



ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА  
ЧАЧАК

ПРИМЉЕНО 22.04.2024.			
Оргјед.	Број	Титло	Бројник
013	781		

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ

Јелена М. Орељ

# МАГНЕТОИМПЕДАНСНИ ЕФЕКАТ АМОРФНИХ ЖИЦА СА МАГНЕТНО МЕКИМ СВОЈСТВИМА

докторска дисертација

Чачак, 2024.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC  
FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES ČAČAK

Jelena M. Orej

# **MAGNETOIMPEDANCE EFFECT OF SOFT MAGNETIC AMORPHOUS WIRES**

Doctoral Dissertation

Čačak, 2024.

## ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

<b>Аутор</b>
Име и презиме: Јелена М. Орелъ
Датум и место рођења: 27. фебруар 1985. године, Босанска Крупа, Босна и Херцеговина
Садашње запослење: Асистент, Универзитет у Крагујевцу - Факултет техничких наука у Чачку
<b>Докторска дисертација</b>
Наслов: МАГНЕТОИМПЕДАНСНИ ЕФЕКАТ АМОРФНИХ ЖИЦА СА МАГНЕТНО МЕКИМ СВОЈСТВИМА
Број страница: 99
Број слика: 75
Број табела: 4
Број библиографских података: 136
Установа и место где је рад израђен: Универзитет у Крагујевцу - Факултет техничких наука у Чачку
Научна област (УДК): Техничко-технолошке науке, Електротехничко и рачунарско инжењерство, Сензорика
<b>Ментор:</b> др Небојша Митровић, редовни професор, Факултет техничких наука у Чачку, Универзитет у Крагујевцу
Број и датум одлуке Већа Универзитета о прихватању теме докторске дисертације: Одлука Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу бр. IV-04-683/12 од 19. септембра 2023. године.

## ЗАХВАЛНИЦА

Захваљујем се колегама и истраживачима који су у својим лабораторијама спровели научне експерименте над узорцима феромагнетних аморфних жица испитиваних у оквиру ове докторске дисертације.

Методом скенирајуће електронске микроскопије са енергетском дисперзивном спектроскопијом је најпре проверен хемијски састав и хомогеност расподеле конститутивних елемената испитиваних аморфних легура у Лабораторији за електронску микроскопију Пољопривредног факултета Универзитета у Београду под руководством редовног професора др Владимира Павловића.

Применом оптичке микроскопије коју је обавио доцент др Боривоје Недељковић у Лабораторији САНУ Одсек за аморфне системе на ФТН Чачак су одређени геометријски параметри и испитана морфологија површина аморфних жица.

Рендгеноструктурном анализом је верификована аморфна структура узорака феромагнетних жица, а испитивања су спроведена у Лабораторији за теоријску физику и физику кондензоване материје Института за нуклеарне науке ВИНЧА – Института од националног значаја за Републику Србије од стране научног саветника др Миодрага Митрића.

Процена термичке стабилности аморфних легура је експериментално испитана методом диференцијалне термичке анализе на Факултету за физичку хемију Универзитета у Београду уз асистенцију вишег научног сарадника др Милице Васић.

Један део експеримената мерења магнетоимпедансе на векторском анализатору мреже је обављен у лабораторијама Војнотехничког института у Београду уз асистенцију научног сарадника др Радослава Сурле.

Директору Националног института за истраживање и развој техничке физике у Јашију, Румунија, др Николети Лупу се захваљујем на корисним консултацијама и сугестијама око избора састава аморфних жица на бази кобалта.

Ментор дисертације је био проф. др Небојша Митровић, коме се захваљујем на уложеном труду и смерницама у научноистраживачком раду током докторских студија.

## РЕЗИМЕ

У оквиру дисертације су истраживани феномени који припадају научној области развоја савремених сензора на бази магнетоимпедансних (МИ) елемената начињених од аморфних металних легура на бази кобалта и легура на бази гвожђа (жице састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ,  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ). Све легуре припадају материјалима са магнетно меким својствима, што је први предуслов за изражени МИ-ефекат (промена импедансе под утицајем спољашњег једносмерног магнетног поља  $H_{ex}$  при одређеним фреквенцијама  $f$  наизменичне струје која протиче кроз узорак). Дакле, централна истраживања су спроведена у домену функционалне зависности импедансе  $Z(H_{ex}, f)$ .

