

05

Преобразование переменных магнитных и электрических полей в кольцевой структуре сегнетоэлектрик—проводник

© Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин

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

Поступило в Редакцию 10 марта 2009 г.

Исследован эффект преобразования переменного магнитного поля в электрическое напряжение и обратно в кольце из сегнетоэлектрика с металлическими электродами, поляризованном в радиальном направлении и помещенном в постоянное магнитное поле, перпендикулярное к плоскости кольца. Эффект возникает в результате комбинации явления электромагнитной индукции в проводящем контуре и пьезоэффекта в сегнетоэлектрике и может быть использован для создания датчиков магнитных полей с линейной характеристикой.

PACS: 75.80.+q, 77.84.Dy

Преобразование переменных магнитных и электрических полей в настоящее время осуществляют с использованием явления электромагнитной индукции Фарадея в замкнутом проводящем контуре и магнитоэлектрического (МЭ) эффекта в многослойных структурах [1]. В первом случае изменение магнитного потока индуцирует электрический ток в замкнутом проводнике или текущий по проводнику электрический ток создает магнитное поле. В случае МЭ-эффекта преобразование возникает в результате комбинации магнитострикции и пьезоэффекта в структурах, содержащих чередующиеся ферромагнитные и сегнетоэлектрические слои. Оба явления применяются для детектирования и генерации постоянных и переменных магнитных полей.

В данной работе обнаружен и исследован эффект преобразования переменного магнитного поля в электрическое напряжение и обратно в структуре в виде пьезоэлектрического кольца с нанесенными на его поверхность металлическими электродами. Эффект является результатом комбинации электромагнитной индукции в проводящем контуре и пьезоэффекта в сегнетоэлектрике.

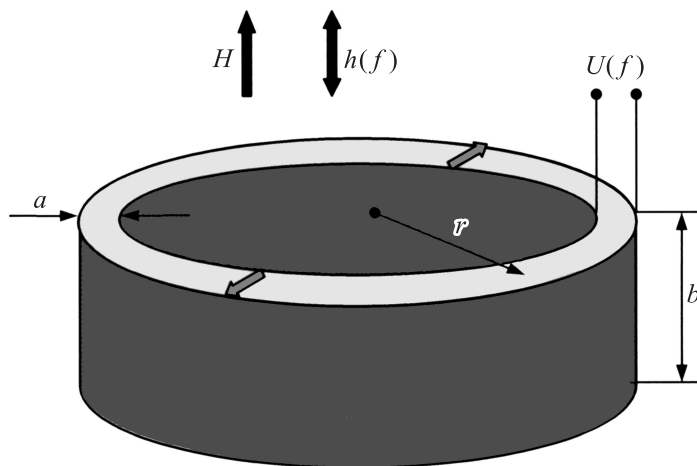


Рис. 1. Сегнетоэлектрическое кольцо с металлическими электродами. Стрелки показывают направление поляризации кольца и направление магнитных полей.

Рассматриваемая структура изображена на рис. 1. Кольцо из сегнетоэлектрика имеет средний радиус r , толщину a и высоту b . На внешнюю и внутреннюю поверхности кольца нанесены металлические электроды шириной b и толщиной δ . Сегнетоэлектрическое кольцо поляризовано в радиальном направлении. Перпендикулярно к плоскости кольца и параллельно друг другу приложены постоянное магнитное поле H и переменное магнитное поле $h(f) = h \cos(2\pi ft)$ с амплитудой h и частотой f . Генерируемое сегнетоэлектриком переменное напряжение $u(f) = u \cos(2\pi ft)$ снимается с электродов кольца. Для упрощения анализа примем, что толщина и ширина кольца, а также толщина электродов много меньше радиуса кольца: $a \ll r$, $b \ll r$, $\delta \ll r$.

