

05

## Магнитоэлектрический СВЧ-аттенюатор, управляемый электрическим полем

© О.В. Антоненков, Д.А. Филиппов

Новгородский государственный университет, Великий Новгород  
E-mail: fdma@novsu.ac.ru

Поступило в Редакцию 16 января 2007 г.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование сдвига линии магнитного резонанса в композиционных феррит-пьезоэлектрических структурах. Показано, что на основе таких структур возможно создание магнитоэлектрического СВЧ-аттенюатора, выполненного в микрополосковом исполнении. Действие прибора основывается на сдвиге линии магнитного резонанса при приложении внешнего электрического поля к феррит-пьезоэлектрической структуре, которая играет роль резонатора. Рассчитаны зависимости вносимого аттенюатором затухания от прикладываемого электрического поля.

PACS: 84.40.-x, 76.20.+q

Магнитоэлектрический (МЭ) эффект в СВЧ-области спектра заключается в сдвиге линии магнитного резонанса под действием электрического поля. Природа МЭ-эффекта в композиционных материалах обусловлена механическим взаимодействием ферритовой и пьезоэлектрической подсистем, входящих в состав композита. При приложении электрического поля в пьезоэлектрической фазе возникают механические напряжения, которые передаются в магнитную компоненту и за счет магнитострикции происходит изменение магнитного момента, в результате чего наблюдается сдвиг резонансной линии.

В [1] рассмотрена двухслойная феррит-пьезоэлектрическая структура в форме диска. Сдвиг линии магнитного резонанса для случая, когда ось поляризации пьезоэлектрической фазы совпадает с [111] осью магнитострикционной фазы, а магнитное поле  $H$  лежит в (111) плоскости образца и параллельно направлению [011], равен [1]:

$$\delta H_E = \frac{1}{2M_0} \frac{k\lambda_{100}}{m s_{11}(1 - m\nu) + k\eta^p s_{11}(1 - p\nu)} d_{31} E_3 = A E_3, \quad (1)$$

где  ${}^m s_{ij}$ ,  ${}^p s_{ij}$  — модули податливости магнитной и пьезоэлектрической фаз соответственно;  $d_{ij}$  — пьезоэлектрические модули;  $k = 0 \div 1$  — коэффициент, связанный с неидеальностью контакта между фазами;  ${}^m \nu = -{}^m s_{12}/{}^m s_{11}$ ,  ${}^p \nu = -{}^p s_{12}/{}^p s_{11}$  — коэффициенты Пуассона магнитной и пьезоэлектрической фаз соответственно;  $\eta = {}^m h/{}^p h$  — отношение толщины ферромагнетика к толщине пьезоэлектрика,  $M_0$  — намагниченность насыщения,  $\lambda_{100}$  — константа магнитострикции.

В данной работе рассмотрен МЭ СВЧ-аттенюатор, выполненный в микрополосковом (МП) исполнении. МП-аттенюатор представляет собой МП-линию, в которой с помощью шлейфов длиной  $3\lambda/8$  и  $\lambda/8$  создана область с круговой поляризацией СВЧ-магнитного поля. Область с круговой поляризацией может быть получена при пересечении двух центральных проводников МП-линии, если фазы сигналов в них в точке пересечения сдвинуты на  $\pi/2$ . В эту область между проводниками МП-линии помещен диск из МЭ-материала, на плоскости которого нанесены электроды, подключенные к источнику управляющего напряжения. Внешний магнит создает резонансное поле в МЭ-материале. В случае применения тонкой подложки МЭ-материал занимает всю толщину подложки, а управляющее напряжение прикладывается непосредственно к проводникам МП-линии. В этом случае для обеспечения развязки по постоянному току в разрывы центрального проводника устанавливаются конденсаторы.

В качестве подложки МЭ СВЧ-аттенюатора был выбран диэлектрический материал ФЛАН-10-1.0 с  $\text{tg } \delta$  при частоте 10 GHz, равном 0.001, ширина подложки 4 см, ширина проводника 1.5 мм, толщина подложки 1 мм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки 10.

Действие прибора основывается на сдвиге линии магнитного резонанса при приложении внешнего электрического поля к феррит-пьезоэлектрической структуре, которая выполняет роль МЭ-резонатора. Поглощаемую СВЧ-энергию в резонансной области можно описать с помощью гауссова распределения:

$$P(H, E) = P_0 \exp\left(-\frac{(H - H_0(E))^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где  $P_0$  — поглощаемая энергия при магнитном резонансе;  $H$  — прикладываемое магнитное поле;  $H_0(E)$  — резонансное магнитное поле, которое в общем случае зависит от электрического поля  $E$ ;  $\sigma$  — параметр, определяющий ширину линии магнитного резонанса.

