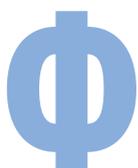


ФЕРРИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ

ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ВЫБОРА

А. Устинов, В. Кочемасов, Е. Хасьянова

Благодаря уникальным свойствам – большим значениям удельного сопротивления, высокой магнитной проницаемости и глубине проникновения магнитного СВЧ-поля – ферриты нашли широкое применение не только в силовой электронике в качестве сердечников для трансформаторов различного назначения, но и при производстве СВЧ-устройств диапазона 1–110 ГГц: циркуляторов, вентилях, резонаторов, фильтров, фазовращателей [1, 2]. Выбор ферритового материала играет критически важную роль при разработке СВЧ-устройств, так как оказывает влияние на габариты, вносимые потери, предельно допустимую мощность и другие характеристики. Понимание основных свойств и особенностей различных классов ферритов помогает подобрать нужный материал, который в максимальной степени отвечает требованиям, предъявляемым к разрабатываемому устройству.



Ферриты представляют собой химические соединения оксидов железа с оксидами других металлов, которые в условиях ниже температуры Кюри обладают таким свойством, как спонтанная намагниченность. Ферромагнитное упорядочение в таких материалах обусловлено обменным взаимодействием спинов электронов. В отличие от ферромагнетиков ферриты не имеют свободных электронов, поэтому проявляют диэлектрические или полупроводниковые свойства. В зависимости от метода получения ферритовые материалы могут иметь поликристаллическую или монокристаллическую структуру. Для производства тех или иных приборов могут применяться объемные или пленочные образцы. В соответствии с типом кристаллической структуры ферриты делятся на три класса: гранаты, шпинели и гексаферриты. Каждый из них имеет свои преимущества, определяющие области их применения.

При выборе ферритового материала для разработки СВЧ-устройств важны как магнитные, так и диэлектрические его свойства. К магнитным параметрам относятся намагниченность насыщения, ее

температурный коэффициент, температура Кюри, ширина линии ферромагнитного резонанса, порог развития нелинейных процессов. Диэлектрические свойства определяются диэлектрической проницаемостью и тангенсом угла диэлектрических потерь. Остановимся вначале на кратком описании этих параметров.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФЕРРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Намагниченность – это магнитный момент единицы объема вещества. **Намагниченность насыщения ($4\pi M_s$)** экспериментально определяется как точка, в которой намагниченность ферритового образца перестает нарастать при увеличении внешнего магнитного поля [3]. В зависимости от материала ее значение находится в диапазоне 200–5000 Гс.

Магнитная кристаллографическая анизотропия – зависимость магнитных свойств ферромагнетика от направления его намагничивания относительно осей кристаллической решетки [4, 5]. Причиной ее возникновения является квантовое спин-орбитальное взаимодействие. Существуют три типа магнитной

кристаллографической анизотропии: кубическая, "легкая ось" и "легкая плоскость". От типа магнитной кристаллографической анизотропии в значительной мере зависит эффективное поле анизотропии H_A . Заметим, что в тонких ферритовых пленках может также существовать **поверхностная анизотропия**, которая модифицирует спектр спиновых волн. Так, при ограничении подвижности спинов на поверхностях пленки, иными словами, при "закреплении поверхностных спинов", в спектре спиновых волн наблюдаются так называемые "дипольные щели" [6]. Кроме того, собственные частоты мод спектра смещаются вверх по частоте. В зависимости от толщины пленки они могут достигать частот субтерагерцового диапазона.

Термическое изменение значения намагниченности характеризуется **температурным коэффициентом намагниченности насыщения (α_F)**. Этот параметр обычно приводится для диапазона температур $-60...85^\circ\text{C}$. В зависимости от потенциальной области применения данный диапазон может быть уже. На температурную стабильность ферритов влияет **температура Кюри (T_C)**, при которой происходит фазовый переход из ферромагнитного состояния в парамагнитное.