За потпуну анализу МИ-ефекта поред модула импедансе, детаљно су анализирани и зависности реалног  $MR(H_{ex}, f)$  и имагинарног дела  $MX(H_{ex}, f)$  импедансе. Тиме је омогућена анализа промене дубине магнетног продирања  $\delta_m(H_{ex}, f)$  коришћењем експерименталних података за магнетоотпорност  $MR(H_{ex}, f)$ , док је за анализу магнетне пермеабилности  $\mu(H_{ex}, f)$  неопходно и познавање зависности магнетореактансе  $MX(H_{ex}, f)$ .

Упоредна истраживања зависности магнетне дубине продирања од фреквенције и магнетног поља  $\delta_m(H_{ex}, f)$  код аморфних жица састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  су показала да се код легуре на бази кобалта достижу за ред величине ниже вредности дубине продирања и за ред величине више вредности МИ-односа (неколико стотина процената код легуре на бази кобалта наспрам неколико десетина процената код легуре на бази гвожђа).

Оптималне радне фреквенције МИ-елемената су дефинисане потребом избегавања доминантног утицаја лонгитудиналне анизотропије, тј. динамике магнећења домена у унутрашњости аморфних жица, која значајно смањује осетљивост микромагнетног сензора. Потребно је остварити доминантан утицај циркуларне анизотропије, тј. механизам ротације вектора магнетизације у доменима распоређеним по ободу жице. Највеће вредности осетљивости МИ-елемента су евидентирани код аморфних жица легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  при фреквенцијама 4-5 MHz, а достигнуте вредности су око 0,4 %/A/m.

**Кључне речи:** CoFeSiB, CoSiB и FeNbCuSiB аморфне жице, магнетоимпедансни (МИ) ефекат, МИ-сензор, магнетна дубина продирања, магнетна пермеабилност, осетљивост

## ABSTRACT

The development of advanced sensors based on magnetoimpedance (MI) elements prepared on cobalt-based ( $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  and  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ ) and iron-based ( $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ ) amorphous alloys was investigated. All investigated alloys are soft magnetic materials, which is the first prerequisite for a pronounced MI effect (impedance change under the influence of an external DC magnetic field  $H_{\text{ex}}$  at certain frequencies  $f$  of alternating current flowing through the sample). Thus, the central research in the dissertation is the behavior of the impedance on magnetic field and frequency  $Z(H_{\text{ex}}, f)$ .

In addition to the investigation of the MI-effect by MI-modulus  $Z(H_{\text{ex}}, f)$ , a complete analysis of two crucial MI-parameters: penetration depth  $\delta_m(H_{\text{ex}}, f)$ , and relative magnetic permeability of wire  $\mu_w(H_{\text{ex}}, f)$  were performed by exploiting all three electrical MI-element components MR ( $H_{\text{ex}}, f$ ), MX ( $H_{\text{ex}}, f$ ), and  $Z(H_{\text{ex}}, f)$ . A theoretical impedance model for a cylinder, which includes both magnetoresistance MR and magnetoreactance MX, has been successfully used to estimate the magnetic permeability values  $\mu(H_{\text{ex}}, f)$ .

Comparative studies of the dependence of the skin depth on the magnetic field and frequency  $\delta_m(H_{\text{ex}}, f)$  in amorphous wires of  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  and  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  alloys have shown that the cobalt-based alloy attains an order of magnitude lower values of penetration depth and for an order of magnitude higher MI-ratio (several hundred percent in cobalt-based alloy vs. several tens of percent in iron-based alloy).

The optimal frequencies of MI-elements are selected to avoid the dominant influence of longitudinal anisotropy, i.e. dynamics of magnetization of domains in the core of wires, which significantly reduces the sensitivity of the micromagnetic sensor. Therefore, it is necessary to realize the dominant influence of the skin effect on circular anisotropy, i.e. mechanism of magnetization vector rotation in domains distributed on the shell of the cylinder. In these conditions of strong skin effect, the values of the skin depth are about one-tenth of the wire radius, and the influence of the magnetic field on the increase of the penetration depth (i.e. on the decrease of the impedance) is pronounced. The highest sensitivity of the MI-elements was recorded with amorphous wires of  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  alloy at frequencies of 4-5 MHz, and the attained sensitivity is about 0.4 % / A/m.

**Keywords:** CoFeSiB, CoSiB, and FeNbCuSiB amorphous wires, magnetoimpedance (MI) effect, MI-element, skin depth, magnetic permeability, sensitivity.

