

## **Вклад ОАО «Завод Магнетон» в развитие отечественной электронной компонентной базы**

*В статье описывается вклад ОАО «Завод Магнетон» в развитие отечественной электронной компонентной базы, главным образом для изделий специальной техники.*

**Ключевые слова:** ферритовые и керамические материалы, СВЧ ферритовые приборы

ОАО «Завод Магнетон» – старейший завод электронной промышленности, является уникальным предприятием. Это единственный завод оборонно-промышленного комплекса (ОПК) г. Санкт-Петербурга, который за выдающиеся успехи в укреплении оборонной мощи Отечества был в 1985 году награжден Орденом Отечественной войны I степени.

Распоряжением Правительства РФ ОАО «Завод Магнетон» включен в список стратегических предприятий ОПК страны. Это единственный российский завод ОПК, владеющий комплексной технологией производства изделий электронной компонентной базы (ЭКБ) на основе ферритов и керамики, СВЧ-приборов, в том числе фазовращателей (ФВ), развязывающих приборов, переключателей и ферритовых фильтров (ФФ).

Стратегические задачи по разработке и последующему промышленному выпуску изделий ЭКБ предприятие организационно решило путем создания научно-производственных комплексов (НПК).

**НПК микроволновых ферритов (НПК МКФ)**, оснащенный уникальным специализированным технологическим оборудованием, обеспечил производство материалов для приборов СВЧ-диапазона частот. Комплекс имеет отработанную технологию, позволяющую выпускать СВЧ-ферриты с минимальным влагопоглощением и с контролем динамических параметров, определяющих их работу в фазовращателях, используемых в фазированных антенных решетках (ФАР) радиолокаторов различного назначения (авиационных, сухопутных, морских).

В настоящее время комплекс выпускает СВЧ-ферриты различной формы (диски, пластины, треугольники, стержни и др.) из 75 марок феррогранатов, 51 марок феррошпинелей и 13 марок гексаферритов [1], в том числе с металлизацией поверхностей золотом, серебром и др. Из наиболее значимых достижений следует отметить разработку серии  $YCaVIn(Zr)$ -феррогранатов со сверхузкой линией ферромагнитного резонанса ( $\Delta H \leq 6\text{Э}$ ) и малыми потерями ( $\text{tg}\delta_e \leq 1,5 \cdot 10^{-4}$ ).

СВЧ-ферриты ОАО «Завод Магнетон» широко используются для ФАР всех новейших зенитно-ракетных комплексов серии С-300, С-300В, С-300Ф «Риф», С-400 «Триумф», Тор-М1, Тор-М2Э, Бук-М2. На основе выпускаемых предприятием ферритах созданы ФАР ряда современных бортовых радиолокационных станций (БРЛС), в том числе БРЛС «Барс» для многофункционального истребителя СУ-30 МКИ

(для Индии), и БРЛС «ИРБИС» для истребителя нового поколения СУ-35, разработчиком которых является ОАО «НИИ Приборостроения им В.В. Тихомирова» (г. Жуковский). Наши достижения в этой области теснейшим образом связаны с ведущими разработчиками НИИП – начальником лаборатории Старшиновой Е.И. и главным конструктором ФАР Чалых Е.А.

**НПК микроволновой керамики (НПК МК)** – самое молодое производство среди известных зарубежных и отечественных фирм – производителей микроволновых материалов. За это время созданы более 29 марок разных типов керамики, что поставило ОАО «Завод Магнетон» по номенклатуре и качественным показателям в один ряд с лучшими производителями СВЧ керамики, как в России, так и за рубежом.

Сегодня в каталог предприятия включены следующие типы СВЧ-керамики [1]:

1 параметрический ряд СВЧ-керамики общего назначения из 12 марок, перекрывающий диапазон  $\epsilon$  от 7.3 до 40. В настоящее время разрабатываются ещё 2 марки керамики – с  $\epsilon=60$  и  $\epsilon=80$ . Дальнейшие разработки расширят параметрический ряд этой керамики до значений  $\epsilon$  (140-150). Керамика этого класса характеризуется высокой механической прочностью, химической и термической стойкостью (выдерживает температуры до  $500 \div 1000^\circ\text{C}$ ).

2 параметрический ряд СВЧ-диэлектрических материалов из 10 марок на основе полимеров в диапазоне  $\epsilon$  от 3 до 16. Интервал рабочих температур от минус 60 до  $+90^\circ\text{C}$ . Данные материалы применяются в серийном производстве для изготовления изделий сложной формы, крупногабаритных изделий (например, подложек для печатных плат).

В настоящее время производится разработка диэлектрического материала этого типа с повышенной теплостойкостью (более  $150^\circ\text{C}$ ).

