

05;06;09

## ОСОБЕННОСТИ ФЕРРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА И ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ НАМАГНИЧЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ ЖЕЛЕЗОИТТРИЙГАДОЛИНИЕВОГО ГРАНАТА

© С.И.Ющук, П.С.Костюк

Основным материалом для создания микроволновых устройств, работающих на магнитостатических волнах, является пленочный монокристаллический железоиттриевый гранат [ЖИГ]  $Y_3Fe_5O_{12}$ . Однако пленки ЖИГ, обладая рекордно узкими кривыми ферромагнитного резонанса (ФМР), имеют довольно высокую температурную чувствительность намагниченности насыщения  $4\pi M_s$ . В настоящей работе для уменьшения температурной чувствительности намагниченности феррогранатовых пленок в  $Y_3Fe_5O_{12}$  ионы  $Y^{3+}$  в додекаэдрической подрешетке частично замещались ионами  $Gd^{3+}$ . Эпитаксиальные пленки  $Y_{3-x}Gd_xFe_5O_{12}$  выращивали методом жидкофазной эпитаксии на подложках из самарий-галлиевого граната  $Sm_3Ga_5O_{12}$  ориентации [111] из раствора-расплава гранатообразующих окислов с использованием флюса  $PbO-V_2O_5$ . Монокристаллы для подложек выращивали методом Чохральского. Выращенные пленки имели гладкую блестящую поверхность без царапин и трещин. Толщины пленок, измеренные интерференционным методом на спектрофотометре UR-20, находились в пределах 5–15 мкм. С помощью рентгеновского микроанализа было установлено, что пленки, полученные из разных расплавов, имеют составы  $Y_{3-x}Gd_xFe_5O_{12}$ , где  $x = 1.77, 1.80, 1.83$  и  $1.89$ . Пленки представляют собой монокристаллические слои ферритов-гранатов с постоянными кристаллической решетки, равными соответственно: 12.400, 12.420, 12.434 и 12.451 Å. Параметр кристаллической решетки подложек  $Sm_3Ga_5O_{12}$ , по нашим измерениям, равен 12.437 Å. На пленках не наблюдалось трещин, несмотря на то, что несоответствие параметров решетки подложки и пленки  $a_s - a_f$  достигало значительных величин — от +0.037 до 0.014 Å.

Для исследования температурно-угловой зависимости ширины кривой ФМР  $\Delta H$  использовали образцы пленок диаметром 1.5–2 мм, изготовленные методом ультразвуковой резки с применением ультразвукового диспергатора

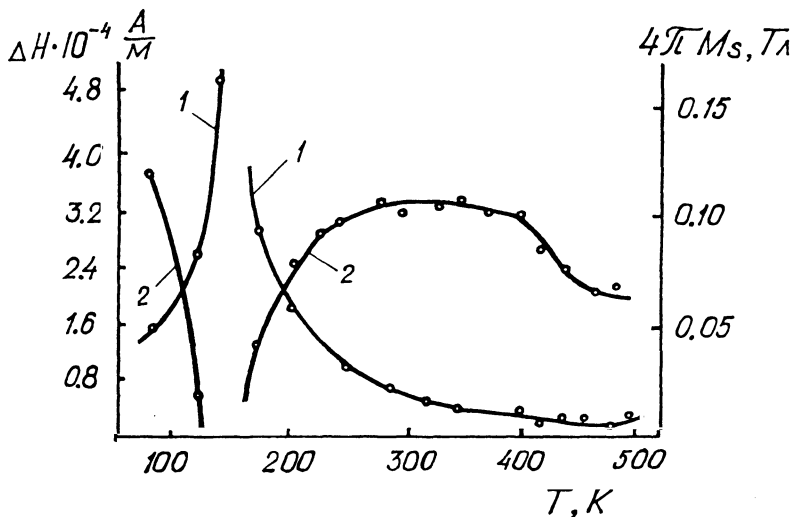


Рис. 1. Зависимости ширины кривой ФМР  $\Delta H$  (1) и намагниченности насыщения  $4\pi M_s$  (2) от температуры для ферритовой пленки  $Y_{1.17}Gd_{1.83}Fe_5O_{12}$ .

