\pi ft)$ с амплитудой I и частотой f . Постоянное поле H приложено перпендикулярно к плоскости структуры. Генерируемое переменное напряжение $u(f) = u \cos(2\pi ft)$ снимается с электродов кольца.

Найдем амплитуду генерируемого структурой напряжения. На каждый участок электрода с током I со стороны поля H в радиальном направлении действует сила Ампера. Эта сила передается кольцу и со-

здает в нем касательные растягивающие или сжимающие механические напряжения величиной

$$T_1 = Ir\mu_0 H / (ab). \quad (1)$$

В пьезоэлектрическом кольце электрическая индукция D и деформация S связаны с механическим напряжением T и электрическим полем E соотношениями [4]

$$D_3 = d_{31}T_1 + \varepsilon\varepsilon_0 E_3, \quad (2)$$

$$S_1 = s_{11}T_1 + d_{31}E_3. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3) обозначено: μ_0 и ε_0 — магнитная и электрическая постоянные, d_{31} , s_{11} и ε — пьезомодуль, коэффициент податливости и диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика, индексы „1“ и „3“ отвечают касательным и радиальным компонентам величин.

Следуя [5], для случая разомкнутой цепи ($D_3 = 0$) из уравнения (2) находим связь напряженности поля в пьезоэлектрике с механическим напряжением $E_3 = -d_{31}T_1 / (\varepsilon\varepsilon_0)$. После чего, используя соотношения (1), получаем формулу для напряжения

$$u = E_3 a = \frac{\mu_0 d_{31}}{\varepsilon\varepsilon_0} \frac{r}{b} I_0 H. \quad (4)$$

Из (4) видно, что величина u зависит от электрических параметров пьезоэлектрика, радиуса и ширины кольца, линейно растет с увеличением амплитуды тока I и напряженности поля H , однако не зависит от частоты тока f и толщины кольца a .

При совпадении частоты тока f с частотой радиальных механических колебаний кольца $f_r = 1 / (2\pi r) \sqrt{Y/\gamma}$ (где Y и γ — модуль Юнга и плотность пьезоэлектрика соответственно) величина деформаций в кольце резонансно увеличивается и амплитуда напряжения возрастает в Q (добротность) раз.

В экспериментах использовали кольцо из цирконата титаната свинца состава $\text{Pb}_{0.48}\text{Zr}_{0.52}\text{TiO}_3$ (PZT) с параметрами: $r = 8$ mm, $a = 1.3$ mm, $b = 4$ mm, $\varepsilon = 1750$, $d_{31} = 175 \cdot 10^{-12}$ C/N. Толщина электродов из серебра, нанесенных методом вжигания на поверхности PZT, составляла $\delta \sim 2$ μm . Кольцо поляризовали в радиальном направлении, нагревая до 100°C и подавая на электроды напряжение 1 kV. Сопротивление

разрезанного электрода равнялось $\sim 0.1 \Omega$, а емкость структуры составляла 3 пФ. Кольцо помещали между полюсами электромагнита в однородное поле напряженностью до 14 кОе. На электрод через ферритовый трансформатор подавали напряжение от перестраиваемого генератора с частотой $f = 1-180$ кГц, что приводило к возбуждению в нем тока силой до 1.5 А. Генерируемое кольцом напряжение измеряли цифровым осциллографом с входным сопротивлением 1 М Ω .

На рис. 1 показана измеренная зависимость амплитуды генерируемого кольцом напряжения u от частоты f тока, протекающего через электрод. На частоте $f_r = 60.34$ кГц виден резонанс с амплитудой в максимуме $u_r = 0.73$ В и добротностью $Q = 118$, соответствующий возбуждению в кольце низшей моды радиальных акустических колебаний. Оценка частоты резонанса по приведенной формуле дает значение ~ 60.00 кГц, хорошо совпадающее с измеренным. Амплитуда сигнала не зависящей от поля H наводки в области частот $f > 30$ кГц оставалась примерно постоянной и не превышала ~ 8 мВ.

