Попов Максим Олександрович, асистент кафедри квантової радіофізики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Назва дисертації: &laquo;Взаємодія електричної та магнітної підсистем у феритах і композитних структурах на їх основі&raquo;. Шифр та назва спеціальності 01.04.03 радіофізика. Спецрада Д26.001.31 Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

Попов Максим Олександрович

УДК 537.6/.8, 537.86/.87, 537.611.3, 537.622.6, 537.635, 538.935

ДИСЕРТАЦІЯ

ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТА МАГНІТНОЇ ПІДСИСТЕМ У ФЕРИТАХ І

КОМПОЗИТНИХ СТРУКТУРАХ НА ЇХ ОСНОВІ

01.04.03 – радіофізика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів

і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

М. О. Попов

Науковий консультант Зависляк Ігор Володимирович,

доктор фізико-математичних наук, професор

Київ – 2020

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень 27

Вступ 28

Розділ 1. Огляд літератури 41

1.1 Магнітодинамічні коливання у ферит-діелектричних резонаторах 41

1.1.1 Використання ферит-діелектричних резонаторів у техніці НВЧ 41

1.1.2 Теорія магнітодинамічних коливань у гіротропних циліндричних

резонаторах 44

1.2 Мультифероїки та магнітоелектричні ефекти 50

1.2.1 Феноменологічна теорія магнітоелектричних ефектів в однофазних

мультифероїках 51

1.2.2 Магнітоелектричні ефекти у багатокомпонентних композитних

структурах з механічним зв’язком між компонентами 56

1.2.3 Магнітоелектричний ефект у двошарових ферит-п’єзоелектричних

структурах з механічним зв’язком 60

1.2.4 Магнітоелектричні ефекти в однофазних гексаферитах та

композитних структурах на їх основі 64

1.3 Висновки до розділу 67

Розділ 2 Ефекти розщеплення та розштовхування мод в однорідних феритових

резонаторах циліндричної симетрії 70

2.1 Теоретичні основи ефектів розщеплення та розштовхування мод 70

2.1.1 Частоти гіротропного резонатора у прямокутному металевому

хвилеводі за відсутності підмагнічуючого поля 71

2.1.2 Визначення поздовжнього хвильового числа для циліндричного

гіротропного резонатора 74

2.1.3 Тензори магнітної проникності досліджених матеріалів 76

2.1.4 Еквівалентна схема для опису зв’язаних коливань гіромагнітного

резонатора 77

23

2.2 Експериментальні дослідження розщеплення частот власних мод у

магнітному полі у циліндричних резонаторах із гранатів у міліметровому

діапазоні частот 81

2.2.1 Власні частоти МДР. Експеримент 81

2.2.2 Власні частоти МДР. Обговорення 86

2.2.3 Дослідження фазочастотних характеристик МДР 88

2.3 Розщеплення частот власних мод у магнітному полі у циліндричних

резонаторах з гексаферитів 97

2.3.1 Методика вимірювання магнітних та діелектричних параметрів

монокристалічних та заміщених гексаферитів 97

2.3.2 Експериментальні дослідження розщеплення частот власних мод у

резонаторах із гексаферитів у міліметровому діапазоні частот 99

2.3.3 Розщеплення частот власних мод у циліндричних резонаторах з

гексаферитів у дорезонансній області 106

2.4 Висновки до розділу 111

Розділ 3 Пасивні феритові компоненти пристроїв мікрохвильового діапазону на

основі ефектів розщеплення мод 114

3.1 Керовані магнітним полем резонансні фазообертачі міліметрового діапазону

довжин хвиль на основі ефектів розщеплення мод 117

3.1.1 Резонансний фазообертач в області частот вище ФМР 117

3.1.2 Резонансний фазообертач в області частот нижче ФМР з

використанням ефекту частотно-польової бістабільності 123

3.1.2.1 Гістерезис частотно-польової залежності 126

3.1.2.2 Порівняння фазового зсуву з теоретичною моделлю 129

3.1.2.3 Невзаємна фазочастотна бістабільність 134

3.2 Керований магнітним полем резонансний вентиль міліметрового діапазону

довжин хвиль на основі ефекту розщеплення мод 134

3.3 Керований магнітним полем смугопропускаючий фільтр діапазонів К та Ка

на основі ефектів розщеплення мод у нікелевому фериті 139

3.3.1 Дослідження властивостей МДР з нікелевого фериту 139

24

3.3.2 Конструкція прототипу смугопропускаючого фільтра 143

3.3.3 Обговорення експериментальних результатів 149

3.4 Висновки до розділу 153

Розділ 4 Зв’язані коливання у ферит-діелектричних гетероструктурах 157

4.1 Гібридні електромагнітно-спінові коливання у зв’язаних діелектричному та

феритовому резонаторах 158

4.1.1 Експериментальні результати 159

4.1.2 Теоретична модель зв’язаних коливань 162

4.1.3 Добротність зв’язаних коливань 164

4.2 Теорія збурень для зв’язаних електромагнітно-спінових коливань у

композитних структурах «діелектричний резонатор-феритова плівка» 167

4.2.1 Випадок слабкого феромагнетика 170

4.2.2 Випадок феро- чи феримагнітного матеріалу 172

4.3 Експериментальна перевірка теоретичних результатів для структур

«діелектрик-ферит» та «діелектрик-слабкий феромагнетик» 175

4.3.1 Композитна структура «діелектрик – слабкий феромагнетик» 175

4.3.1.1 Визначення магнітних параметрів FeBO3 177

4.3.1.2 Експериментальні дослідження гібридних коливань у

композитному резонаторі 180

4.3.2 Композитна структура «діелектрик – феримагнетик» 187

4.3.2.1 Технологія виготовлення композитних резонаторів 188

4.3.2.2 Експериментальні дослідження гібридних коливань у

композитному резонаторі з нікелевим феритом 190

4.3.2.3 Експериментальні дослідження гібридних коливань у

композитному резонаторі з гексаферитом барію 196

4.4 Висновки до розділу 199

Розділ 5 Композитні ферит-п’єзоелектричні структури з подвійним керуванням

електричним та магнітним полями 202

5.1 Електричне перестроювання характеристик композитних НВЧ резонаторів

«п’єзоелектрик–феритова плівка» 202

25

5.1.1 Феноменологічна теорія індукованої механічними деформаціями

магнітної анізотропії у феритах з кубічною симетрією 202

5.1.2 Експериментальні дослідження електричного перестроювання частоти

у композитних резонаторах на основі феритових плівок 211

5.1.3 Електричне керування добротністю композитного феритп’єзоелектричного резонатора 219