Ширина линии ферромагнитного резонанса (ФМР) $2\Delta H$ физически характеризует диссипацию энергии магнитных колебаний в феррите. С практической точки зрения ΔH определяет полосу пропускания резонансных СВЧ-приборов и вносимые потери спин-волновых приборов. Ширина линии ФМР определяется как разность между двумя значениями напряженности магнитного поля, при которых мощность, поглощаемая ферритовым образцом, составляет половину от максимального поглощения [4, 5] (рис.1). В зависимости от типа феррита значение ΔH может значительно меняться. Необходимо отметить, что при экспериментальном определении величины ΔH на результаты измерений влияет класс обработки поверхности образца: чем качественнее выполнена полировка, тем уже линия ФМР.

Предельный уровень СВЧ-мощности, при котором начинается резкий рост потерь в ферритовом материале за счет развития нелинейных процессов, характеризует **ширина линии спин-волновой релаксации (ΔH_K)**. Пороговый уровень мощности прямо пропорционален квадрату ΔH_K и обратно пропорционален значению $4\pi M_S$.

Рабочий частотный диапазон СВЧ-прибора может лежать как в области ферромагнитного резонанса, так и ниже или выше частоты ФМР. При заданной напряженности внешнего магнитного поля частота ФМР зависит от значений $4\pi M_S$ и H_A , а также от формы образца [4, 5]. Поэтому рабочая частота для того или

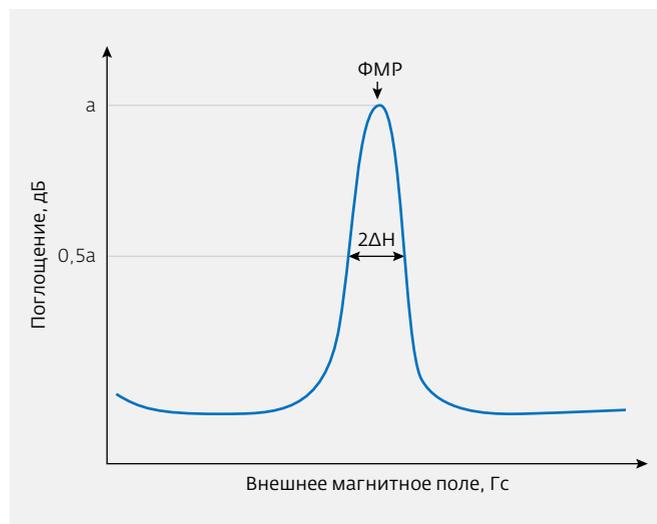


Рис.1. Зависимость уровня поглощения электромагнитной энергии от приложенного постоянного внешнего магнитного поля [4]

иного материала будет находиться ниже или выше частоты ФМР. Заметим, что следует различать рабочий диапазон прибора по частоте и по магнитному полю. Так, рабочей точке по магнитному полю ниже ФМР соответствует рабочая точка по частоте выше ФМР и наоборот. Ферритовые СВЧ-приборы разделяются на резонансные, дорезонансные и зарезонансные в соответствии с магнитной рабочей точкой (см. рис.1).

Для того чтобы избежать высоких потерь в резонансном и дорезонансном режимах работы ферритовых СВЧ-приборов, намагниченность насыщения необходимо выбирать таким образом, чтобы ферритовый образец был намагничен до насыщения. Кроме того, для резонансных вентилях обычно выбирают ферриты с большими значениями намагниченности насыщения, чтобы минимизировать поле подмагничивания. Для дорезонансных устройств понижение значения $4\pi M_S$ увеличивает их максимальную рабочую

мощность. Однако это также сужает полосу согласования импеданса. Таким образом, полоса рабочих частот и динамический диапазон являются конкурирующими параметрами. Для резонансных устройств величина намагниченности насыщения не играет большой роли. По мере роста $4\pi M_s$ увеличивается полоса пропускания устройств.

Ширина кривой ферромагнитного резонанса $2\Delta H$ для нерезонансных ферритовых устройств должна быть как можно меньше. Ее увеличение ведет к росту вносимых потерь. Для резонансных устройств, например вентиля, величина $2\Delta H$ должна быть сравнительно большой для того, чтобы обеспечить его работу в широкой полосе частот.

В спецификации материала указывают **относительную диэлектрическую проницаемость (ϵ_r)**, а также **значение тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$)**. Последний параметр необходимо выбирать минимально возможным. Что касается диэлектрической проницаемости, то ферриты одного и того же типа имеют примерно одинаковые значения ϵ_r в диапазоне от 12 до 18.

