

## РЕЦЕНЗИЯ

Върху дисертационен труд за получаване на научната и образователна степен “Доктор”.

Автор на дисертационния труд: **Илияна Илиева Арестова**

Тема на дисертационния труд: **"Микровълнови устройства с феритни елементи за милиметрови вълни"**

Рецензент: доцент д-р **Светослав Колев**, ИЕ БАН

### **1. Актуалност на проблема.**

Представеният дисертационен труд е посветен на изследването на невзаимни (нереципрочни) свързани феритни и диелектрични огледални вълноводи.

Феритните устройства изпълняват ключова роля в повечето микровълнови системи и ще продължават да го правят, тъй като притежават уникални невзаимни (нереципрочни) и честотнозависими свойства. Микровълновите феритни устройства позволяват управлението на микровълновата мощност посредством постоянно или превключващо се магнитно поле. Те могат да бъдат взаимни (реципрочни) или невзаимни (нереципрочни), линейни или нелинейни.

Невзаимните феритни устройства продължават да бъдат незаменима част от повечето микровълнови системи за постигане на изолация между приемника и предавателя, както и навсякъде, където се иска добро съгласуване. От средата на 20 век, когато е демонстрирано първото микровълново феритно устройство, досега, са проектирани успешно многобройни феритни устройства с различно предназначение, за различни части на микровълновия спектър и различни нива на мощността. Полагат се големи усилия в посока на миниатюризация, по-широка честотна лента, по-високи честоти и поевтиняване. В ход е усвояването на милиметровия диапазон на електромагнитния спектър, интересът към който остава неизменно висок през последните няколко десетилетия. В настоящия етап милиметровите вълни са в пика на своята актуалност във връзка с петото поколение комуникационни услуги (5G), при което скорост на предаване на данни от 10 Gb/s ще бъде достигната чрез работата на базовите станции именно в милиметровия диапазон. Поради това, считам че актуалността на дисертационния труд на г-жа Илияна Арестова е неоспорима.

**2. Съдържание на дисертационния труд.** Дисертацията на г-жа Илияна Арестова е в Професионално направление: 4.1. Физически науки (Радиофизика и физическа електроника) и отразява научните постижения на дисертанта при експерименталното и теоретичното изследване на невзаимни (нереципрочни) свързани феритни и диелектрични огледални вълноводи. Дисертационният труд съдържа 137 страници, 100 фигури, 7 таблици и са цитирани 118 литературни източника в това число и 14 статии на дисертанта.

Глави първа и втора на настоящата дисертация представляват литературен обзор по темата на изследванията и описание на експерименталната постановка, която се използва за изследване на единични и свързани огледални вълноводи. Разгледани са различните измерителни структури, създадени за целите на изследването.

Тези глави обхващат 69 страници, което е 1/2 от целия обем на работата. Като цяло обзорната част е систематизирана и аналитична и смятам, че е достатъчно изчерпателна. Тя показва, че докторантът добре познава състоянието на проблемите и използва постигнати до сега резултати от други автори в работата си. Описанието и реализирането на експерименталната постановка, което се дискутира във втора глава е свързано с резонансна измерителна структура, която дава възможност за точно определяне на дължината на вълната в огледални вълноводи по метода на проходния резонатор. Тази

измерителна структура е допълнена с електрическа сонда, която може да се позиционира прецизно в три направления и дава възможност за изследване на електричното поле на стоящата вълна в реализирания отворен проходен резонатор, в частност за прецизно определяне на координатите на минимумите на стоящата вълна.

Реализирана е измерителна структура с два прехода между огледален диелектричен вълновод (ОДВ) и стандартен правоъгълен метален вълновод (СПМВ), която позволява изследване както на единични, така и на свързани огледални вълноводи. В случая на вторичен огледален феритен вълновод (ОФВ) тази измерителна структура дава възможност за реализиране на невзаимни устройства за милиметрови вълни. Тя може да се използва съвместно с два вида електрически сонди по метода на сканиране в близката зона (МСБЗ) за снемане на разпределението на трите компоненти на електричното поле в единични и свързани огледални вълноводи. Измерени са загуби от измерителната структура с два прехода равни на 1–2 dB в целия честотния диапазон от 26 до 38 GHz, които могат да се характеризират като достатъчно ниски.

