

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Семенова Алексея Сергеевича «Микрополосковые ферритовые развязывающие приборы миллиметрового диапазона длин волн с улучшенными характеристиками», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертационная работа Семенова Алексея Сергеевича лежит в области динамично развивающейся темы твердотельной СВЧ-электроники и посвящена созданию миниатюрных ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн с улучшенным комплексом электрических и эксплуатационных параметров. Бесспорной является актуальность разработки таких приборов для техники СВЧ, поскольку эта деятельность напрямую связана с укреплением национальной безопасности Российской Федерации, особенно в условиях вызовов и угроз, имеющих место в современном мире. И прежде всего необходимой предпосылкой для успешного выполнения указанных задач является восстановление утраченных позиций, развития стратегических отраслей, обеспечивающих радиоэлектронную промышленность изделиями отечественной компонентной базы СВЧ диапазона, с параметрами, сравнимыми с мировыми аналогами. Решению этой проблемы способствуют и работы, проводимые диссидентом в рамках своего исследования.

В своей диссертации основное внимание автор уделяет оптимизации сквозного цикла создания микрополосковых ферритовых развязывающих СВЧ-приборов. При этом важно, что здесь речь идет не только об инженерных расчетах и компьютерном моделировании процессов, протекающих в материалах и приборах, создаваемых на их основе, но и о решении конкретных конструктивно-технологических задач, возникающих при разработке и изготовлении микрополосковых вентилей и циркуляторов в реальном производстве.

В результате благодаря предложенному автором алгоритму проектирования с использованием современных расчётных и экспериментальных методик удалось создать такие важные ферритовые устройства, как вентиль и Y-циркулятор с комплексом параметров, превосходящим отечественные и зарубежные аналоги, и, что особенно хотелось бы подчеркнуть, – осущес-

ствовать внедрение этих приборов в АО НПП «Исток» им. Шокина.

Не секрет, что, к сожалению, в нынешних условиях ощущается нехватка крайне необходимого для проведения разработок отечественного измерительного оборудования, а возможности использования зарубежных приборов ограничено как их дороговизной, так и санкционной политикой западных стран. Поэтому для достижения поставленной цели, Алексеем Сергеевичем были созданы методики и стенды, позволяющие проводить точные измерения электромагнитных параметров ферритовых материалов, на основе которых затем были разработаны и изготовлены микрополосковые ферритовые вентиль и У-циркулятор Ка диапазона частот. Кроме того, автором была проведена оценка возможности разработки микрополосковых ферритовых развязывающих приборов без магнитной системы на подложках из ферритов с гексагональной кристаллической структурой.

Диссертационная работа А.С. Семенова состоит из введения, четырех глав, раскрывающих суть работы, раздела, обобщающего в ёмкой форме основные результаты и выводы диссертации, и списка использованной литературы, состоящего из 80 наименований. Работа написана грамотным научным языком и аккуратно оформлена. Использование в тексте большого количества красочных иллюстраций и таблиц облегчает восприятие изложенного материала и повышает его информативность. Это позволило в полной мере изложить полученные Алексеем Сергеевичем результаты, которые представляют очевидный интерес для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры и специалистов в области твердотельной электроники.

Автором проведён анализ состояния дел в области твердотельной электроники, включающий обзор предшествующих или близких по тематике научных исследований, посвященных ферритам и ферритовым СВЧ-приборам, показано место диссертационной работы в ряду подобных разработок, чётко сформулированы выводы к отдельным главам, выделены основные результаты и выводы, которые изложены им в заключительном разделе.

Среди наиболее значимых **новых результатов**, полученных в работе, хотелось бы выделить следующие:

1. С помощью экспериментально полученных параметров ферритов и с использованием аналитических расчётов и параметрического 3D моделирования разработан алгоритм проектирования, позволяющий повысить точность расчёта конструкций микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн.

2. На основе полученной частотной зависимости модуля коэффициента отражения R плоской электромагнитной волны от плоскопараллельного слоя магнитодиэлектрика при её нормальном падении, с использованием современного измерительного оборудования разработан стенд для измерения эффективной диэлектрической проницаемости и тангенса угла суммарных потерь магнитодиэлектриков в мм-диапазоне длин волн, превосходящий по своей точности аналогичные стенды и аттестованный во ВНИИФТРИ.

3. Предложена новая методика оценки эффективного поля анизотропии и ширины полосы ферромагнитного резонанса ферритовых образцов с гексагональной кристаллической структурой в диапазоне частот от 25 до 67 ГГц, позволяющая с хорошей точностью измерять их электромагнитные параметры.

4. Созданы параметрические модели микрополосковых ферритовых вентиля и Y-циркулятора миллиметрового диапазона длин волн, позволяющие моделировать поведение их электрических характеристик в зависимости от частоты, свойств материала и размеров подложки.

5. Проведён комплекс исследований ферритов с гексагональной кристаллической структурой и проведена оценка возможности создания микрополосковых ферритовых приборов миллиметрового диапазона длин волн работающих без магнитной системы, что особенно актуально для современной твердотельной СВЧ электроники.

Разработанный автором алгоритм проектирования и предложенные методики являются вполне разумными и основаны на общепризнанных представлениях. Несомненными являются также **достоверность и новизна** полученных Алексеем Сергеевичем Семеновым научных выводов, что подтверждается хорошим соответствием теоретических расчётов и результатов моделирования с экспериментальными данными.

Ценность для науки и техники выполненных в работе исследований состоит в существенном улучшении основных характеристик (таких как увеличение рабочей полосы частот, снижение прямых потерь) микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона длин волн по сравнению с существующими аналогами и в повышении эффективности их производства.