КЛАССЫ ФЕРРИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время массовое распространение получили материалы с поликристаллической структурой, производимые на основе керамической технологии [7]. По функциональному назначению они делятся на ферриты для приборов резонансного и нерезонансного типов. На первом этапе исходные ферритообразующие материалы, точный состав и пропорции которых, как правило, держатся производителями в секрете, смешивают в необходимом количестве с применением воды или денатурата. На данном этапе особенно важен выбор зернистости исходного материала. Например, для циркуляторов, работающих на частотах ниже ферромагнитного резонанса, уменьшение размеров зерна феррита повышает уровень пороговой мощности на порядок. Но по мере уменьшения размера зерна увеличивается стоимость производства. Типовое значение зернистости составляет 10–20 мкм.

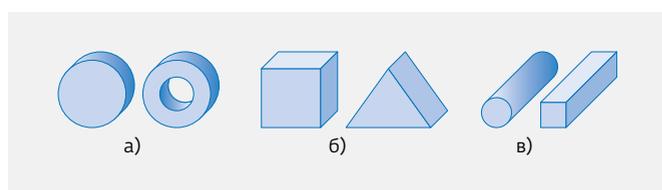


Рис. 2. Стандартные формы ферритовых изделий: а) диски и кольца; б) прямоугольные и треугольные пластины; в) стержни круглого и прямоугольного сечения

Получившуюся массу прессуют в изделия нужной формы (рис. 2) с последующим спеканием при температурах от 900 до 1500°C на воздухе или в специальной газовой атмосфере. Форма феррита также влияет на параметры устройства, в котором он будет использоваться (например, треугольная пластина снижает уровень вносимых потерь в сочлененном циркуляторе по сравнению с ферритовым диском). Размеры и форма образца также зависят от рабочей частоты, термостабильности, уровня мощности и других параметров [8].

Точность температуры спекания – критически важный параметр. Например, отклонение температуры всего на 10°C существенно меняет ширину линии ФМР иттриевых гранатов [9]. После обжига поверхность шлифуют и полируют. Требования к точности толщины феррита или его диаметра варьируются в зависимости от области применения. Как правило, точность для толщины составляет $\pm 0,01$ мм, а для диаметра диска – $\pm 0,1$ мм. При применении ферритов в устройствах миллиметрового диапазона волн эти значения могут быть еще меньше. Поскольку ферриты являются хрупкими материалами с низкой теплопроводностью, для обработки поверхности и корректировки формы феррита лучше всего использовать алмазные диски. Механическая обработка поверхности влияет на магнитные свойства материалов, следовательно, при использовании феррита в устройствах с жесткими требованиями к отклонениям параметров после шлифовки и полировки обязательно применение термического отжига. СВЧ-компоненты меньших размеров, требующие более высокой точности изготовления, можно получить, применяя ферритовые подложки и печатную технологию производства [10].

Исторически сложилось, что первыми в СВЧ-технике были применены **феррошпинели** – ферриты с кристаллической структурой шпинели [11] (табл. 1). Общая химическая формула таких материалов $MeFe_2O_4$, где Me – один из двухвалентных ионов переходных металлов Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, а также ионы Mg и Cd. В диапазоне 7–15 ГГц успешно применяются магниевомарганцевые (Mg-Mn), никелевые (Ni) и литиевые (Li) ферриты [12]. Mg-Mn-ферриты обладают значением температуры Кюри около 300°C, поэтому их не рекомендуется применять в устройствах, предназначенных для широкого диапазона рабочих температур. Для Ni-феррошпинелей характерны большие значения потерь, но температура Кюри составляет около 570°C. Этот класс ферритов используют для высокомошных устройств – фазовращателей, циркуляторов, вентилялей, антенн. Для увеличения значения намагниченности насыщения в Ni-шпинели добавляют цинк, что позволяет применять эти материалы для устройств

миллиметрового диапазона. Однако такие ферриты не обладают прямоугольной петлей гистерезиса (рис.3), в отличие от Mg-Mn-ферритов.