Связь электрической индукции D и деформации S с механическим напряжением T и электрическим полем E в сегнетоэлектрическом кольце дается уравнениями [2]

$$D_3 = d_{31}T_1 + \varepsilon\varepsilon_0E_3, \quad (1a)$$

$$S_1 = s_{11}T_1 + d_{31}E_3, \quad (16)$$

где индексы „1“ и „3“ отвечают касательным и радиальным компонентам величин соответственно, d_{31} и s_{11} — пьезомодуль и коэффициент

податливости сегнетоэлектрика, ε — диэлектрическая проницаемость и $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m — электрическая постоянная. Рассмотрим подробнее прямой эффект — генерацию структурой переменного напряжения при воздействии на нее переменного магнитного поля.

При изменении магнитного потока $\Phi = \pi r^2 \mu_0 h \cos(2\pi f t)$, пронизывающего контур, в каждом из металлических электродов кольца индуцируется ЭДС и появляется переменный ток с амплитудой

$$I = \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{\mu_0 \pi r^2 h 2\pi f}{\sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2}}, \quad (2)$$

где R и L — сопротивление и индуктивность электрода, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m — магнитная постоянная. Будем считать, что для кольца с электродами малой толщины δ из материала с удельным сопротивлением ρ выполняется условие $R \gg \omega L$. Тогда амплитуда тока определяется величиной активного сопротивления $R = \rho 2\pi r / (b\delta)$ и равна

$$I = \frac{\mu_0 \pi r^2 h 2\pi f}{\rho 2\pi r / (b\delta)} = \frac{\mu_0 \pi r h b \delta f}{\rho}. \quad (3)$$

На каждый участок электрода, по которому течет ток I , со стороны внешнего магнитного поля H действует сила, направленная по радиусу. Эта сила приводит к возникновению в электродах касательных растягивающих или сжимающих сил величиной $N_1 = I r \mu_0 H$. Силы передаются пьезоэлектрическому кольцу и создают в нем касательные переменные механические напряжения величиной

$$T_1 = \frac{2N_1}{ab} = \frac{2I r \mu_0 H}{ab}. \quad (4)$$

Для случая разомкнутой цепи ($D_3 = 0$), используя уравнение (1а), получаем связь напряженности поля в сегнетоэлектрике с механическим напряжением $E_3 = -d_{31} T_1 / \varepsilon \varepsilon_0$. Тогда амплитуда напряжения u , генерируемого между электродами вследствие пьезоэффекта, равна

$$u = \frac{d_{31} T_1 a}{\varepsilon \varepsilon_0}. \quad (5)$$

Используя формулы (3)–(5), для амплитуды напряжения, генерируемого структурой при воздействии переменного магнитного поля, получаем

$$u = \frac{\mu_0^2}{\varepsilon_0} \frac{d_{31}}{\varepsilon \rho} 2\pi r^2 \delta f h H. \quad (6)$$

Видно, что величина u зависит от электрических и механических параметров сегнетоэлектрика и проводимости металла, пропорциональна площади кольца и толщине металла, но не зависит от толщины и ширины кольца. Амплитуда напряжения линейно растет с частотой, она пропорциональна амплитуде переменного поля h и напряженности постоянного поля H .

Найдем u для практически важного случая, когда частота изменения h совпадает с частотой f_r механических колебаний структуры. Для тонкого кольца частота низшей моды радиальных колебаний равна [3]

$$f_r = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{Y}{\gamma}}, \quad (7)$$

где Y и γ — модуль Юнга и плотность сегнетоэлектрика соответственно.

Подставляя (7) в (6) и учитывая, что на частоте резонанса f_r величина деформаций возрастает в Q (добротность) раз, для амплитуды генерируемого напряжения получаем

$$u = Q \frac{\mu_0^2}{\varepsilon_0} \frac{d_{31}}{\varepsilon \rho} \sqrt{\frac{Y}{\gamma}} r \delta h H. \quad (8)$$

Видно, что на резонансной частоте вид зависимости u от основных параметров структуры сохраняется, но u растет линейно с увеличением радиуса кольца.