Оптимизирана е геометрията на преходите ОДВ–СПМВ като е проведено числено изследване по метода на крайните елементи (МКЕ) при различни дължини на скосяването на диелектричната пръчка, като е моделирана както симетрична, така и несиметрична конфигурация. Установено е, че симетричното скосяване осигурява по-добри параметри  $S_{11}$  и  $S_{21}$  по сравнение с несиметричното при средни дължини на скосяване. Дължина на скосяването  $l = 15 \text{ mm}$  е оптимален избор за реализирането на измерителната структура с преходи.

С цел да се изучи излъчването от отворен огледален вълновод, на основата на измерителната структура с два прехода е реализирана измерителна структура с един преход СПМВ–ОДВ и отворен край на ОДВ. Проведеното експериментално и числено изследване показва, че в близката зона основна компонента на осево излъчване е компонентата  $E_z$ . Компонентата  $E_y$  е асоциирана с излъчване, което е перпендикулярно на оста на диелектричната пръчка. Следователно, процесите на излъчване в края на вторичния ОДВ следва да се вземат предвид при проектиране на устройства на основата на свързани огледални вълноводи, като се вземат мерки за поглъщане на излъчената енергия.

В трета глава са представени резултатите от изследването на изцяло диелектрични структури – единичен ОДВ и свързани еднакви и различни ОДВ. Направено е сравнение между експерименталните резултати и численото изследване по МКЕ. Дължината на вълната в ОДВ и изолиран ОДВ (ИОДВ), изработени от материали с различна диелектрична проницаемост е измерена по метода на проходния резонатор (МПР) в честотния диапазон 28–38 GHz. Максималната грешка на измерванията по МПР е оценена на 0,5%, което може да се характеризира като висока точност на измерване.

Към същите предавателни структури е приложен приближеният теоретичен метод на ефективната диелектрична проницаемост (МЕДП). Установено е, че точността на МЕДП зависи съществено от диелектричната проницаемост и честотата. При относителна диелектрична проницаемост, равна на 2, относителната грешка е по-малка от 1% в целия честотен диапазон. При по-големи диелектрични проницаемости относителната грешка расте и зависи съществено от честотата, като е по-малка при по-високи честоти.

Числено е изследван по МКЕ ОДВ от поликор. Резултатите за дължината на вълната са сравнени с измерените стойности по МПР. Сравнението показва отлично съвпадение между тях – относителната грешка е по-малка от 1% в целия честотен диапазон. Оттук е възможно да бъде направен извод за надеждността на МКЕ при изследване на структури на основата на ОДВ. В резултат на численото изследване по МКЕ са получени напречните разпределения на шестте компоненти на основния мод в ОДВ от поликор. Направен е извод за това кои са главните компоненти на основния мод. Направено е изследване на двата висши мода.

Изследвани са експериментално по МСБЗ и теоретично по МКЕ свързани огледални диелектрични вълноводи. Установено е много добро съвпадение за периода на енергиен обмен  $L$ , получен експериментално по МСБЗ и теоретично по МКЕ. Прилагането на МКЕ показва неговата висока ефективност за изследване на единични и свързани огледални структури.

Проведеното изследване показва, че въпреки техните несъвършенства, електрическите сонди могат да се използват успешно в процеса на проектиране на различни компоненти на основата на ОДВ. Съвместното използване на двата подхода – измервания с електрически сонди по МСБЗ и числено изследване по МКЕ, може да подпомогне проектирането на по-сложни устройства като невзаимни компоненти за милиметрови вълни.

Четвърта глава е свързана с изследването на единичен ОФВ. Проведено е експериментално изследване в ненамагнитено състояние и теоретично изследване по МКЕ както в ненамагнитено състояние, така и при три взаимно перпендикулярни посоки на хомогенно намагнитване.

Единичен ОФВ е изследван експериментално и теоретично в ненамагнитено състояние. Получените теоретични резултати за дължината на вълната по МКЕ съвпадат много добре с измерените по МПР, най-голямата относителна разлика между тях е 5%, което е значително по-малко по сравнение с използвания преди това приближен МЕДП.