Для литиевых ферритов свойственны температура Кюри T_c около 645°C, низкие СВЧ-потери, прямоугольная петля гистерезиса. Для уменьшения намагниченности насыщения в нижней части СВЧ-диапазона в литиевые ферриты добавляют титан. Такие ферриты используются в керамических магнитах и устройствах, работающих в СВЧ- и миллиметровом диапазонах.

Хотя феррошпинели и были первыми магнитодиэлектриками, применяемыми в СВЧ-технике, разработчики многих устройств отдадут предпочтение

ферритам-гранатам – ферритам иттрия и лантаноидам (табл.2), что обусловлено их более низкими магнитными потерями. У гранатов сложная структура [11]. Общую химическую формулу можно записать в виде $R_3Fe_5O_{12}$, где R – один из трехвалентных ионов редкоземельных элементов (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Sm или Eu).

Температура Кюри T_c таких материалов составляет примерно 286°C. Они обладают большей температурной стабильностью по сравнению со шпинелями. Низкие потери, большое значение намагниченности насыщения и узкая линия ферромагнитного резонанса делает более предпочтительным применение данного класса ферритов в СВЧ-технике. Для улучшения

Таблица 1. Ферритовые материалы со структурой шпинели [13-19]

4πMs, Гс	Компания	Марка	$\epsilon \pm 5\% @ 9,4 \text{ ГГц}$	$\Delta H (-3 \text{ дБ}), \text{ Э, не более}$	$\tan \delta \times 10^{-4}, \text{ не более}$	$\xi_{\text{эф}}$	$T_c, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta H_k, \text{ Э}$	Вr, Гс
Магний-марганцевые феррошпинели (Mg-Mn)									
1450	Магнетон	6СЧ1	12	180	4	2,02	140	-	250
1450	Феррит-Домен	6СЧ1	12	150	4	2,02	140	-	250
1700	Ферроприбор	3СЧ7	12,3	390	6	-	260	7,5	1030
2040	КБ-1	3СЧ-15	12	-	4	-	360	-	1300
2150	Trans-Tech	ТТ1-390	12,7	648	2,5	2,04	320	-	1288
2400	Temex Ceramics	U21	13	290	3	2,03	275	4	-
3000	Magnetic group	MF-3000	12,9	190	5	-	240	-	-
Никелевые феррошпинели (Ni)									
2500	Ферроприбор	3СЧ21	13,7	260	5	2,2	530	9	1100
3150	Магнетон	2СЧ11	13,7	300	4	2,2	560	7	2000
4000	Temex Ceramics	NZ50	13,4	200	5	2,2	470	15	-
5000	Феррит-Домен	1СЧ9	13,4	150	6	2,11	345	-	3500
5000	КБ-1	1СЧ11	13,5	-	6	-	345	-	3500
5100	Магнетон	1СЧ91	14	130	4	2,11	345	6	3500
Литиевые феррошпинели (Li)									
1870	Ферроприбор	3СЧ18	16,5	410	8	2,04	300	1,6	1200
2275	КБ-1	24	16,5	-	4	-	350	-	1675
3700	Magnetic group	LF-3700	16	400	10	-	560	-	-
4000	Trans-Tech	ТТ2-111	12,3	425	25	2,22	-	-	1800
4750	КБ-1	1СЧ-11	14,5	-	6	-	450	-	3250
4750	Феррит-Домен	1СЧ25	14,7	200	3	2,06	450	-	≥ 3000
5000	Magnetic group	NF-5000	13	165	15	-	350	-	-
5000	Temex Ceramics	A50	15,3	170	5	2,06	450	3	3300

Таблица 2. Ферриты-гранаты [13-19]