На рис. 2 показаны зависимости напряжения u_r на резонансной частоте от поля H при разных амплитудах тока I через электрод кольца. Штриховые линии на рис. 2 демонстрируют аппроксимацию зависимостей линейной функцией. Измеренная чувствительность датчика к потоянному полю возрастала от ~ 2 до ~ 3 В/кОе с увеличением тока от 0.01 до 1.5 А. Приведенная к току чувствительность датчика равнялась ~ 0.2 В/(кОе \cdot А). Оценка приведенной чувствительности по формуле (4) с использованием параметров кольца PZT и измеренной добротности Q дает значение ~ 0.26 В/(кОе \cdot А), хорошо согласующееся с измеренным. Использование акустического резонанса кольца позволило повысить чувствительность датчика в ~ 80 раз по сравнению с конструкцией на основе диска [3].

На рис. 3, *a* приведена зависимость напряжения u_r , генерируемого кольцом PZT, от силы тока через электрод. Зависимость имеет примерно линейный вид в соответствии с (4). Отклонение от линейности в области больших I обусловлено насыщением трансформатора. Кроме сигнала u_r с увеличением тока растет также не зависящая от H наводка. В описанной конструкции амплитуда наводки u_p возрастала линейно от нуля до ~ 30 мВ при увеличении тока через электрод до 1.5 А.

На рис. 3, *b* точками изображена измеренная зависимость напряжения u_r от угла ориентации поля относительно плоскости кольца. Сплошной линией показана рассчитанная зависимость $u_{\max} \cos \beta$. Видно, что амплитуда сигнала датчика пропорциональна нормальной к

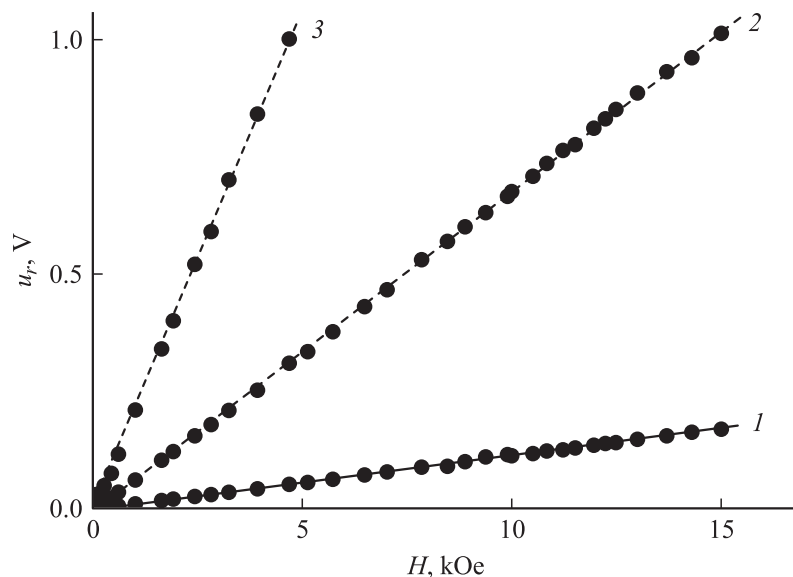


Рис. 2. Зависимости напряжения u_r , генерируемого кольцом PZT, от поля H при различных токах через электрод I А: 1 — 0.05, 2 — 0.3, 3 — 1.

плоскости кольца составляющей поля $u \sim H \cos \beta$. Кроме того, сдвиг фазы напряжения относительно тока изменялся на π при инверсии направления поля. Это позволяет применить датчик для измерения ориентации поля.

Аналогичные измерения, выполненные на кольцах PZT шириной 2.2 и 1.3 mm, показали, что амплитуда сигнала u_r растет примерно обратно пропорционально ширине кольца b , в соответствии с формулой (3).