Изучени са числено компонентите на основния мод в хомогенно намагнитен ОФВ при три взаимно перпендикулярни направления на външното магнитно поле и е получено напречното разпределение на всичките шест компоненти на основния мод. В резултат на това са направени изводи за главните компоненти на основния мод във ОФВ и доколкото той може да се разглежда като  $E_{11}^y$  мод, основният мод в ОДВ съгласно класификацията на модовете на Маркатили. Резултатите показват, че само при намагнитване, което е перпендикулярно на посоката на разпространение и успоредно на огледалната равнина, основният мод е чист  $E_{11}^y$  мод с главни компоненти  $E_y$ ,  $E_z$  и  $H_x$ . Във втория случай на намагнитване, което е перпендикулярно на посоката на разпространение и на огледалната равнина, се наблюдава нарастване на  $H_z$  и  $E_x$ . В случая на надлъжно намагнитване се оказва, че всичките три компоненти на магнитното поле са съизмерими и значителни по големина. Може да се направи изводът, че при втория и третия случай на намагнитване във ОФВ не се разпространява чист  $E_{11}^y$  мод, а следва да се взимат предвид всичките компоненти на електричното поле във втория случай и всичките компоненти на магнитното поле в третия случай.

И в трите случая на намагнитване в ОФВ отсъстват невзаимни ефекти, но при намагнитване в направление, което е перпендикулярно на огледалната равнина и на посоката на разпространение е установено асиметрично разпределение на електричното поле, по-точно на компонентата  $E_y$ . Направен изводът, че при свързване на първичен ОДВ с вторичен ОФВ при такова намагнитване, е налице невзаимно свързване между ОДВ и ОФВ, което произвежда невзаимна структура на полето в свързаната структура. Това намагнитване може да бъде използвано за конструиране на работещи невзаимни устройства за Ка-обхвата.

В пета глава са представени резултатите от експериментално изследване по МСБЗ на ОДВ, свързан с хексаферитен огледален вълновод при две различни направления на полето на анизотропия.

Получените резултати показват, че при напречно намагнитване на хексаферитния вторичен огледален вълновод структурата може да се счита за взаимна. Отбелязано е, че тези изводи се отнасят за случая на слабо намагнитване с интензитет от порядъка на стотици Ое. Не е прилагано външно магнитно поле.

Резултатите потвърждават ефективността на МСБЗ за изследване на отворени структури, в частност на свързани огледални диелектрични и феритни вълноводи.

Направено е предположение, че реализирането на невзаимен ефект в свързани ферито-диелектрични огледални структури с напречно хомогенно намагнитване изисква промяна в конфигурацията на структурата в посока на нейното усложняване. Както показва и литературната справка, въвеждането на втора ферито-диелектрична гранична повърхност може да доведе до невзаимен ефект и това би могло да се използва за проектиране на невзаимни устройства за милиметрови вълни.

В шестата заключителна глава са представени резултатите от изследването по МСБЗ на три различни по конфигурация двураменни свързани ферито-диелектрични структури при смесено намагнитване. Експерименталното изследване на невзаимни структури е допълнено с числено моделиране по МКЕ, при което са получени основните параметри на матрицата на разсейване в Ка-обхвата, които потвърждават невзаимното поведение. Направено е изследване как влияят основните параметри – геометрични, електромагнитни и материални, върху невзаимните свойства на невзаимните устройства (изолаторите).

Свързани феритни и диелектрични огледални вълноводи при смесено намагнитване са изследвани експериментално в честотния диапазон 26–38 GHz, който покрива по-голямата част от Ка-обхвата (26,5–40 GHz). Изследвани са три структури с различни конфигурации. Първата и третата структури се състоят от първичен ОДВ и вторичен ОФВ. В тези две структури е установено изразено невзаимно поведение, т.е. те представляват изолатор за милиметрови вълни. Намагнитването на феритния елемент е осъществено с един дисков постоянен магнит. В средната част на феритния елемент преобладава компонентата на постоянното магнитно поле, която е перпендикулярна на огледалната равнина, а в двата му края са налице надлъжни компоненти с противоположни посоки.