4πMs, Гс	Компания	Марка	$\epsilon \pm 5\% @ 9,4 \text{ ГГц}$	$\Delta H (-3 \text{ дБ}), \text{ Э, не более}$	$\tan \delta \times 10^{-4}, \text{ не более}$	Tс, °С	$\Delta H_k, \text{ Э}$
Чистый и легированный иттриевые гранаты (Y)							
1600	КБ-1	4СЧ-20	14,9	-	2	280	-
1600	Trans-Tech	G-4256	15,1	84	2	280	-
1780	Magnetic group	YGC-1780	15	30	1	280	-
1780	Феррит-Домен	10СЧ6Б4	15,1	35	2	280	1
1780	Магнетон	10СЧ61	15,2	25	2	280	1,5
1800	Magnetic group	YG-1800-SNL	15,4	30	2	280	-
Иттрий-кальцевые гранаты (Y-Ca)							
960	Temex Ceramics	Y4091	15,2	35	2	195	9
1400	Магнетон	25СЧvs	14,5	6	1,5	215	1
1450	Temex Ceramics	Y215	14,7	10	2	215	1
1560	Magnetic group	NG-1560-SNL	15	6	1,5	215	-
1600	Феррит-Домен	15СЧ6-2	14,6	12	2	215	1
1900	Магнетон	9СЧ	15	12	1,5	215	1
1950	Феррит-Домен	9СЧ1	15	15	2	235	1
1950	Trans-Tech	TTVG-1950	15	15	2	235	-
Иттрий-алюминиевые (Y-Al) гранаты							
190	Магнетон	90СЧБ	13,7	25	2	95	2
250	Trans-Tech	G-250	13,8	45	2	105	-
290	Temex Ceramics	Y36	14	25	2	115	2
320	Феррит-Домен	80СЧБ	13,8	40	2	120	2
400	Magnetic group	Al-0400	14,1	45	2	135	-
Иттрий-гадолиниевые и иттрий-гадолиний-алюминиевые гранаты Y-Gd; Y-Gd-Al							
1020	Temex Ceramics	Y71	15	60	2	235	5
1020	Temex Ceramics	Y91	15,1	60	2	240	9
1250	Temex Ceramics	Y13	15,3	75	2	280	7
1400	Trans-Tech	G-1400	15,1	60	2	265	-
1400	Magnetic group	GA-1400	15,1	55	2	265	-
1600	Magnetic group	Gd-1600	15,1	50	2	280	-
1700	Магнетон	3СЧ201	14,9	45	2	280	3
1780	Феррит-Домен	3СЧ20	15	42	2	280	2
Иттрий-гадолиний-алюминиевые гранаты, легированные редкоземельными элементами (Y-Gd-Al+PЗЭ)							
900	Феррит-Домен	40СЧ4	15,5	140	2	280	14
1280	Магнетон	20СЧ8М	15,1	60	2	225	16
1300	Магнетон	20СЧ7	15,1	42	2	225	6
1380	Феррит-Домен	20СЧ10	15	20	2	240	5
1600	Magnetic group	HG-1600	15,1	84	2	280	-
1760	Temex Ceramics	D18	15	85	2	280	18

Таблица 3. Гексаферриты [13, 14]

4πMs, Гс	Компания	Марка	$\epsilon \pm 5\%$ @9,4 ГГц	ΔH (-3 дБ), кЭ, не более	$\tan\delta \times 10^{-4}$	Tс, °C
2850	Феррит-Домен	08СЧА5	13	3	≤ 10	450
3700	Магнетон	06СЧА3	16	1@55 ГГц	≤ 8	420
1500	Магнетон	03СЧАВ	16	1,5@110 ГГц	≤ 10	220
3400	Феррит-Домен	08СЧА5В	17	2,5	10	450

некоторых характеристик иттриевых ферритов, в частности, для повышения его термостабильности и увеличения уровня пороговой мощности, в его структуру часто вводят ионы кобальта (Co), а также ионы редкоземельных металлов диспрозия (Dy), гадолиния (Gd) и др.

Гексаферриты – ферриты с гексагональной кристаллической структурой. Наиболее распространены гексаферриты с формулой (MO) (Fe₂O₃)₆, где М – Ва, Sr или Pb [11] (табл.3). Гексаферриты используются в устройствах, работающих в миллиметровом диапазоне как с применением внешнего подмагничивания, так и без него. В последнем случае роль поля подмагничивания играет поле одноосной магнитокристаллографической анизотропии H_A, величина которого может достигать 33 кЭ [20].