В измерениях использовали структуру в виде кольца из керамики цирконата-титаната свинца состава $\text{Pb}_{0.52}\text{Zr}_{0.48}\text{TiO}_3$ (PZT) ($d_{31} = 175 \cdot 10^{-12}$ м/В, $\varepsilon = 1750$) со средним радиусом $r = 8.62$ мм, толщиной $a = 1.25$ мм, высотой $b = 4.5$ мм с электродами из серебра ($\rho = 15 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{м}$) толщиной $\delta \sim 2 \mu\text{м}$. Кольцо было поляризовано в радиальном направлении. Структуру помещали между полюсами электромагнита в поле $H = 0 - 5$ кОе, перпендикулярное плоскости кольца. С помощью модулирующих катушек в том же направлении создавали переменное поле амплитудой $h = 0 - 10$ Ое с частотой $f = 0 - 200$ кГц и регистрировали напряжение u , генерируемое структурой.

На рис. 2 показаны измеренные зависимости генерируемого напряжения u и амплитуды переменного поля h от частоты f при $H = 1000$ Ое. Амплитуда переменного поля составляла $h \approx 8$ Ое в

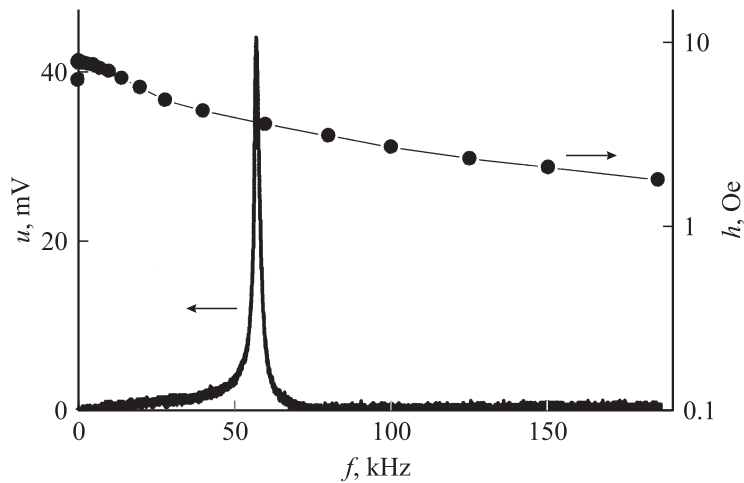


Рис. 2. Зависимость напряжения u , генерируемого структурой, и амплитуды поля h от частоты f , $H = 1000$ Oe.

диапазоне частот $f = 0-10$ kHz, а затем уменьшалась с ростом f до ~ 2.8 Oe на частоте 57 kHz и до ~ 0.9 Oe на частоте 200 kHz из-за индуктивности катушек. Видно, что в области малых частот, где h постоянна, u растет примерно линейно с увеличением f в соответствии с формулой (6). Амплитуда напряжения достигала $u = 44$ mV на частоте резонанса $f_r = 57.2$ kHz. Добротность резонанса составляла $Q = 42$. Расчет частоты по формуле (7) при параметрах PZT $Y = 7 \cdot 10^{10}$ N/m² и $\gamma = 7.7 \cdot 10^3$ kg/m³ дает значение $f_r = 55.6$ kHz. Оценка u по формуле (8) при отвечающих эксперименту значениях параметров дает величину $u = 45$ mV, хорошо совпадающую с измеренной. На частоте резонанса амплитуда тока в электродах, согласно (3), достигала $I \sim 0.26$ A. Эффективности преобразования структуры $\alpha_E = (u/a)/h$ на частоте 10 kHz и на резонансной частоте f_r равнялись соответственно $\alpha_E \approx 1$ mV \cdot cm⁻¹ \cdot Oe⁻¹ и $\alpha_{Er} \approx 126$ mV \cdot cm⁻¹ \cdot Oe⁻¹. На рис. 3 приведены типичные измеренные зависимости напряжения u , генерируемого структурой на резонансной частоте, от постоянного поля H и амплитуды переменного поля h . Обе зависимости имели линейный вид в соответствии с предсказанием теории. Линейность характеристик в полях до $H = 5$ kOe выполнялась с точностью не хуже $\sim 10^{-4}$.