3 параметрический ряд легкой керамики из 4-х марок с супермалой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$  от 1.5 до 3). Этот тип керамики имеет ячеистую структуру и в СВЧ диапазоне может применяться как в качестве функциональных элементов, так и конструктивного материала. Имеет малую удельную плотность (от 0.6 до 1.3), при этом характеризуется закрытой объёмной пористостью; не поглощает влагу и, в отличие от других диэлектриков с малой  $\epsilon$ , выдерживает температуры до  $500^\circ\text{C}$ . Данный тип керамики отсутствует в каталогах известных зарубежных и отечественных фирм.

Комплексом проводится разработка параметрического ряда термостабильной СВЧ керамики. В 2011г. разработана марка СТЛ-40 – первая из этого ряда с параметрами:  $\epsilon=40$ ,  $\text{TK}_\epsilon=\pm 20 * 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\text{tg}\delta_\epsilon \leq 6 * 10^{-4}$ . В 2011 году начато изготовление корундовой высокоплотной и вакуумплотной керамики марки ВК-100М для применения в высоковольтных (ВВ) трансформаторно-выпрямительных модулях (ТВМ) блоков питания РЛС. В июне 2012 года заканчивается ОКР по созданию корундовой керамики с параметрами:  $\epsilon=10.3$ ;  $\text{tg}\delta_\epsilon \leq 2 * 10^{-4}$ .

**НПК магнитомягких ферритов (НПК ММФ)** был специально создан для ликвидации острого дефицита ферритовых сердечников, образовавшегося в связи с банкротством крупнейшего производителя – Рыбинского электротехнического завода.

НПК ММФ было освоено производство Mn-Zn и Ni-Zn ферритов категории качества «ВП», а также производство термостабильных Mn-Zn ферритов категории качества «ОС» (марки 1500НМ3 и 2000НМ1) повышенной надежности [2]. Это решило проблему комплектования бортовой и наземной аппаратуры ракетно-космического комплекса, авиации и ВМФ России. Работа по повышению качества ферритов категории качества «ВП» и «ОС» позволила увеличить срок их сохраняемости до 25 лет и гарантировать работу сердечников в течение 150 тыс. часов. Данная группа ферритов соответствует зарубежному уровню и не уступает аналогичным ферритам, выпускаемыми фирмами TDK, Epcos и Ferroxcube.

В рамках ОКР «Аллада» была разработана серия KB, П-, Ш- и Е-образных магнитопроводов из феррита марок 650НМС и 1300НМС для планарных трансформаторов малогабаритных модулей источников вторичного электропитания (ИВЭП), применяемых в приеме-передающих модулях (ППМ) активных ФАР (АФАР). Разработанные и серийно выпускаемые сегодня ферриты предназначены для работы в диапазоне частот до 1.0 МГц (феррит 1300НМС) и до 3.0 МГц (феррит 650НМС) [2], обладают отрицательным температурным коэффициентом удельных объемных магнитных потерь и являются аналогами ELP, ER, ETD и E-сердечников ферритов марок N49 и 3F5 всемирно известных фирм Epcos и Ferroxcube.

В настоящее время освоено производство сердечников конфигурации ПК из феррита-аналога марки N87 фирмы Epcos. Сердечники ПК были специально разработаны для применения в высоковольтных ТВМ с частотами преобразования до 500 кГц для силовых ИВЭП РЛС нового поколения. Заводом выпускается целый ряд прецизионных Mn-Zn ферритов (марки 1600НМИ-1 и 450НМИ) для использования в импульсных трансформаторах. На основе кольцевого феррита 1600НМИ-1 освоены в производстве импульсные трансформаторы ГС4.720.088, обеспечивающие частоты преобразования импульсов до 100 кГц. Трансформаторы предназначены для применения в ВВ модуляторах серийно выпускаемого передатчика Р2-М2 изделия 9А317.

**НПК магнитодиэлектриков (НПК МД)** в настоящее время является единственным производителем в России, серийно выпускающее чашечные, стержневые, построечные и кольцевые сердечники категории качества «ВП» и «ОС» из порошкообразного карбонильного железа марок Р-10, Р-20, Р-100-Ф2, Пс. В 2011 году разработаны высокочастотные ( $Q \approx 90$  на 60 МГц) катушки индуктивности на основе нового высокочастотного магнитодиэлектрика марки МР-100ФМ, являющегося аналогом материала T17 фирмы Micrometals Inc. (США) с  $T\alpha_{\mu} \leq 50 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Разработанные миниатюрные катушки индуктивности предназначены для применения в термостабильных фильтрах ПЧ с центральными частотами от 25 до 85 МГц и с малым вносимым затуханием в полосе пропускания фильтра – не более (5÷7) дБ.