Наряду с применением поликристаллических материалов определенные успехи достигнуты и в использовании ферритовых монокристаллов. Благодаря узкой линии ФМР (составляющей доли или единицы эрстед), оптической прозрачности, высокой добротности и износостойкости, такие материалы применяют при создании как твердотельных СВЧ-приборов, так и устройств оптоэлектроники.

Монокристаллы ферритов выращивают на основе методов Бриджмена, Вернейля, Чохральского, высокотемпературного выращивания из растворов в расплаве и др. [11]. Для получения монокристаллических пленок используется метод жидкофазной эпитаксии.

Наиболее широкое применение в электронике СВЧ нашли монокристаллы ферритов железо-иттриевого граната (ЖИГ), у которых рекордно узкая ширина линии ферромагнитного резонанса 0,2–0,5 Э. На их основе производят СВЧ-фильтры на сферах ЖИГ [14, 21] и фильтры на магнитоэлектрических волнах (МЭВ) [14, 22], которые различаются как конструкцией, так и принципом работы. Действие фильтра на сфере ЖИГ основано на эффекте ферромагнитного резонанса. ЖИГ-резонаторы (табл.4) изготавливают в виде сфер диаметром 0,25–1,1 мм, закрепленных на керамическом стержне.

Принцип работы фильтров на МЭВ заключается в возбуждении, распространении и приеме спиновой волны в монокристаллической пленке ЖИГ [6]. Пленки ЖИГ эпитаксиально выращиваются на подложках галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) и имеют следующие типовые параметры: толщина 1–100 мкм и намагниченность насыщения 400–1900 Гс (в зависимости от количества и типа замещающей примеси) [23, 24]. На сравнительно низких частотах 1–4 ГГц целесообразно использовать пленки с пониженной намагниченностью, поскольку ею определяется граничная частота существования трехволновых параметрических процессов, ограничивающих динамический диапазон линейных спин-волновых приборов. Уменьшение намагниченности насыщения снижает эту граничную частоту.

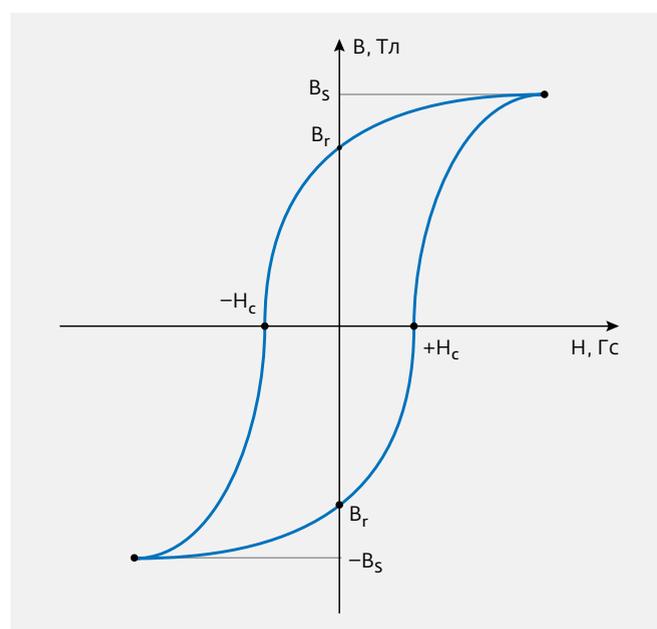


Рис.3. Типовая петля гистерезиса для феррита (Br – остаточная магнитная индукция; Bs – индукция насыщения; Hc – коэрцитивная сила по индукции)

Таблица 4. ЖИГ-резонаторы производства НИИ "Феррит-домен" [13]

4πMs, Гс	Компания	Марка	ΔH _{min} , Э	Тестовая частота, ГГц	T _c , °C	Рабочая полоса, ГГц
90	Феррит-домен	8КГ	0,5	0,5	100	0,4-0,7
360	Феррит-домен	30КГ	0,3	1,5	155	1,35-4,0
620	Феррит-домен	50КГ	0,4	2	220	2,2-9,0
1750	Феррит-домен	140КГ	0,4	9	280	6,0-37,0