УЗДН-1 [1]. Режущим инструментом служил коллоидный раствор алмазного порошка типа АСМ-7/5 в воде. Образцы перед измерением отжигали в атмосфере воздуха при температуре  $T = 1070$  К в течение 10–12 ч. Ширину кривой ФМР  $\Delta H$  и значение напряженности резонансного поля  $H_p$  измеряли на радиоспектрометре типа РЭ-1306 в интервале температур от 77 до 550 К. Измерения проводили на частоте 9200 МГц при полях подмагничивания до  $4 \cdot 10^5$  А/м. Система крепления образца в резонаторе позволяла устанавливать необходимые положения плоскости пленки относительно подмагничивающего поля, а также осуществлять поворот образца на  $360^\circ$  вокруг выбранной оси. При исследовании температурных зависимостей образцы пленок помещались на специальном диэлектрическом держателе в кварцевую трубку, входящую в резонатор. По трубке продувались горячий воздух или пары жидкого азота. Температура газового потока регулировалась с помощью специальных нагревателей (нихромовых спиралей) находящихся на кварцевой трубке и в сосуде Дьюара. Температуру образца измеряли с помощью термопары медь–константан. Температурную зависимость намагниченности насыщения измеряли с помощью вибрационного магнитометра [2].

На рис. 1 представлены температурные зависимости ширины кривой ФМР  $\Delta H$  и намагниченности насыщения  $4\pi M_s$  монокристаллической пленки  $Y_{1.17}Gd_{1.83}Fe_5O_{12}$ , намагничиваемой в направлении [111]. Видно, что  $\Delta H$  резко возрастает в интервале температур от 140 до 160 К, образуя пик, пре-

терпевающий разрыв с центром при температуре  $\sim 150$  К. Ранее подобные аномалии температурной зависимости  $\Delta H$  наблюдались в районе точки компенсации ( $T_k$ ) для объемных образцов  $Gd_3Fe_5O_{12}$  [3]. Как видно из рис. 1, намагниченность насыщения ферритовой пленки исчезает в окрестности температуры 150 К. С точностью до 10 К это значение совпадает с литературными данными для объемных ферритовых материалов  $Y_{3-x}Gd_xFe_5O_{12}$  с  $x = 1.80$  [4].

Аномальный ход температурной зависимости ширины кривой ФМР, наблюдаемый нами вблизи  $T_k$  ферритовых пленок, по-видимому, обусловлен изменением их магнитной структуры, связанным с возникновением неколлинеарности магнитных моментов железных и гадолиниевой под решеток. Так, по результатам мессбауэровских исследований поликристаллического феррита близкого состава  $Y_{12}Cd_{1.8}Fe_5O_{12}$  был сделан вывод о возникновении в нем неколлинеарной магнитной структуры в температурном интервале  $\Delta T = 40$  К, перекрывающем температуру компенсации [5]. При температурах выше  $T_k$  ширина кривой ФМР монокристаллических пленок  $T_{1.17}Gd_{1.83}Fe_5O_{12}$  резко уменьшается, достигая при комнатной температуре значения 5750 А/м и при температуре 400 К — 800 А/м (рис. 1). По мере приближения температуры пленки к точке Кюри снова наблюдается некоторое уширение резонансной кривой.

В данной работе не преследовалась цель получения пленок  $Y_{3-x}Gd_xFe_5O_{12}$  с минимально возможными значениями ширины кривой ФМР, хотя механизмы, отвечающие за увеличение  $\Delta H$ , по опыту выращивания пленок  $Y_3Fe_5O_{12}$  нам известны, а именно:

- а) большое несоответствие параметров решетки пленки и подложки;
- б) дефектность подложек;
- в) ультразвуковая резка при приготовлении образцов;
- г) неотработанность технологических режимов выращивания.

Кроме того, часть додекаэдрических положений феррогранатовой пленки могут занимать редкоземельные ионы  $Sm^{3+}$ , попадающие в пленку из подложки  $Sm_3Ga_5O_{12}$ . Особенно это проявляется в переходных слоях толщиной 0.1–0.3 мкм ферритовой пленки с подложкой [6]. Поскольку ионы  $Sm^{3+}$ , в отличие от ионов  $Gd^{3+}$ , обладают как спиновым, так и орбитальным моментами с сильной спин-орбитальной связью, то можно полагать, что они также вносят вклад в уширение резонансной кривой через ионный механизм релаксации [7].