Сдвиг линии магнитного резонанса при приложении электрического поля в случае линейной аппроксимации описывается выражением

$$H_0(E) = H_0 + AE, \quad (3)$$

где  $H_0$  — резонансное магнитное поле при  $E = 0$ ,  $A$  — магнитоэлектрический коэффициент.

Подставляя (3) в выражение (2), поглощаемая СВЧ-энергия будет равна

$$P(H, E) = P_0 \exp \left( -(H - (H_0 + AE))^2 / 2\sigma^2 \right). \quad (4)$$

Из (4) следует, что поглощаемая СВЧ-энергия изменяется при приложении электрического поля. Когда напряженность магнитного поля  $H = H_0$ , то зависимость поглощаемой энергии от напряженности электрического поля определяется выражением

$$P(E) = P_0 \exp \left( -(AE)^2 / 2\sigma^2 \right). \quad (5)$$

МЭ-резонатор располагается в области круговой поляризации. В качестве МЭ-резонатора были рассмотрены образцы следующих составов:  $\text{Li}_{0.4}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{2.4}\text{O}_4$  — цирконат-титанат свинца (ЦТС);  $\text{Ni}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$  — ЦТС, монокристаллический железо-иттриевый гранат (ЖИГ)–ЦТС. Образцы представляли собой диски диаметром 5 mm с нанесенными на верхнюю и нижнюю поверхности электродами, на которые подавалось управляющее напряжение.

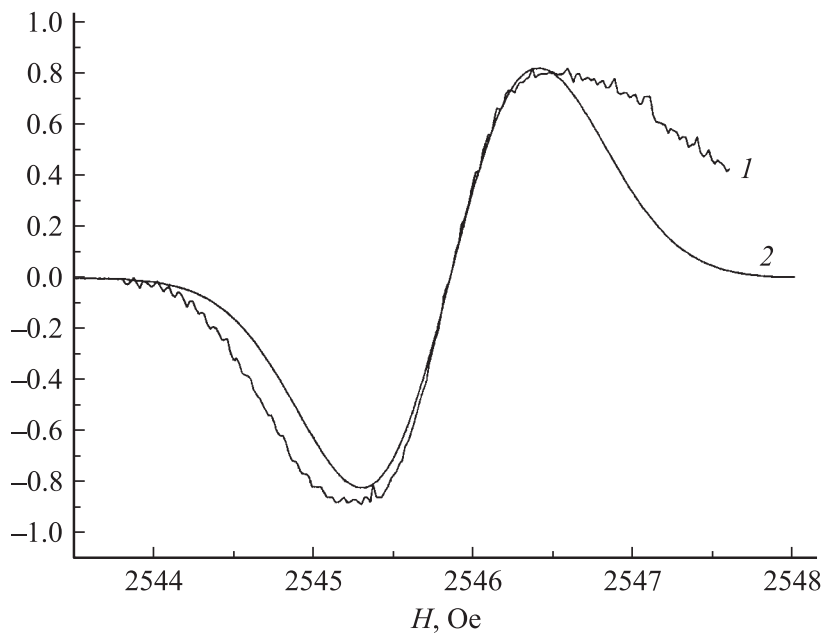
Одной из основных характеристик аттенюаторов является вносимое затухание  $L$ , dB, которое определяется по следующей формуле:

$$L = 10 \lg(P_1/P_2), \quad (6)$$

где  $P_1$  — мощность, поступающая на вход;  $P_2$  — мощность на выходе.

В эксперименте снималась первая производная линии поглощения. С целью проверки полученных результатов, зависимости поглощаемой СВЧ-мощности, рассчитанные по формуле (4), были продифференцированы по магнитному полю  $H$ . Результаты для образца на основе ЖИГ–ЦТС приведены на рис. 1.

Магнитоэлектрический коэффициент  $A$  для случая, когда ось поляризации пьезоэлектрической фазы совпадает с  $[111]$  осью магнитострикционной фазы, а магнитное поле  $H$  лежит в  $(111)$  плоскости образца параллельно направлению  $[011]$ , рассчитывался по формуле (1).



**Рис. 1.** Вид линии магнитного резонанса. Образец состоит из слоя монокристаллического ЖИГ толщиной  $10\ \mu\text{m}$  и слоя ЦТС толщиной  $750\ \mu\text{m}$ . Ширина линии магнитного резонанса  $\Delta H = 1.1\ \text{Oe}$ . Напряженность электрического поля  $E = 0\ \text{kV/cm}$ . 1 — эксперимент; 2 — теория.