5.2 Індукована електричним полем перебудова доменної структури у плівці

залізо-ітрієвого гранату, механічно зв’язаній з шаром ЦТС 223

5.2.1 Теоретичні основи ефекту керування намагніченістю магнітних

доменів електричним полем 225

5.2.2 Результати експериментальних досліджень та їх обговорення 230

5.3 Експериментальні дослідження керування електричним полем частотою

феромагнітного резонансу у композитних структурах «п’єзоелектрик–феритова

плівка» у багатодоменному стані 235

5.4 Висновки до розділу 243

Розділ 6 Керовані електричним полем пристрої та компоненти на основі

композитних структур «ферит-п’єзоелектрик» та «ферит-сегнетоелектрик» 246

6.1 Мікросмужкові смугопропускаючі одно- та багатоланкові фільтри 246

6.1.1 Опис конструкції макету смугопропускаючого фільтра 246

6.1.2 Експериментальні результати по одноланковому фільтру 249

6.1.3 Моделювання характеристик багатоланкового фільтра 254

6.1.4 Швидкість перестроювання та енергоспоживання композитного

резонатора 259

6.2 Керований електричним полем дволанковий смугозагороджуючий фільтр з

незалежним керуванням центральної частотою та смугою загородження 261

6.2.1 Конструкція прототипу смугозагороджуючого фільтра 262

6.2.2 Результати експериментів та їх обговорення 264

6.3 Високоефективні твердотільні магнітоелектричні гіратори 269

6.3.1 Вступ та методика експерименту 269

6.3.2 Експериментальні вимірювання коефіцієнта корисної дії 247

26

6.4 Магнітоелектрична взаємодія у композитних наноструктурах

«феромагнетик-сегнетоелектрик» 278

6.4.1 Магнітоелектричні композити з коаксіальних нановолокон 279

6.4.2 Магнітоелектричні агломерати зі сферичних наночастинок,

виготовлені методом самоорганізації 281

6.5 Висновки до розділу 285

Розділ 7 Індуковані електричним струмом нелінійні магнітоелектричні ефекти у

магнітовпорядкованих матеріалах 288

7.1 Феноменологічна теорія нелінійного магнітоелектричного ефекту у

гексаферитах М- та Y-типів 288

7.2 Мікроскопічна модель індукованих електричним струмом ефектів у

гексаферитах М-типу 295

7.3 Експериментальні дослідження струмового нелінійного

магнітоелектричного ефекту у гексаферитах М-типу при протіканні струму

вздовж осі кристалографічної симетрії та перпендикулярно до неї 302

7.3.1 Нелінійні МЕ ефекти у чистому гексафериті стронцію при протіканні

струму вздовж осі кристалографічної симетрії 302

7.3.2 Нелінійні МЕ ефекти у гексафериті барію при протіканні струму

вздовж осі кристалографічної симетрії 314

7.3.3 Нелінійні МЕ ефекти в Al-заміщених гексаферитах при протіканні

струму вздовж осі кристалографічної симетрії 319

7.3.4 Нелінійні МЕ ефекти у чистому гексафериті стронцію при протіканні

струму перпендикулярно до осі кристалографічної симетрії 325