**НПК фазовращателей (НПК ФВ)** серийно изготавливал ФВ для ФАР БРЛС истребителей МИГ-31 (ОКР «Заслон», разработчик ОАО «НИИ Приборостроения им В.В. Тихомирова»). Выпустив более 100 тысяч фазовращателей 6ДАГ-Г1Ф, завод внес значительный вклад в создание одного из основных средств системы А-135 (система ПРО г. Москва) – многофункционального стрельбового радиолокатора «Дон 2Н» с

зоной обзора по всей верхней полусфере. РЛС «Дон 2Н» имеет рекордные характеристики по дальности, точности, пропускной способности, возможности наблюдения и селекции малоразмерных космических целей ( $D > 5$  см).

В 2004 году предприятие приняло участие в разработке ФВ для многофункциональной стрельбовой РЛС ЗРПК «Панцирь С1». После успешного окончания разработки завод провел большую работу по освоению серийного производства и сегодня изготавливает более 45 тысяч фазовращателей в месяц.

В 2006 году закончена работа по модернизации фазовращателя для ФАР радиолокатора системы «Бук М-2», сегодня продолжается серийное производство этих фазовращателей (ФВФН2-25).

В настоящее время ОАО «Завод Магнетон» производит ферритовые фазовращатели практически всех известных типов. В табл. 1 представлены характеристики ФВ, серийно выпускаемых или осваиваемых ОАО «Завод Магнетон».

**НПК ферритовых фильтров (НПК ФФ)** обеспечивает разработку и выпуск электрически перестраиваемых ферритовых фильтров, которые нашли широкое применение в радиоизмерительной технике, технике связи СВЧ, в системах радиоразведки, приемниках РЛС, анализаторах спектра и т.д. Основное их назначение – это избирательное по частоте выделение полезного сигнала и подавление преднамеренных помех, паразитных сигналов, гармоник. При этом ФФ успешно решают задачи повышения электромагнитной совместимости ППМ различного назначения в условиях компактного территориального и эфирного размещения.

По принципу действия и виду объекта ферритовой среды различают ФФ на монокристаллических резонаторах железо-иттриевого граната (ЖИГ), или литиевой шпинели, работающие на основе ФМР, и фильтры на магнитостатических волнах (МСВ) в монокристаллических пленках. Номенклатура опытных и серийно выпускаемых перестраиваемых фильтров превышает два десятка наименований [3].

ФФ на ферритовых резонаторах обеспечивают такие важные свойства, как широкий диапазон линейной перестройки частоты (октава и более), низкие потери в полосе пропускания (не более 4 дБ), широкие пределы полосы пропускания (от 0.1% до 5%), имеют обширный диапазон частот их реализации (300 МГц ÷ 37 ГГц). В настоящее время НПК ФФ разработаны и выпускаются перестраиваемые фильтры на резонаторах с количеством звеньев до шести, имеющие высокую избирательность (до 36 дБ/октаву), загораживание вне полосы пропускания достигает значений (90 ÷ 110) дБ.

В последнее время большое внимание уделяется быстродействию электрически управляемых приборов СВЧ. Данный вопрос касается как фазовращателей, переключателей, генераторов, так и перестраиваемых ФФ. Перспективность увеличения скорости управления системой заключается в опережении противника с целью упреждения и противодействия. За счет высокой скорости перехода на другую рабочую частоту увеличивается помехозащищенность системы и ее работоспособность при воздействии помех. В качестве быстроперестраиваемых полосно-пропускающих фильтров широко применяются ФФ на ферритовых резонаторах и фильтры на МСВ, время перестройки которых достигает 10 мкс.

Таблица 1 – Характеристики фазовращателей, выпускаемых  
ОАО «Завод Магнетон»

Параметры фазовращателя	Типы фазовращателей (ФВ)			
	Фарадеевский	Двухмодовый	Реджиа-Спенсера	
Наименование	Элемент ФАР	ФВФН2-25	ФВФН2-27	ФВФН2-27М
Статус	Серийный выпуск	Серийный выпуск	Опытный образец	
РЛС	«Панцирь-С1»	«БУК-М2	«БУК-М3»	
Длина волны, см	0,8	4	4	
Входная импульсная мощность, Вт	5	≤150	≤50	
Скважность		≥5	≥5	
Интервал рабочих температур, °С	минус 50÷+60	минус 50÷+65	минус 50÷+70	
Потери СВЧ энергии, дБ	2.0 max	≤1.1 при НУ ≤1.4 при t=+65°С ≤1.6 при t=-50°С	≤0.9 при НУ ≤1.4 при t=+65°С ≤1.6 при t=-50°С	
Время переключения, мкс	100	520	110	520
Энергия переключения за один цикл, мкДж	≤100 (40*)	1000*	250*	500*
Масса, г, не более	2	90	45	
Габариты, мм, не более	4.8x56.5	110x28x20	71x27.5x20.1	