В заключение отметим, что линейный диапазон датчика ограничен сверху полями, для которых справедлив закон Ампера и может достигать $H_{\max} \sim$ сотен кОе. Снизу границу диапазона линейности можно найти из условия равенства амплитуд сигнала и наводки. Для описанной конструкции оценка дает $H_{\min} \sim 0.1$ кОе. Уменьшить минимальное измеряемое поле до единиц эрстед можно, используя пьезоэлектрические кольца меньшей толщины и применяя компенсационную схему измерений для подавления наводки.

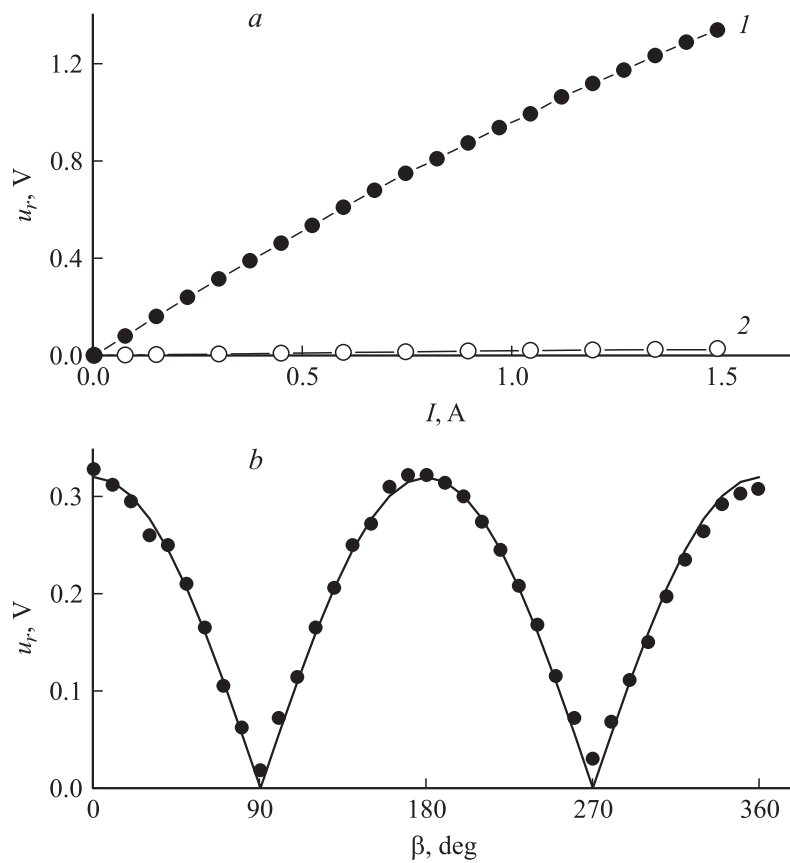


Рис. 3. Зависимости: *a* — напряжения u_r , генерируемого кольцом PZT (I), и амплитуды наводки (2) от тока I через электрод при $H = 5$ kOe; *b* — напряжения u_r от угла β ориентации поля относительно нормали к плоскости кольца при $H = 5$ kOe и $I = 0.3$ A.

Таким образом, предложен линейный в широком диапазоне полей датчик постоянного магнитного поля на основе комбинации силы Ампера и пьезоэффекта в пьезоэлектрическом кольце с током. Чувствительность датчика можно изменять в широких пределах, регулируя силу переменного тока, текущего по электроду кольца. Использование

акустического резонанса кольца позволило достигнуть приведенной чувствительности датчика $0.2 \text{ V}/(\text{kOe} \cdot \text{A})$, что на два порядка выше, чем у известных аналогичных конструкций.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 2.11.6650) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-02-12439 офи_м).

Список литературы

- [1] *Edelstein A.* // J. Phys. Condens. Matter. 2007. V. 19. Paper 165217.
- [2] *Fetisov Y.K., Bush A.A., Kamentsev K.F.* et al. // IEEE Sensors Journal. 2006. V. 6. N 4. P. 935–938.
- [3] *Jia Y.M., Zhou D., Luo L.H.* et al. // Appl. Phys. A. 2007. V. 89. P. 1025–1027.
- [4] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
- [5] *Фетисов Ю.К., Чащин Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 15. С. 50–56.