

## ОТЗЫВ

### официального оппонента на диссертацию

**Налогина Алексея Григорьевича «Улучшение параметров подложек на основе поликристаллических феррогранатов для невзаимных микрополосковых устройств СВЧ-электроники», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01-«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»**

Требования экономической независимости и национальной безопасности России приводят к необходимости развития отечественной СВЧ ЭКБ, сравнимой по параметрам с серийными мировыми аналогами. Этого можно достигнуть, используя возможности новых технологий.

Широкое применение в качестве подложек для микрополосковых невзаимных устройств СВЧ-электроники нашли поликристаллические иттриевые феррогранаты разных составов. Ферритовые материалы вносят свои особенности в создание невзаимных развязывающих приборов, определяя в них предельно достижимые параметры и характеристики приборов. В связи с необходимостью значительного снижения массогабаритных характеристик и энергоёмкости СВЧ приборов значительное распространение получили микрополосковые ферритовые устройства – вентили и циркуляторы. В целом работоспособность и качество таких устройств определяется физическими (плотность, пористость и др.) и электромагнитными (диэлектрическая проницаемость, намагниченность насыщения, тангенсы магнитных и диэлектрических потерь и др.) свойствами. На основе комплексных исследований с использованием технологических и физических методов, а также математического моделирования в диссертационной работе решена поставленная проблема по получению в регулируемой кислородной среде поликристаллических подложек из феррогранатов для микрополосковых приборов СВЧ-электроники со значениями характеристик (плотность, пористость, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла магнитных потерь и тангенс угла диэлектрических потерь) на уровне и выше лучших отечественных и мировых аналогов.

Диссертационная работа Налогина А.Г., несомненно, актуальна, т.к. направлена на развитие СВЧ ЭКБ, а именно: решение проблем производства микрополосковых ферритовых приборов с улучшенными

характеристиками на основе подложек с кристаллической структурой граната.

Диссертационная работа имеет общий объем 180 страниц, состоит из введения, пяти глав, раздела «Основные результаты и выводы» и списка использованной литературы из 189 наименований, содержит 55 рисунков и 37 таблиц.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и раздела, где приведены основные результаты и выводы.

Во введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы основная цель и задачи, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту, представлена апробация работы.

Первая глава представляет литературный обзор, непосредственно связанный с тематикой диссертации. В литературном обзоре рассмотрены особенности кристаллической и магнитной структуры феррогранатов для подложек устройств СВЧ-электроники, а также определены требования к подложкам для микрополосковых устройств.

Вторая глава содержит информацию об объектах исследования, особенностях их приготовления, обработки и измерения их основных электромагнитных параметров. Во второй главе описана методика получения подложек из феррогранатов с высоким уровнем эксплуатационных параметров для применения в микрополосковых приборах СВЧ с использованием процесса спекания в регулируемой кислородной атмосфере и её техническая реализация. Описаны экспериментальные методы исследования электромагнитных свойств подложек из поликристаллических феррогранатов, а также дана характеристика использованного в работе контрольно-измерительного оборудования.

Третья глава посвящена особенностям технологии получения поликристаллических иттрий-галлиевых феррогранатов с намагниченностью насыщения 140; 96; 64 кА/м для подложек микрополосковых устройств СВЧ-электроники спеканием в регулируемой кислородной атмосфере. С использованием методов математического планирования эксперимента исследовано влияние параметров технологического процесса, основных компонентов в составе феррогранатов на эксплуатационные характеристики поликристаллических подложек. Приведены аналитические модели, отражающие зависимость физических свойств ферритовых подложек от параметров технологического процесса. Решение оптимизационной задачи позволило улучшить эксплуатационные параметры подложек из

феррогранатов путем выбора соответствующего соотношения компонентов и режима обжига.

В четвертой главе приведены результаты исследований и разработка технологии получения в регулируемой кислородной атмосфере поликристаллических гранатов иттрий-галлиевой системы и иттрий-гадолиний-кальций-ванадий-индиевой системы пониженной намагниченности с улучшенными эксплуатационными характеристиками для подложек микрополосковых приборов СВЧ-электроники. Дан анализ процессов спекания феррогранатов в регулируемой кислородной атмосфере с участием жидкой фазы.

В пятой главе приводятся сравнительные характеристики подложек, изготовленных по предложенным в диссертации технологиям (ТУ ТСО. 737.022), с отечественными марками ферритов (ТУ ТСО.737.016, 10СЧ6Б, ПЯ0707345 и зарубежных фирм производителей («The Harckaw chemical Company» (США), «Tomson-CSF» (Thales Group (Франция))). Приведены параметры микрополосковых вентилях и циркуляторов изготовленных на подложках с использованием разработанных технологий. Эксплуатационные характеристики разработанных подложек и микрополосковых устройств, изготовленных на них, находятся на уровне, а по отдельным параметрам выше лучших отечественных и мировых аналогов.