\* по данным измерения

Параметры фазовращателя	Типы фазовращателей (ФВ)		
	Реджиа-Спенсера	Тороидальный	Микрополосковый
Наименование	Экспериментальный образец	Серийный выпуск	Опытный образец
Статус	«Морфей»	АФАР	АФАР
РЛС	2	7,5	7,5
Длина волны, см		2500	120
Входная импульсная мощность, Вт		5	5
Скважность	минус 50÷+70	минус 50÷+50	минус 50÷+50
Интервал рабочих температур, °С	≤0.9 в НУ	≤0.9 при НУ ≤1.4 при t=+65°С ≤1.6 при t=-50°С	≤1.6 при НУ
Потери СВЧ энергии, дБ	80	30	30
Время переключения, мкс	150*	1000*	20*
Энергия переключения за один цикл, мкДж	7.5	1200	50
Масса, г, не более	37x14x10	280x38x90,5	35x28x13
Габариты, мм, не более			

\* по данным измерения

Заводом разработаны малогабаритные перестраиваемые фильтры на МСВ однокаскадные и двухкаскадные. Фильтры охватывают частотный диапазон от 1.2 ГГц до 20 ГГц и относятся к новому направлению развития ЭКБ СВЧ электроники. Фильтры имеют микрополосковые выводы, габариты однокаскадных фильтров укладываются в пределы  $(1.5 - 5) \text{ см}^3$ . Минимальные потери в полосе пропускания –  $(2.5 \div 4)$  дБ. Интервал рабочих температур составляет от минус  $50^\circ\text{C}$  до  $+70^\circ\text{C}$  при стабильности  $0.2 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$ . Двухкаскадные фильтры обеспечивают высокую избирательность 36-45 дБ/октаву, заграждение  $(80 \div 90)$  дБ [3].

Малогабаритные фильтры на МСВ могут конкурировать с приборами на ЖИГ резонаторах, диэлектрических резонаторах, приборах на варакторах и акустических волнах. Зарубежные фильтры на МСВ не известны, в каталогах ведущих фирм-производителей нет аналогов и данных. Отечественные аналогичные фильтры на МСВ имеют габариты больше в 8 – 10 раз  $(20 - 40) \text{ см}^3$ . Кроме того, аналоги уступают малогабаритным фильтрам по минимальным потерям, мощности управления.

**НПК ферритовых развязывающих приборов** разрабатывает и выпускает развязывающие приборы ЭКБ СВЧ электроники В дополнение к традиционно выпускаемым волноводным, коаксиальным, полосковым и микрополосковым приборам, предприятие в рамках ОКР «Фора» разработало и освоило производство ряда бескорпусных миниатюрных вентилях и циркуляторов для диапазона частот от 2,15 ГГц до 19,5 ГГц. Разработанные приборы являются аналогами фирмы RENAISSANCE ELECTRONICS CORP., USA; имеют прямые потери – не более  $(0.5-0.7)$  дБ, обратные потери (развязки) – не менее  $(18 \div 20)$  дБ; входная средняя мощность составляет 2 Вт при массе приборов в пределах  $0.5 \div 6.5 \text{ г}$ .

В рамках ОКР «Диполь» разработан и освоен в производстве ряд миниатюрных X-(Y-) циркуляторов и вентилях среднего и высокого уровня мощности (ВУМ) для ППМ современных АФАР. Разработанные приборы по техническому уровню соответствуют лучшим зарубежным аналогам данного назначения (RADITEK INC., USA и M2 GLOBAL TECHNOLOGY LTD., USA). Основные параметры: рабочий диапазон  $(0.7 \div 8.2)$  ГГц, прямые потери – не более  $(0.4 \div 0.6)$  дБ, обратные потери (развязки) – не менее 20 дБ. Для разработанных полосковых приборов ВУМ рабочая импульсная мощность не превышает значений  $(2.0 \div 3.0)$  кВт при скважности не более 50. Для микрополосковых приборов входная средняя мощность не превышает 30 Вт. Разработанные приборы позволили заменить волноводные и коаксиальные компоненты ППМ в ряде модернизируемых и разрабатываемых РЛС.

#### Библиографический список

1. Каталог «СВЧ магнитные и диэлектрические материалы», ОАО «Завод Магнетон», СПб, 2012г. 16 с.
2. Каталог «Магнитомягкие материалы», ОАО «Завод Магнетон», СПб, 2012г. 96 с.
3. Каталог «СВЧ приборы и элементы», ОАО «Завод Магнетон», СПб, 2012г. 48 с.