Във втората структура, която се състои от два ОДВ (входен и изходен), свързани посредством секция ОФВ, е наблюдавано поведение на ключ. При отсъствие на намагнитване загубите в нея са значителни, а с прилагане на магнитно поле намаляват многократно. Намагнитването в тази структура е осъществено чрез два дискови постоянни магнита, разположени така, че преобладаващата компонента на постоянното магнитно поле в средата на феритния елемент е надлъжна, а в двата му края – перпендикулярно на огледалната равнина.

Установен е механизма на работа на тези устройства като за целта те са изследвани експериментално по МСБЗ. Снети са разпределенията на компонентите на електричното поле в свързаната област. За структурите с невзаимно поведение тези разпределения са снети и при двете посоки на разпространение – права и обратна, като е установено невзаимно свързване между ОДВ и ОФВ. От гледна точка на компонентите на електричното поле и в трите изследвани структури най-съществено е свързването между модове с главни компоненти  $E_x$  и  $E_y$ .

Третата структура е моделирана и изследвана числено по МКЕ. Отбелязано е, че това изследване не позволява дефиниране на нехомогенно (смесено) намагнитване и затова е изследвана същата по геометрия структура, но при хомогенно намагнитване, което е перпендикулярно на посоката на разпространение и на огледалната равнина. Това хомогенно намагнитване е първо приближение на реалното смесено намагнитване. Изследвани са числено по МКЕ свързани огледално-диелектрични структури с различни дължини на свързване. Получените честотни зависимости на загубите при разпространение в права и обратна посока в Ка-обхвата показват силно изразено невзаимно поведение в широк честотен обхват. Установено е, че невзаимността зависи от дължината на свързване и се подобрява с нейното увеличаване.

Резултатите показват, че работната честота, получена при численото изследване се оказва по-голяма от тази при експерименталното изследване. Установено е също, че работната честота расте с увеличаването на дължината на свързване, от което е направен изводът, че смесеното намагнитване създава ефективна дължина на свързваната област  $l_{\text{eff}}$ , която е по-малка от реалната дължина  $l$ . В резултат на това е предложена процедура за отчитане на смесения характер на намагнитването при проектирането на изолатори на основата на свързани диелектрични и феритни огледални вълноводи.

Проведено е изследване за влиянието върху невзаимното поведение на още четири параметъра, които участват в моделирането по МКЕ – интензитет на постоянното магнитно поле и три параметъра на ферита: намагнитеност на насищане, относителна диелектрична проницаемост и тангенс на диелектричните загуби. Установено е силно влияние на относителната диелектрична проницаемост върху работната честота. Също така, численото изследване показва силна зависимост на невзаимното поведение от интензитета на постоянното магнитно поле, намагнитеността на насищане и тангенса на диелектричните загуби на ферита и потвърждава подходящия избор на постоянен магнит и ферит при проведеното експериментално изследване.

### **3. Научни и научно-приложни приноси на дисертационния труд.**

Приносите на дисертанта се състоят в получаване на голямо количество нови научни факти, които допринасят за обогатяване на познанията в една актуална научна област с голямо теоретично и приложно значение. Видно е, че всички приноси са получени благодарение на експерименталните умения, подкрепени от добрата теоретичната подготовка на дисертанта. Те са формулирани както следва:

1) Проектирани са и са използвани успешно нови резонансни измерителни структури за експериментално изследване на дължината на вълната и свързаните с нея параметри (фазово отместване, фазова скорост и др.) в огледални вълноводи в Ка-обхвата по метода на проходния резонатор (cavity resonator method). Реализирана е висока точност на измерване от 0,5%. Получено е отлично съвпадение на експерименталните стойности за дължината на вълната по метода на проходния резонатор с теоретично получените по метода на крайните елементи (finite element method) в целия Ка-обхват – 1% при диелектричните и 2–5% при феритните огледални вълноводи.

2) Специално е конструирана измерителна система с електрически сонди, която осигурява разделителна способност 0,05 mm по надлъжната ос  $Oz$  и 0,01 mm по напречните оси  $Ox$  и  $Oy$ . Разработен е метод за сканиране в близката зона (near field scanning) на отворени структури, в частност единични и свързани феритни и диелектрични огледални вълноводи. Измерителната система позволи да бъдат открити фини ефекти в разпределението на полето в изследваните отворени структури.