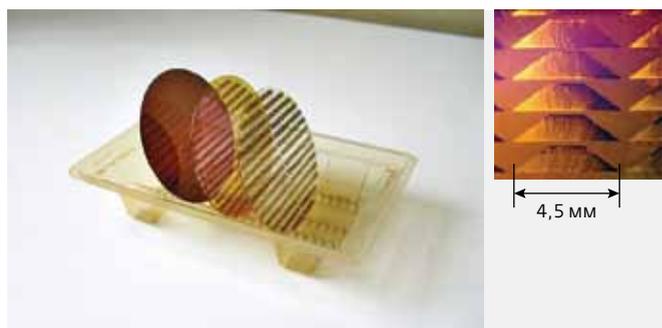


Рис.4. Эпитаксиальные структуры ЖИГ на ГГГ и массив пленочных волноводов, изготовленные по интегральной технологии (слева); фрагмент того же массива в увеличенном масштабе (справа)

Кроме СВЧ-фильтров, на основе монокристаллических пленок ЖИГ возможно изготовление электронно-перестраиваемых фазовращателей, линий задержки, генераторов и других СВЧ-компонентов [6, 25, 26]. Их главными достоинствами являются миниатюрность, планарность конструкции и возможность изготовления по интегральной технологии (рис.4).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Özgür Ü., Alivov Y., Morkoç H.** Microwave ferrites, part 1: fundamental properties // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2009. Т. 20. № 9. С. 789–834.
2. **Harris V.G.** Modern microwave ferrites. – IEEE Trans. Mag., 2012, vol. 48, pp. 1075–1104
3. Проектирование полосковых устройств СВЧ. – Ульяновск, 2001, 129 с.
4. **Лакс Б., Баттон К.** Сверхвысокочастотные ферриты и ферромагнетики. – М.: Мир, 1965, 676 с.
5. **Гуревич А., Мелков Г.** Магнитные колебания и волны. – М.: Физматлит, 1994, 464 с.
6. **Калиникос Б., Устинов А., Баруздин С.** Спин-волновые устройства и эхо-процессоры. Монография под ред. Ушакова В. – М.: Радиотехника, 2013, 216 с.
7. **Baden Fuller A.** Ferrites at Microwave Frequencies. – Peter Peregrinus Ltd., 1987.
8. **Helszajn J., James D.** Planar triangular resonators with Magnetic Walls. – IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1978, February, pp. 95–100.
9. **Linkhart D.** Microwave circulator design. – Artech House, 2014, 364 p.
10. Ferrimagnetic Substrates for Microwave Integrated Circuits. – www.trans-techinc.com.
11. **Яковлев Ю., Генделев С.** Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. – М.: Советское радио, 1975, 360 с.
12. **Cruickshank D.** Microwave materials for wireless applications. – Artech House, 2011, 221 p.
13. <http://www.domen.ru/catalog/mmm/files/materials%20vc.pdf>.
14. <http://www.magneton.ru/cat.php?id=134>
15. <http://www.rusgates.ru>.
16. <http://www.oaokb1.ru/deyatelnost/ferrit-proizvodstvo/katalog>.
17. http://www.trans-techinc.com/products_detail.asp?ID=3&Name=Ferrites-&Magnetic-Materials.
18. <http://www.temex-ceramics.com/site>.
19. http://www.magneticsgroup.com/m_garn.htm.
20. **Ustinov A., Tatarenko A., Srinivasan G., Balbashov A.** Al substituted Ba-hexaferrite single-crystal films for millimeter-wave devices. – J. Appl. Phys., 2009, 105, 023908.
21. **Белов Л.** Корпорация Micro Lambda Wireless. СВЧ-приборы с ЖИГ-перестройкой. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2010. № 8. С. 60–66.
22. <http://www.faza-don.ru/popina/popina/home.html>
23. <http://www.niimv.ru/products/opticheskie-i-lazernye-monokristally.html>.
24. <http://www.mtixtl.com/yig-ggg-1010.aspx>
25. **Ваннэ Г.** СВЧ-устройства на магнитостатических волнах // Обзоры по электронной технике. 1984. Сер. 1. 78 с.
26. СВЧ-ферриты (малый тематический выпуск). – ТИИЭР, 1988. Т. 76. № 2. С. 29–116.