7.4 Експериментальні дослідження струмового нелінійного

магнітоелектричного ефекту у гексаферитах Y-типу 330

7.5 Висновки до розділу 339

Висновки 342

Список використаних джерел 347

Додаток А 389

ВИСНОВКИ

Удисертаціївирішеноважливунауковутаприкладнупроблемупошукуновихі

поглибленогоаналізувідомихефектіввзаємодіїелектричноїтамагнітноїпідсистем

уферитахтакомпозитнихструктурахнаїхосновізакімнатноїтемператури

вивченовпливзовнішніхелектричноготамагнітногополівнаціструктурита

обґрунтованоможливістьпобудовинаїхосновірізноманітнихкерованихпристроїв

аналоговоїобробкисигналівмікрохвильовогодіапазону

Проблемадослідженняефектурозщепленнямагнітнимполеммод

резонаторівізферитівякийєнаслідкомвзаємодіїелектричноїтамагнітної

підсистемумагнітнихдіелектрикахвирішенаіззастосуваннямєдиного

концептуальногопідходуЕкспериментальнознайденощозавдякимагнітній

підсистемімаємісцеперестроюваннячастотвласнихмагнітодинамічнихмод

зовнішніммагнітнимполемнавеличинувідГГцдляферитгранатових

резонаторівдоГГцдлягексаферитовихрезонаторівзацентральноїчастоти

ГГцтапомірнихзначенькеруючогомагнітногополяВстановленощо

найбільшерозщепленнямаємісцедляосновнихазимутальнонеодноріднихмод

зменшуючисьпризбільшенніномерамодиВходіекспериментівуперше

експериментальновиявленогістерезисчастотнопольовоїзалежності

магнітодинамічнихмодякийєвідображеннямбістабільностістанумагнітної

підсистемигексаферитуколиприодномуітомужзначенніполяпідмагнічування

гексаферитможеперебуватиабоводнодоменномуабовненасиченомустані

Розвинутанаближенааналітичнатеоріяаксіальнонеодноріднихмоддискового

феритовогорезонатораякавраховуєспецифічнівластивостіанізотропних

магнітнихматеріалівтакількісноописуєспостережуваніявищаяквдорезонансній

таківзарезонанснійобластях

Продемонстрованаможливістьзастосуванняефектурозщепленнямод

феритовихрезонаторівукерованихмагнітнимполемприладахміліметрового

діапазонузперспективоюйоговикористаннянасубтерагерцовихчастотах

Запропонованотаекспериментальнопротестованомакетивказанихпристроїв



зокремаоригінальніконструкціїфазообертачіввдіапазонівіддоГГцде

центральнічастотирезонаторіввизначалисявпершучергуквазідіелектричними

резонансамиякімалимісцеібезпідмагнічуючогополящоєсуттєвоюперевагою

такихконструкційВстановленощо

резонанснийвентильзгексаферитубаріючастотаякогоперестроюєтьсяв

діапазоніГГцдемонструєрівеньрозв’язкинегіршеніждБ

резонанснийфазообертачзробочоючастотоюГГцздійснюєкеровану

перестройкуфазина°привнесенихвтратахумежахдБ

дискретнийфазообертаччастотногодіапазонуГГцнаосновіявища

гістерезисучастотнопольовоїзалежностімагнітодинамічнихмодреалізуєфазові

зсувизфакторомякості°дБ

КрімтогосмугопропускаючіфільтриізнікельцинковогоферитуКтаКадіапазонівзабезпечуютьперестройкучастотинаГГцпривнесенихвтратах