В заключительном разделе кратко приведены результаты работы и сформулированы выводы. Определены области практического применения результатов.

Научная новизна полученных в работе результатов и выводов подтверждается анализом литературы и отражена в публикациях автора. Полученные в диссертации результаты являются не только новыми и значительно углубляющими существующие представления о свойствах и структуре феррогранатов, но и дают качественно новое понимание механизмов формирования важных для практики свойств феррита путем управления составом, режимами и газовыми средами при спекании.

Практическое значение работы определяется тем, что налажено производство различных микрополосковых устройств СВЧ (вентили, циркуляторы) на подложках из феррогранатов, изготовленных с использованием внедренных двухэтапных технологий по комплексу параметров превышающих лучшие зарубежные и отечественные аналоги и поставляемых в РЛС важнейших радиоэлектронных систем Министерства обороны и в системы связи гражданской продукции.

Исходя из вышесказанного следует, что общая методология и методика исследования соответствует современному уровню развития науки и техники, используемые подходы к решению поставленных задач научно обоснованы. Сформулированные научные положения, выводы и рекомендации в достаточной мере обоснованы. Достоверность подтверждается результатами исследований с применением широкого спектра научно-исследовательского оборудования и методик.

Оценивая работу Налогина А.Г. в целом, следует отметить ее высокий научный уровень, важность полученных практических результатов, непосредственную связь предмета исследования с задачами современных материаловедения и техники.

По диссертационной работе и тексту автореферата диссертации следует высказать следующие критические замечания:

1. Отсутствие достаточного количества современных публикаций в период после 2000 года снижает качество литературного обзора диссертационной работы;
2. В главе 3 отсутствует информация о применении связующих составляющих, связанных с химическим составом и физико-химическим состоянием шихты и существенно влияющих на свойства феррограната;
3. Измерение электро-магнитных параметров подложек проведены в очень узком диапазоне частот 9,8-10,1 ГГц, что снижает эффективность применения разработанных устройств СВЧ-техники;
4. В диссертации не приведены значения внутренних механических напряжений, в заготовках для подложек МП устройств СВЧ-электроники методом спекания в регулируемой кислородной атмосфере;
5. В диссертационной работе отсутствуют исследования пористости и трещин, возникающих при прессовании феррогранатовых заготовок. Данные исследования влияют на эксплуатационные характеристики микрополосковых ферритовых приборов (циркуляторов и вентилялей).

Отмеченные недостатки не касаются основных результатов и выводов, не затрагивают принципиального существа диссертации и не снижают высокую оценку проведенного исследования. Указанные замечания не снижают ценности работы. В целом работа выполнена на высоком научном и профессиональном уровне. Основное содержание диссертации, выводы и рекомендации достаточно полно отражены в 19 печатных работах: из них - 6




статей в рецензируемых периодических научных изданиях, включенных в перечень ВАК, в 3-х авторских свидетельствах СССР и 3-х патентах РФ.

Материалы диссертации широко докладывались и обсуждались на различных международных и всероссийских научных конференциях, хорошо известны широкому кругу исследователей. Автореферат соответствует содержанию диссертации, а публикации автора достаточно полно ее представляют. Диссертация хорошо апробирована.

Автореферат полностью отражает содержание, основные результаты и выводы диссертационной работы.

Представленная диссертация является законченной научно-исследовательской работой и отражает существенный вклад соискателя научной степени в развитие компонентной базы отечественной твердотельной СВЧ-электроники и расширение объемов промышленного производства микрополосковых невзаимных устройств, решает проблему импортозамещения и повышает обороноспособность страны.

На основании изложенного считаю, что диссертация «Улучшение параметров подложек на основе поликристаллических феррогранатов для невзаимных микрополосковых устройств СВЧ-электроники» соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым кандидатским диссертациям, а её автор, Налогин Алексей Григорьевич, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01-«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Официальный оппонент,  
профессор кафедры конструирования электронных средств ИНЭП ЮФУ,  
член-корреспондент РАЕН,  
доктор технических наук, профессор  Малюков Сергей Павлович

Южный федеральный университет,  
Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения  
347928, г. Таганрог Ростовской обл,  
ул. Шевченко, 2, корп. «Е»  
Телефон: +7(8634) 371-603  
E-mail: [spmalyukov@sfnedu.ru](mailto:spmalyukov@sfnedu.ru)

Подпись Малюкова С.П. удостоверяю  
Директор ИНЭП ЮФУ



Федотов А.А.