

УДК 621.372.824:621.318.134

## ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗО-ИТТРИЕВОГО ГРАНАТА

Д. т. н. С. И. Юшук, к. ф.-м. н. С. А. Юрьев, к. ф.-м. н. С. П. Дубельт,  
к. ф.-м. н. В. И. Лобойко

Национальный университет «Львовская политехника»  
Украина, г. Львов  
syuryev@mail.ru

*Показано, что химический состав пленок железо-иттриевого граната, эпитаксиально выращенных на монокристаллических подложках из галлий-гадолиниевого граната, изменяется по толщине из-за неравномерного внедрения из раствора-расплава ионов гадолиния, галлия и свинца. Выращенные пленки из раствора-расплава оптимального состава при толщине 1...6 мкм имели ширину линии ферромагнитного резонанса  $\Delta H = 0,3...0,5$  Э.*

*Ключевые слова: феррогранатовые пленки, раствор-расплав, ферромагнитный резонанс.*

Эпитаксиальные пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ)  $Y_3Fe_5O_{12}$  представляют интерес для создания интегральных пассивных сверхвысокочастотных (СВЧ) схем на магнитостатических волнах (МСВ). Для получения оптимальных рабочих параметров СВЧ-устройств на МСВ требуется малая ширина линии ферромагнитного резонанса (ФМР)  $\Delta H$  наряду с бездефектной структурой пленки. Характеристики распространения МСВ зависят от степени однородности внутреннего магнитного поля в кристалле, а величина потерь при этом непосредственно связана с качеством феррогранатовой пленки, которое определяется шириной линии ферромагнитного резонанса (ФМР). Чем меньше ширина линии ФМР, тем меньше магнитные потери.

В объемных монокристаллических образцах ЖИГ достигнута величина  $\Delta H$  порядка 0,2...0,3 Э. В пленочных образцах достигнуть таких значений для слоев ЖИГ толщиной 1...3 мкм очень проблематично. Это связано с целым рядом факторов, ответственных за уширение линии однородного ФМР.

Целью работы являлось установление состава шихты и условий выращивания высококачественных пленок ЖИГ.

В процессе роста пленки на границе между слоем ЖИГ и подложкой из галлий-гадолиниевого граната (ГГГ)  $Gd_3Ga_5O_{12}$  образуется переходной слой, обогащенный ионами галлия и гадолиния. Этот слой является твердым раствором ЖИГ и немагнитного ГГГ, имеет меньшую, чем у ЖИГ, намагниченность насыщения и большее значение  $\Delta H$ . Очевидно, что в измеряемое значение параметра  $\Delta H$  вносит существенный вклад неоднородность состава ферритовой пленки в переходном слое «пленка—подложка» (ПП). В начале процесса выращивания после погружения подложки в раствор-расплав происходит подтравливание и частичное растворение подложки, причем с возрастанием температуры растворимость подложки увеличивается. С помощью пробных кратковременных погружений подложек из ГГГ в раствор-расплав ЖИГ было установлено, что рост пленки не начинается сразу после погружения подложки. В течение некоторого малого времени, предшествующего росту, подложка растворяется, обогащая раствор-расплав гадолинием и галлием. На подложке вырастает переходной слой ПП, богатый на ионы  $Gd^{3+}$  и  $Ga^{3+}$ , внедряющиеся соответственно в додекаэдрические и тетраэдрические положения растущей феррогранатовой пленки. Замещение немагнитными ионами  $Ga^{3+}$  ионов  $Fe^{3+}$  в тетраэдрах приводит к уменьшению намагниченности насыщения пленки. Ионы  $Gd^{3+}$  вносят вклад в уширение линии ФМР за счет ионного механизма релаксации.

На поверхности феррогранатовой пленки также образуется переходной слой «пленка—воздух» (ПВ), связанный с возрастанием вхождения в структуру пленки ионов  $Pb^{2+}$  из растворителя из-за

обеднения ферритообразующими компонентами граничащего с подложкой диффузионного слоя. Эти ионы приводят к возрастанию ширины линии ФМР.