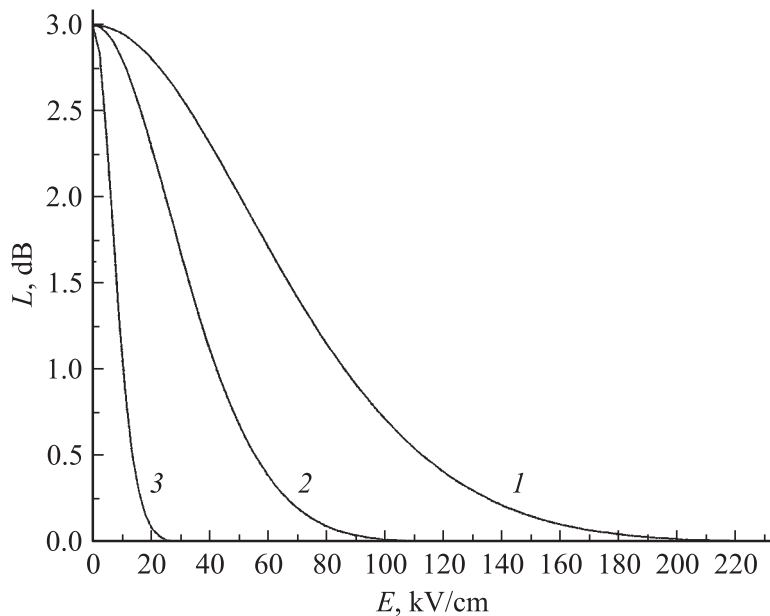
При расчетах были взяты следующие значения параметров:

для  $\text{Li}_{0.4}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{2.4}\text{O}_4$ -ЦТС [2]:  $\lambda_{100} = 23 \cdot 10^{-6}$ ; для  $\text{Li}_{0.4}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{2.4}\text{O}_4$ :  
 $m_{s_{11}} = 6.84 \cdot 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{N}$ ,  $m_{s_{12}} = -2.46 \cdot 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{N}$ ,  $4\pi M_0 = 3600\ \text{G}$ ;  
 для ЦТС:  $p_{s_{11}} = 15.3 \cdot 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{N}$ ,  $p_{s_{12}} = -5 \cdot 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{N}$ ,  $p_{d_{31}} = -175 \cdot 10^{-12}\ \text{m/V}$ ;

для  $\text{Ni}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ -ЦТС [3]:  $\lambda_{100} = 46 \cdot 10^{-6}$ ; для  $\text{Ni}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ :  
 $m_{s_{11}} = 6.5 \cdot 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{N}$ ,  $m_{s_{12}} = -5 \cdot 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{N}$ ,  $4\pi M_0 = 3200\ \text{G}$ ;

для ЖИГ-ЦТС [4]:  $\lambda_{100} = 1.4 \cdot 10^{-6}$ ; для ЖИГ:  $m_{s_{11}} = 4.8 \cdot 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{N}$ ,  $m_{s_{12}} = -1.4 \cdot 10^{-12}\ \text{m}^2/\text{N}$ ,  $4\pi M_0 = 1750\ \text{G}$ .

На рис. 2 приведены зависимости вносимого аттенуатором затухания  $L$  при приложении электрического поля, рассчитанные по форму-



**Рис. 2.** Зависимость вносимого аттенюатором затухания  $L$  от прикладываемого электрического поля для структур следующих составов: 1 — 16 слоев  $\text{Li}_{0.4}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{2.4}\text{O}_4$  по  $38\ \mu\text{m}$  и 15 слоев ЦТС по  $114\ \mu\text{m}$ . Ширина линии магнитного резонанса  $\Delta H = 177\ \text{Oe}$ ; 2 — 11 слоев  $\text{Ni}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$  по  $18\ \mu\text{m}$  и 10 слоев ЦТС по  $18\ \mu\text{m}$ . Ширина линии магнитного резонанса  $\Delta H = 230\ \text{Oe}$ ; 3 — слой монокристаллического ЖИГ толщиной  $10\ \mu\text{m}$  и слой ЦТС толщиной  $750\ \mu\text{m}$ . Ширина линии магнитного резонанса  $\Delta H = 1.1\ \text{Oe}$ .

ле (6). При вычислениях поглощаемая энергия в момент магнитного резонанса принималась равной  $P_0 = 0.5P_1$ .

Как видно из рисунков МЭ, композиционные феррит-пьезоэлектрические материалы могут быть использованы для построения электрически управляемых аттенюаторов. Лучшими характеристиками обладает материал на основе монокристаллического ЖИГ–ЦТС, у которого наименьшая ширина линии магнитного резонанса  $\Delta H$ . Уменьшение ширины резонансной кривой приводит к уменьшению управляющего напряжения при том же вносимом аттенюатором затухании.

## Список литературы

- [1] Антоненков О.В., Бичурин М.И., Филиппов Д.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 15. С. 90–95.
- [2] Bichurin M.I., Petrov V.M., Kiliba Yu.V. et al. // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. P. 134404-1–134404-10.
- [3] Bichurin M.I., Kornev I.A., Petrov V.M. et al. // Phys. Rev. B. 2001. V. 64. P. 094409-1–094409-6.
- [4] Shastry S., Srinivasan G., Bichurin M.I. et al. // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 064416-1–064416-6.