дБтаздатніпрацюватипривхіднихпотужностяхдоякмінімуммВтщоє

принциповоюперевагоюпорівнянозтрадиційнимиферитовимиприладами

Врезультатіекспериментальноготатеоретичноговивченняефекту

гібридизаціїелектромагнітнихтаспіновихколиваньуструктурахдіелектричний

резонаторферитовийрезонаторпоказанощохідчастотнопольовихзалежностей

длягібриднихмодповністювідповідаємоделізв’язанихколиваньЗнайденощо

зв’язокміжелектромагнітнимитаспіновимирезонансамивструктурахдіелектрикферитдаєможливістькеруватирелаксаційнимивластивостямигібриднихколивань

зокремадобротністьквазімагнітостатичнихколиваньмагнітноїпідсистемиможе

бутипідвищеназарахунокменшихвтратудіелектричнійпідсистеміПрививченні

високочастотнихвластивостейгібридизованихколиваньукомпозитному

резонаторіщоскладаєтьсяздіелектрикатаслабкогоферомагнетика

продемонстрованаможливістькеруваннявластивостямитакихрезонаторіву

сантиметровомудіапазоніаномальнонизькимимагнітнимиполями

Експериментальнореалізованокеруваннячастотоюрівнемвнесенихвтратта

добротністюгібриднихколиваньуструктурахдіелектрикферитнікелюта

діелектрикгексаферитбаріюОтриманірезультатиякіснотакількісно



відповідаютьпередбаченнямзробленимнаосновітеоріїзбуреньзурахуванням

особливостейтензорівмагнітноїсприйнятливостівідповідних

магнітовпорядкованихматеріалів

Запропонованофеноменологічнутеоріюмеханізмувпливумеханічної

деформаціїнаспінорбітальнувзаємодіюуферитахкубічноїсиметріїПоказанощо

угетероструктуріанізотропнийферитп’єзоелектрикіндукованадеформацією

п’єзоелектрикаелектричноїпідсистемимагнітнаанізотропіяуферитовихшарахз

орієнтацієютаможебутипредставленаврамкахтрипараметричної

моделізнайденівиразидлявідповіднихвнесківуконстантианізотропіїДоведено

щодомінуючимєвнесокдеформаціїводновіснуанізотропіюпершогопорядкущо

відповідаєквадратичнійчастиніспінорбітальноїенергіїПоказанощо

експериментальнірезультатипокеруваннючастотамимагнітостатичнихрезонансів

утакійструктуріелектричнимполемпояснюютьсянаосновііснуючоїтеорії

магнітостатичнихколиваньванізотропномуферитіуприпущенніщостворена

п’єзоелектрикоммеханічнанапругавпливаєлишенаполеодновісноїанізотропії

першогопорядкуазміноюіншихполіванізотропіїможназнехтуватиТакий

механізмкеруванняхарактеризуєтьсянадзвичайнонизькимиенерговитратами

порівнянозвідомимиутрадиційнійспінтроніці

Упершеоптичнимитарадіоспектроскопічнимиметодамидосліджено

статичнітадинамічнівластивостіненасиченогостануферитовоїплівкизалізоітрієвогогранатумеханічнозв’язаноїзп’єзоелектричнимшаромцирконатутитанатусвинцюТеоретичнообґрунтованетаекспериментальнореалізоване