3) За първи път е моделиран числено по метода на крайните елементи хомогенно намагнитен огледален феритен вълновод при три взаимно перпендикулярни посоки на хомогенно намагнитване:

-перпендикулярно на посоката на разпространение и успоредно на огледалната равнина (Случай 1);

-перпендикулярно на посоката на разпространение и на огледалната равнина (Случай 2);

-успоредно на посоката на разпространение (Случай 3).

За основния мод с хибриден характер са идентифицирани главните (относително най-големи) електрични и магнитни компоненти, което е от съществено значение за разбиране на невзаимните ефекти в свързани огледални ферито-диелектрични структури. Само в Случай 2 е установена асиметрия на електричното поле на основния мод, което води до невзаимно (нереципрочно) свързване на феритни и диелектрични огледални вълноводи.

4) Експериментално е установен невзаимен (нереципрочен) ефект в двураменни свързани огледални ферито-диелектрични структури със смесено намагнитване. Смесеното намагнитване е практически нехомогенно и обединява в себе си Случай 2 и Случай 3. Достигнати са прави загуби по абсолютна стойност 1–2 dB и изолация под –20 dB в честотна лента повече от 1 GHz в диапазона 30–31,5 GHz, което може да се характеризира като много добро поведение на изолатор за милиметрови вълни.

5) Създаден е тримерен числен модел по метода на крайните елементи на двураменна свързана структура с хомогенно намагнитване на феритния елемент. Установено е невзаимно (нереципрочно) поведение и са изследвани факторите, които влияят върху него: дължина на свързаната област, интензитет на постоянното магнитно поле и параметрите на ферита (намагнитеност на насищане, относителна диелектрична проницаемост и тангенс на диелектричните загуби). Потвърдена е целесъобразността на избора на постоянно магнитно поле и феритен материал за оптимално невзаимно поведение. На основата на разработения модел по метода на крайните елементи е предложена процедура за числено проектиране на изолатори за милиметрови вълни, състоящи се от свързани огледални феритни и диелектрични вълноводи с отчитане на смесения характер на намагнитване на феритния елемент.

*Въпрос: Как е избрана големината на постоянното магнитно поле и може ли да бъде избрана такава, за да се получи оптимално невзаимно поведение ?*

**4. Авторефератът** е написан много добре, напълно отговаря на изискванията и правилно отразява извършената работа и приносите в дисертацията.

**5. Личен принос на Илияна Арестова.** От впечатленията ми на предзащитата както и от посочените наукометрични данни се убедих, че нейният принос е значителен и напълно достатъчен, както при получаване на научните резултати, така и в написването на статиите по дисертацията, изнасяне на устните и постерните доклади на конференции, а също и написването на самата дисертация и на автореферата.

Изследванията са представени в 14 публикации с участието на докторанта като на 13 от тях е първи автор. Илияна Арестова има 1 статия в списание с импакт-фактор, 4 публикации в реномирани национални списания, 1 статия в списание с импакт ранг и 8 в група "други публикации".

**6. Критични бележки.** Впечатленията ми от дисертационния труд на г-жа Арестова са много добри. Текстът се чете с интерес, следвайки структурата: актуалност на проблема, поставени цели, изпълнение, изводи. Забелязани са печатни и граматични грешки, които имат чисто технически характер. Означенията във фигурите са на български и на английски език, което би могло да бъде унифицирано с цел улесняване на читателя.

**7.Общо заключение.** Напълно съм убеден, че работата представлява един ценен дисертационен труд със значим научен принос, който не само удовлетворява, но и далеч надхвърля традиционните изисквания. Наукометричните показатели отговарят на изискванията на ЗРАСРБ и на Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в СУ „Св. Климент Охридски”. Поради това, без колебание призовавам членовете на журито по защитата, да гласуват за присъждане на научната и образователна степен Доктор на Илияна Арестова.

София, 08.08.2019 г.

Рецензент:

(доц. д-р Светослав Колев)