Как видно из рис. 1, намагниченность ферритовой пленки практически постоянна в широком температурном интерва-

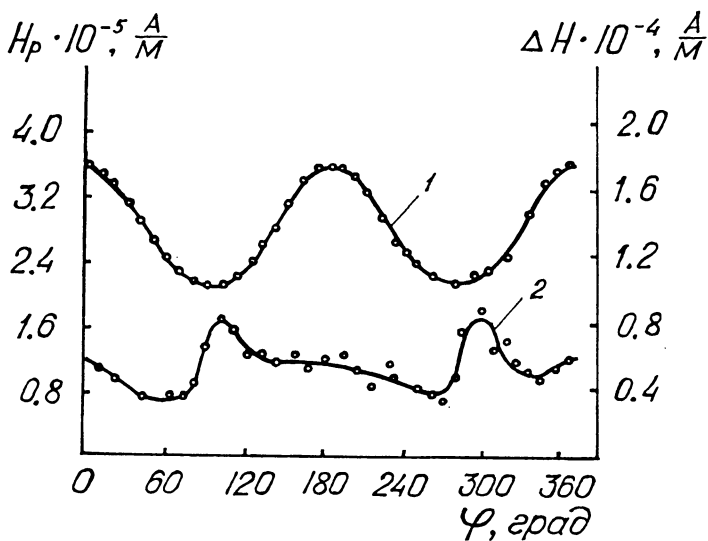


Рис. 2. Угловые зависимости напряженности резонансного поля  $H_p$  (1) и ширины кривой ФМР  $\Delta H$  (2) для ферритовой пленки  $Y_{1.17}Gd_{1.83}Fe_3O_{12}$  при  $T = 295$  К.

ле. При изменении температуры от 270 до 400 К она уменьшается всего лишь на 5%, что является весьма ценным свойством для возможного применения данного материала в микроволновых устройствах.

На рис. 2 представлены зависимости резонансных параметров  $\Delta H$  и напряженности резонансного поля  $H_p$  от ориентации пленки относительно магнитного поля. Угол  $\varphi$  отсчитывался от направления  $[111]$ . Ось вращения выбрана произвольно в плоскости  $(111)$ . При постоянной резонансной частоте и комнатной температуре напряженность резонансного поля изменяется по закону  $A \cos 2\varphi$ , где  $A$  — некоторая постоянная. Изменение ширины кривой ФМР в зависимости от угла  $\varphi$  носит более сложный периодический характер. Несимметричность зависимости ширины резонансной кривой от угла между направлением постоянного магнитного поля и нормалью к плоскости пленки, очевидно, обусловлена вкладом кристаллографической магнитной анизотропии в ширину кривой ФМР. Как видно из рис. 2, для некоторых промежуточных направлений  $\Delta H$  имеет значения меньше  $4 \cdot 10^3$  А/м.

У ферритовых пленок со значениями  $x = 1.77, 1.80$  и  $1.89$  зависимость параметров ФМР от температуры и ориентации образца относительно магнитного поля имеет такой же характер, как у пленки с  $x = 1.83$ . Следовательно, заме-

щение иттрия в пленках ЖИГ ионами гадолиния позволяет получать (как и в объемных материалах) относительно плоские участки на кривой температурной зависимости намагниченности насыщения в области температур, граничащих с комнатной. Это свойство пленок весьма ценно при создании микроволновых устройств, предназначенных для работы в широком температурном интервале.

### Список литературы

- [1] Ющук С.И., Костюк П.С., Юрьев С.А., Лотоцкий О.Д. // Физическая электроника (Изд. Львов. гос. ун-та). 1987. В. 34. С. 97-102.
- [2] Адаменко И.И., Костюк П.С., Летюк Л.М., Батенчук М.М., Ющук С.И. // Физическая электроника (Изд. Львов. Гос. ун-та). 1982. В. 25. С. 102-104.
- [3] Лебедь Б.М., Мосель В.И. // Труды конференций по электронной технике. Синтез и исследование ферромагнитных полупроводниковых кристаллов. М.: Ин-т "Электроника", 1968. В. 5. С. 59.
- [4] Geller S., Williams H.J., Sherwood R.C. // Phys. Rev. 1961. V. 123. N 5. P. 1692-1699.
- [5] Успенский М.Н., Артемьев Н.А., Грязнов М.Р. // Кристаллография. 1976. Т. 21. В. 3. С. 605-606.
- [6] Ющук С.И., Костюк П.С., Семен Б.Т., Лотоцкий О.Д. // Спинволновые явления электроники СВЧ. Тез. докл. Краснодар, 1987. С. 136-137.
- [7] Гуревич А.Г. // Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973. 591 с.

Государственный университет  
"Львовская политехника"  
Львов

Поступило в Редакцию  
19 декабря 1995 г.