Для исследования влияния переходных слоев ПП и ПВ на магнитные свойства пленок ЖИГ проведено послойное травление ферритового слоя с помощью ортофосфорной кислоты при 125°C. После каждого травления измеряли толщину пленки  $d$ , намагниченность насыщения  $4\pi M_s$  и  $\Delta H$ .

В таблице приведены значения  $4\pi M_s$ ,  $\Delta H$  и толщины  $d$  трех пленок ЖИГ после каждого травления. Из таблицы видно, что ферритовые пленки обладают слоистой структурой. Эти слои имеют разную толщину, характеризуются по сравнению с ЖИГ, для которых  $4\pi M_s = 1750$  Гс, большей или меньшей намагниченностью, а для ПП- и ПВ-слоев — намного большими значениями параметра  $\Delta H$ .

Толщина и магнитные параметры трех образцов пленок ЖИГ, полученные в процессе травления

№ 1	$d$ , мкм	4,1	3,2	2,4	1,5	0,8	0,5	0,2
	$\Delta H$ , Э	0,9	0,83	0,80	0,64	0,73	1,40	2,11
	$4\pi M_s$	1780	1780	1700	1710	1650	1600	1470
№ 2	$d$ , мкм	3,8	3,0	2,2	1,4	0,7	0,6	0,4
	$\Delta H$ , Э	0,80	0,85	0,71	0,47	0,7	1,34	1,92
	$4\pi M_s$	1740	1710	1680	1590	1530	1460	1390
№ 3	$d$ , мкм	3,7	2,8	1,9	1,2	0,6	0,4	0,3
	$\Delta H$ , Э	1,10	1,00	0,86	0,78	0,93	1,38	2,14
	$4\pi M_s$	1780	1780	1700	1720	1670	1580	1510

Эксперименты, проведенные с растворителем  $PbO-B_2O_3$  при значениях коэффициента  $R_3 = \frac{PbO}{B_2O_3} = 12,4; 14; 15,6$  и  $16,0$  показали, что степень растворимости подложек ГГГ линейно растет с увеличением концентрации оксида бора в растворителе. Следовательно, при выращивании пленок ЖИГ необходимо использовать растворители с пониженным содержанием  $B_2O_3$ . Для поддержания фазового равновесия в системе «растворитель—ЖИГ» в раствор-расплав необходимо вводить избыточное количество оксида железа. Однако уменьшение содержания оксида бора имеет также отрицательные последствия: 1) сужается композиционная стабильность поля ЖИГ в растворе-расплаве; 2) возрастает летучесть оксида свинца. Нами был определен оптимальный весовой состав раствор-расплава, в котором растворимость ГГГ незначительна при высоких температурах:  $PbO$  — 90,34%;  $B_2O_3$  — 1,81%;  $Fe_2O_3$  — 7,13%;  $Y_2O_3$  — 0,72%. Установлено, что для данного раствор-расплава оптимальная степень перенасыщения достигается его охлаждением на 10...20°C при температуре насыщения  $t_n = 960$ °C. Из такого состава нами выращены пленки ЖИГ толщиной 1...6 мкм на круглых подложках из ГГГ диаметром 40...60 мм, имеющие ширину линии ФМР  $\Delta H = 0,3...0,5$  Э, пригодные для использования в микроволновых устройствах.

S. I. Yushchuk, S. O. Yuryev, S. P. Dubelt, V. I. Loboiko

#### **Influence of some technological factors on the quality of epitaxial films of yttrium iron garnet**

It is shown that the chemical composition of yttrium iron garnet films, epitaxially grown on single crystal substrates of gallium-gadolinium garnet changes in thickness due to uneven implementation from the solution-melt of ions of gadolinium, gallium and lead. Films grown from the optimal composition of solution-melt had the line width of ferromagnetic resonance  $\Delta H = 0,3...0,5$  Oe at the thickness of 1...6  $\mu m$ .

Keywords: *ferrogarnet films, solution-melt, ferromagnetic resonance.*