

МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В СЛОИСТЫХ ФЕРРИТ-СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

М. И. Бичурин, В. М. Петров

В статье предлагается использовать для решения ряда исследовательских и прикладных задач слоистые феррит-сегнетоэлектрические (ФС) структуры [1, 2]. В качестве примера применения слоистых ФС структур приводятся результаты исследования резонансного магнитоэлектрического (МЭ) эффекта [3] в слоистых структурах. Эффект наблюдался как смещение линий ФМР во внешнем электрическом поле, приложенном к сегнетоэлектрической компоненте. В слоистой структуре исследуемый эффект, очевидно, имеет следующий механизм: обратный пьезоэлектрический эффект—упругая деформация—обратная магнитострикция—сдвиг спектра ФМР. Поэтому такие структуры можно рассматривать как одномерные модели МЭ материалов в том случае, когда за МЭ взаимодействие ответственны стрикционные механизмы [4]. Существенное достоинство слоистых структур перед МЭ материалами состоит в том, что они позволяют подобрать компоненты структуры с требуемыми магнитными и сегнетоэлектрическими свойствами для получения достаточно сильного по величине МЭ эффекта. В них можно сочетать наиболее эффективные ферриты и сегнетоэлектрики, обладающие максимальными значениями магнитострикции и обратного пьезоэффекта и минимальной шириной линии ФМР, что не всегда выполнимо в однофазных и композиционных материалах.

На основе указанного механизма резонансного МЭ эффекта в слоистой ФС структуре применяется следующая методика расчета. Из уравнения обратного пьезоэффекта определяется величина одноосного давления, воздействующего на ферритовую компоненту. Используя величину одноосного давления, по известной формуле, учитывающей магнитоупругое взаимодействие, вычисляется смещение линии ФМР от электрического поля, приложенного к сегнетоэлектрической компоненте.

В качестве примера рассмотрим ФС структуру, состоящую из ферритового резонатора и сегнетоэлектрического цилиндра, находящихся в жестком механическом контакте.

Воздействие внешнего электрического поля на сегнетоэлектрическую компоненту слоистой ФС структуры описывается уравнением обратного пьезоэффекта

$$\delta^{\text{сз}} = -\hat{\epsilon}_z E + \xi^{\text{сз}} \xi^{\text{сз}}, \quad (1)$$

где $\delta^{\text{сз}}$ — тензор деформаций, E — напряженность электрического поля, $\xi^{\text{сз}}$ — тензор коэффициентов жесткости, $\hat{\epsilon}_z$ — транспонированный тензор пьезоэлектрических коэффициентов, $\xi^{\text{сз}}$ — тензор механических напряжений.

Поляризованный сегнетоэлектрик принадлежит классу симметрии ∞m , а используемый феррит — классу $m3m$ [5]. Совместное решение уравнения (1) с учетом обобщенного закона Гука для ферритовой компоненты и соответствующих граничных условий позволяет найти величину механического напряжения в феррите [2]

$$\sigma_{33}^{\phi} = \frac{(2\nu e_{31} - e_{33}) E}{K + (c_{33}^{\text{сз}} - 2\nu c_{13}^{\text{сз}}) \left[\frac{g}{2} \left(\frac{2}{c_{44}} + \frac{1}{c_{11} + c_{12}} + \frac{c_{11}}{c_{11}^2 + c_{11}c_{12} + 2c_{12}^2} \right) + \frac{S^{\phi}}{L^{\text{сз}} G} \right]}, \quad (2)$$

где $\nu = c_{13}^{\text{сз}} / (c_{11}^{\text{сз}} + c_{12}^{\text{сз}})$; $K = S^{\phi} / S^{\text{сз}}$; $g = L^{\phi} / L^{\text{сз}}$; $G = \Delta L / F$ — податливость измерительной секции; $S^{\text{сз}}$, S^{ϕ} — площади поперечных сечений сегнетоэлектрика и феррита, а $L^{\text{сз}}$ и L^{ϕ} — их длины; $\Delta L = s_{33}^{\text{сз}} L^{\text{сз}}$, $F = \sigma_{33}^{\text{сз}} S^{\text{сз}}$ — абсолютная деформация и усилие измерительной секции, обеспечивающей жесткий механический контакт ферритовой и сегнетоэлектрической компонент.