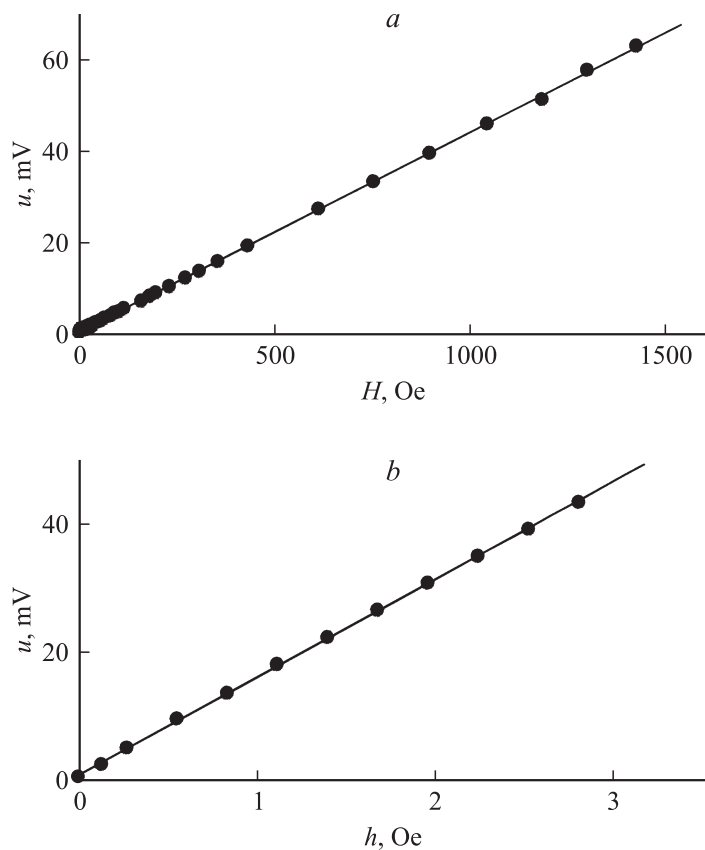


Рис. 3. Зависимости генерируемого структурой напряжения u от: a — поля H при $h = 2.8$ Oe, b — амплитуды поля h при $H = 1000$ Oe. Сплошные линии — линейная аппроксимация данных.

В заключение отметим, что в кольцевой структуре сегнето-электрик–металл имеет место и более слабый обратный эффект — генерация переменного поля h при приложении к электродам кольца переменного напряжения U . Исследованная структура на той же частоте резонанса $f_r = 57.2$ kHz при поле $H = 1000$ Oe и амплитуде напряжения $U = 10$ V генерировала переменное магнитное поле с амплитудой $h \approx 0.1$ mOe.

Обнаруженный эффект может быть использован для создания датчиков постоянных и переменных магнитных полей, обладающих линейной характеристикой. Чувствительность таких датчиков определяется размерами структуры и параметрами использованных материалов. При этом, как следует из формулы (8) и данных рис. 3, чувствительность датчика постоянного поля можно изменять, подбирая амплитуду h возбуждающего поля. Для исследованной структуры чувствительность варьировалась в интервале $u/H \sim 0-1$ мВ/Ое.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2.1.1/6650) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-02-12151-офи).

Список литературы

- [1] Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S., Viehland D., Srinivasan G. // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 031101.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
- [3] Тимошенко С. Колебания в инженерном деле. М.: Физматлит, 1959. 439 с.