керуваннядоменноюструктуроюферитовихплівокелектричнимполемукомпозиті

феритпєзоелектрикЗнайденощоприкладанняелектричноїнапругидо

п’єзоелектрикавикликаєзапевногопороговогозначенняперебудовудоменної

структуримагнітноїпідсистемифазовийперехідпершогородуяка

супроводжуєтьсяпереорієнтацієюмагнітнихмоментівдоменіввіднапрямків

нормальнихдоплощиниплівкидопохилихПредставленааналітичнатеорія

пояснюєспостережуванийстрибокнамагніченостіТеоретичнаоцінканапругиза

якоївідбуваєтьсяперехідміждвомамагнітнимстанамиузгоджуєтьсяз



експериментальновимірянимзначеннямПоказанаможливістьвикористаннятакого

композитудлямодуляціїоптичноговипромінюваннядифрагованогонадоменній

структурістанякоїперемикаєтьсяміждвомафазамизмінноюелектричною

напругоюзвуковоїчастотиОкрімцьогознайденощомеханічнадеформація

створенап’єзоелектричноюскладовоюструктурипризводитьдосуттєвої

перестройкичастотмагнітостатичнихколиваньнаприпочатковійчастоті

ГГцРезультатицихдослідженьможутьстатиосновоюдлястворення

новогопоколінняпристроївмагнітооптикиспінтронікитастрейнтронікищо

працюютьпрималихпідмагнічуючихполяхабоізовсімбезних

Упершезапропонованотеоретичноіекспериментальнодосліджено

оригінальніконструкціїдволанковихфільтрівнаосновікомпозитнихферитп’єзоелектричнихрезонаторівзіндивідуальнимкеруваннямамплітудночастотними

характеристикамиокремихланокзарахунокнезалежноїподачіелектричноїнапруги

навідповідніелементищозабезпечуєможливістькеруваннянетількичастотою

власнихколиваньмагнітноїпідсистемиаіформоюсмугипропусканнячи

загородженняфільтрастатичнимелектричнимполемПроведенетеоретичне

моделюваннябагатоланковихсмугопропускаючихфільтрівпоказалощоформа

смугипропусканняможерегулюватисявідкривоїзодниммаксимумомдо

двогорбоїПриекспериментальномудослідженніконструкціїдволанкового

смугозагороджуючогофільтразподвійнимкеруваннямелектричнимтамагнітним

полямипродемонстрованаможливістьсуттєвоїмодифікаціїамплітудночастотної

характеристикифільтразокремавеличинимаксимальнихвнесенихвтратна

центральнійчастотіташиринисмугирежекціїпорівнюдБДанавластивість

фільтрамаєперспективизастосовуваннявадаптивнихсистемаханалоговоїобробки

інформаційнихсигналів

Входіекспериментальнихдослідженьмагнітоелектричногоефектув

твердотільнихгіраторахнаосновітришаровихпланарнихструктурферитп’єзоелектрикферитначастотахблизькихдочастотиосновноїмоди

електромеханічногорезонансукомпозитноїструктуриотриманоККДпередачі

енергіїпонад



Упершеекспериментальновиявленітатеоретичнопоясненінелінійні

струмовімагнітоелектричніефектиуферитахзакімнатноїтемпературив

насиченомутабагатодоменномустанахДоведенощовгексаферитахМта–типів

припротіканнікрізьзразокпостійногострумупов’язаногозмеханізмомстрибкової

провідностівідбуваютьсязмінимагнітнихпараметрівнамагніченістьнасиченнята

константаанізотропіїякієлінійнопропорційнимидогустиниприкладеної

електричноїпотужностіВрезультатівиникаєпринциповоноваможливість

керуваннячастотамимагнітостатичнихрезонансівВимірянийзсувчастоти

феромагнітногорезонансускладавдоМГцдлянезаміщенихгексаферитівМтипудоМГцдлязаміщенихгексаферитівМтипуначастотахГГцідо

МГцдлягексаферитутипуначастотахГГцЗнайденощодані

ефектиувипадкупротіканняструмувбазиснійплощинієсуттєвовразів

більшиминіжприпротіканніструмувздовжгексагональноїосіщосвідчитьпроїх

яскравовираженуанізотропію

Розвинутатеоріямагнітоелектричнихефектіввферимагнетикахз

урахуваннямспонтанноїнамагніченостііспінорбітальноївзаємодіїякавраховує

взаємодіюміжелектричноютамагнітноюпідсистемамизалученнямдовільної

енергіїферомагнетикаквадратичнихпоелектричномуполюдоданківсуміснихз

кристаломагнітноюсиметрієюматеріалуірезультатиякоїякісноузгоджуютьсяз

експериментальнимиданимиДаніефективідкриваютьновішляхидокардинальної

мініатюризаціїкерованихпристроїваналоговоїобробкисигналівміліметрового

діапазонуякідотогожбудутьвідрізнятисяпониженименергоспоживанням