Одноосное механическое давление на ферритовую компоненту, приложенное вдоль оси [110], приводит к сдвигу резонансного магнитного поля [6]

$$\delta H = \frac{3\lambda_{100}\sigma_{33}^{\phi}}{2M_0}, \quad (3)$$

где λ_{100} — константа магнитострикции ферритовой компоненты, M_0 — намагниченность насыщения. В (3) предполагается, что постоянное магнитное поле направлено вдоль оси [100]. Подстановка выражения (2) в известные формулы [6] позволяет получить угловые зависимости резонансного МЭ эффекта.

Эксперимент выполнен на спектрометре магнитного резонанса 3-м диапазона при комнатной температуре. Приложение постоянного электрического поля к сегнетоэлектрической компоненте ФС структуры приводило к смещению линии ФМР. На рисунке представлены зависимости смещения линии ФМР от величины электрического поля для ФС структуры с ферритовой компонентой из монокристаллического ИЖГ и сегнетоэлектрическими компонентами на основе пьезокерамики типа ЦТС. Ферритовая компонента имела форму сферы диаметром 0.2 мм, а сегнетоэлектрическая форму цилиндра длиной 10 мм и сечением 4 мм².

Сопоставление (3) и (2) с данными эксперимента дает возможность определить податливость измерительной секции: $G=2.1 \cdot 10^{-6}$ м/Н. Полученное значение упругой податливости измерительной секции позволяет интерпретировать экспериментальные результаты МЭ эффекта в слоистых ФС структурах различных составов.

Для слоистой структуры на основе поликристаллического иттрий-железистого граната и пьезокерамики типа ЦТС сдвиг резонансной линии при намагничивании перпендикулярно направлению сжатия определяется выражением

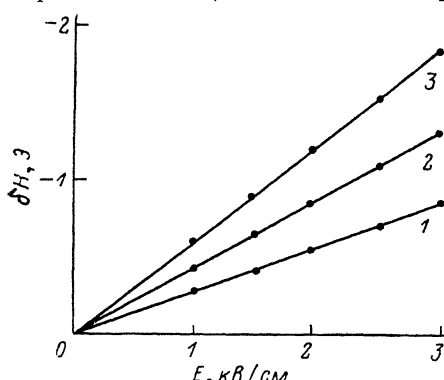
$$\delta H = -\frac{3}{2} \frac{\lambda_s}{M_0} \sigma, \quad (4)$$

где λ_s — константа магнитострикции поликристаллического феррита. Предполагая, что слоистая ФС структура представляет собой модель одноосного МЭ материала, можно получить выражение для сдвига линии ФМР

$$\delta H_E = B M_0 E, \quad (5)$$

где B — магнитоэлектрическая константа. При этом E направлено вдоль оси симметрии.

Сдвиг линии ФМР под действием электрического поля в структурах: ИЖГ+ЦТСтВС-2 (1), ИЖГ+ЦТС-19 (2), ИЦГ+ЦТСтВС-1 (3).



Оценка константы B для слоистой ФС структуры на основе сегнетоэлектрической компоненты из ЦТС-19 в форме цилиндра длиной 10 мм и сечением 4 мм² и поликристаллической ферритовой компоненты из ИЖГ (10 СЧ-6) сферической формы диаметром 0.8 мм при условии, что измерительная секция является абсолютно жесткой, дает величину 1.31 см/кВ.

Полученные результаты дают возможность выделить в однофазных МЭ материалах ту часть эффекта, которая обусловлена изменением магнитоупругой энергии. Кроме того, на основе проведенных исследований могут быть получены необходимые данные для решения задачи оптимизации состава композиционных гетерофазных МЭ материалов.

Литература

- [1] Бичурин М. И., Софроньев С. Э., Фомин О. Г. В сб.: Физика и химия твердого тела. М., 1982, с. 26—29.
- [2] Бичурин М. И., Петров В. М., Софроньев С. Э. Деп. ВШИТИ, 1985, № 5564-85 Дег. 24 с.
- [3] Бичурин М. И., Петров В. М., Фомин Н. Н., Яковлев Ю. М. Обзоры по электронной технике. Материалы, 1985, № 2, с. 1—80.
- [4] Бичурин М. И., Петров В. М., Софроньев С. Э., Дидковская О. С. Изв. вузов. Физика, 1985, № 1, с. 121—122.
- [5] Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979. 640 с.
- [6] Петраковский Г. А., Смокотин Э. М. ЖЭТФ, 1968, т. 55, № 6 (12), с. 2083—2087.

Новгородский политехнический институт

Поступило в Редакцию
14 июля 1987 г.