Хотелось бы также подчеркнуть вклад диссертанта в оптимизацию технологических процессов, используемых при изготовлении приборов. Заслугой автора являются предложенные им конструктивно-технологические решения при выполнении ряда операций.

Практическая значимость и достоинство работы доказываются тем, что

разработанные автором алгоритм проектирования, измерительные стенды и технология изготовления миниатюрных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона позволили осуществить внедрение и организовать производство ферритовых микрополосковых вентилей и Y-циркуляторов с улучшенными электрическими и массогабаритными характеристиками в АО НПП «Исток» им. Шокина.

Основные результаты диссертации представлены в 11 публикациях, из которых 5 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК, и 2 статьи в научных изданиях, входящих в международную базу данных Scopus. Работа прошла апробацию на 5 региональных, 2 всероссийских и одной международной научно-технических конференциях по данной тематике. Автореферат в полной мере отражает основные научные результаты, полученные в диссертации.

По работе имеются следующие замечания:

1. В процессе разработки стенда для измерения зависимости эффективного поля магнитной анизотропии и ширины линии ферромагнитного резонанса гексаферритов различного типа и при исследовании зависимости этих параметров от температуры автором проводились измерения раздельно в двух температурных диапазонах: при условии пониженной и повышенной температуры (гл.2, с.54-59). Если проанализировать полученные кривые, то можно выявить следующую закономерность: монотонное изменение этих параметров до температур $-40\ldots-60$ °C, затем участок их стабилизации вплоть до $40\ldots50$ °C, и дальнейший монотонный рост (снижение) за пределами этого диапазона. Далее этот феномен никак не комментируется. Между тем, обсуждение такого поведения могло бы быть полезным для разработчиков новых ферритовых материалов с целью повышения термостабильности работы устройств.

2. На представленных здесь же кривых зависимости от температуры эффективного поля анизотропии и ширины линии ФМР для гексаферрита ГБ-9 (рис. 2.12 и 2.13) явно прослеживается скачок в диапазоне $60\text{--}65$ °C. Неплохо было бы выяснить, чем он вызван – случайным выбросом при измерениях или же имеет более фундаментальную природу. В связи с этим возникает закономерный вопрос о воспроизводимости результатов при повторных измерениях на этих же образцах. Разрешить проблему помогло бы указание погрешности измерений указанных характеристик в этой области температур.

3. Весьма ценно, что в разделах 2.1-2.3, посвященных методикам измерения параметров материалов с помощью разрабатываемых стендов, скрупулезно приводятся относительные погрешности измерений. Но почему-то в разделе

2.5 той же главы при указании уровня удельных потерь в микрополосковых линиях на подложках из ферритовых материалов для развязывающих приборов мм-диапазона оценка точности не приводится.

4. В выводах к этому разделу указывается, что с увеличением частоты в гексаферритах стронция и бария исследованных марок растут потери из-за естественного ферромагнитного резонанса, находящегося для этих ферритов в диапазоне частот от 45 до 56 ГГц. Было бы неплохо учесть это при формулировании требований к гексаферритовым подложкам, необходимым для изготовления развязывающих приборов мм-диапазона длин волн, например, путем рекомендации для применения иных марок гексаферритов или иных ферритсодержащих составов, обладающих характеристиками на уровне устройств на основе ферритов со структурой шпинели и граната.

5. При разработке технологии для научно-обоснованного выбора температуры нагрева ферритовых подложек в процессе напыления проводящих и резистивных слоёв целесообразно было бы провести масс-спектральный анализ компонентов, выделяющихся из подложки при нагреве в вакууме в диапазоне температур. Это позволило бы уменьшить температурные интервалы исследования процессов напыления резистивных и проводящих плёнок на ферритовые подложки из никель-цинковой шпинели.

6. При выборе материала магнитной системы разрабатываемых приборов было бы неплохо опробовать магниты не только из сплава КС-25 4 группы ($B_r \approx 1,0$ Тл), но и из системы NdFeB, обладающие большей величиной остаточной намагниченности ($B_r \approx 1,1$ Тл), что позволило бы в большей степени уменьшить габариты приборов.

7. Хотя в целом нареканий к оформлению материалов, представленных к защите, пунктуации и правописанию нет, изредка все же попадаются незамеченные опечатки, например, с. 58 (согласно методики..., формулям), с. 121 (герметичную), с.133 (приемлимыми).

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают высокой оценки диссертационной работы. Рассмотренная диссертация является законченным научным исследованием и вносит значительный вклад в развитие направления, связанного с разработкой отечественной компонентной базы СВЧ диапазона. Автореферат полностью отражает основные положения и выводы работы, выполненной на высоком научно-техническом уровне. Структура результатов, полученных при выполнении расчётов и экспериментов по созданию миниатюрных микрополосковых ферритовых развязывающих приборов миллиметрового диапазона с улучшенными характеристиками,

позволяет заключить, что данная диссертация имеет **существенное научно-техническое значение** и соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор – Семенов Алексей Сергеевич – заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Официальный оппонент: доцент кафедры технологии материалов электроники Института новых материалов и нанотехнологий Национального исследовательского технологического университета Московского института стали и сплавов, кандидат физико-математических наук.

Адрес: 119049, Москва, проспект Ленинский, 4 стр.1
 Телефон: Офис: +7 495 955-00-32
 Моб.: +7 (915)187-71-13, +7(916)954-98-46
 e-mail: dratm@mail.ru

Морченко
 Александр
 Тимофеевич



Подпись к.ф.-м.н., доцента Морченко А.Т.
 удостоверяю:

ПОДПИСЬ  ЗАВЕРЯЮ
 Проректор по безопасности
 и общим вопросам

НИТУ "МИССИОН" ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

И.М. Исаев