# Садржај

1. УВОД .....	1
1.1. Предмет и циљ истраживања .....	1
1.2. Основне хипотезе на којима су заснована истраживања.....	2
1.3. Методе истраживања .....	4
1.4. Преглед стања у подручју истраживања .....	4
1.5. Преглед излагања .....	5
2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	9
2.1. Аморфне металне легуре.....	9
2.2. Магнетно меке карактеристике феромагнетних аморфних жица.....	16
2.3. Теоријски модел магнетоимпедансног ефекта.....	19
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО.....	32
3.1. Поступци добијања аморфних металних жица брзим хлађењем растопа .	32
3.2. Структурна карактеризација материјала дифракцијом X-зрачења XRD ....	34
3.3. Испитивање термичких својстава аморфних легура диференцијалном термијском анализом DTA.....	35
3.4. Скенирајућа електронска микроскопија са енергетском дисперзивном спектроскопијом SEM/EDS.....	37
3.5. Мерење магнетоимпедансе .....	38
3.5.1 Извор једносмерног магнетног поља - 1Д Хелмхоцови калемови .....	39
3.5.2 Мерења магнетоимпедансе на LCR-метру.....	40
3.5.3 Одређивање модула магнетоимпедансе помоћу векторског анализатора мреже VNA.....	42
4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА .....	46
4.1. Испитивање морфологије аморфних жица оптичком и SEM микроскопијом .....	47
4.2. Испитивање термичких својстава аморфне легуре $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ диференцијалном термијском анализом DTA.....	51
4.3. Испитивање аморфних жица легуре $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ дифракцијом X-зрачења XRD.....	51
4.4. Испитивање аморфних жица легура $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ и $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ скенирајућом електронском микроскопијом SEM са енергетском дисперзивном спектроскопијом EDS .....	53
4.5. Магнетоимпедансни ефекат.....	55
4.5.1 Магнетоимпедансни ефекат жице аморфне легуре на бази кобалта састава $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ .....	55
4.5.2 Зависност магнетне дубине продирања од фреквенције и магнетног поља код аморфне жице легуре $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ .....	62

4.5.3	Зависност релативне магнетне пермеабилности од фреквенције и магнетног поља код аморфне жице легуре $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ .....	63
4.5.4	Зависност осетљивости МИ-елемента од фреквенције и магнетног поља код аморфне жице легуре $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ .....	66
4.5.5	Магнетоимпедансни ефекат аморфне жице легуре $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ .....	69
4.5.6	Магнетоимпедансни ефекат аморфне жице легуре $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ .....	73
4.5.7	Зависност магнетне дубине продирања од фреквенције и магнетног поља код аморфне жице легуре $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ .....	79
5.	ЗАКЉУЧАК.....	83
	ЛИТЕРАТУРА .....	89



# 1. УВОД

## 1.1. Предмет и циљ истраживања

Предмет истраживања ове докторске дисертације су жице аморфних металних легура на бази кобалта и на бази гвожђа са магнетно меким својствима. Испитивањима су обухваћене аморфне легуре на бази кобалта састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  као и легура на бази гвожђа из система FINEMET Fe-M-Cu-Si-B (M=Nb) састава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ . Према својим магнетним карактеристикама оба типа испитиваних легура припадају материјалима са изузетним магнетно меким својствима, тј. високим вредностима релативне магнетне пермеабилности.

Постизање оптималних функционалних карактеристика електричних уређаја израђених од феромагнетних легура је могуће тек након детаљног истраживања електричних и магнетних својстава материјала. Поред својих атрактивних магнетно меких својстава, аморфне и нанокристалне феромагнетне легуре поседују и специфичне електричне карактеристике. Елементи који показују промену електричне отпорности под дејством спољашњег  $dc$  магнетног поља  $R(H_{ex})$  (магнетоотпорни МР ефекат / енгл. **Magneto Resistance MR effect**) имају ниске релативне вредности  $\Delta R/R$ : 0,53% FeCrNbCuSiB @ 0.8 Т [1]; 0,1% FeVCuSiB @ 23 kA/m [2].

Међутим, откриће магнетоимпедансог (МИ) ефекта (енгл. **Magneto Impedance MI effect**) омогућило је интензиван развој сензорике уз коришћење аморфних и нанокристалних феромагнетних легура за израду МИ-елемената. МИ-ефекат је најпре откривен код аморфних FeCoSiB жица, а касније је пажња истраживача окренута и ка планарној геометрији; нарочито ка нанокристалним тракама и филмовима начињених од легура на бази гвожђа система FINEMET Fe-M-Cu-Si-B (M = Nb, Mo, Cr, Ta, Zr, V). Релативна промена модула импедансе  $\Delta Z/Z$  у одговарајућем фреквентном опсегу може достићи и више стотина процената (енгл. **Giant Magneto Impedance (GMI) effect** - велики МИ ефекат): 506% CoFeNiMoBSi @ 8 kA/m [3], 1200% CoFeBSi @ 15 kA/m [4], што аморфним жицама ових феромагнетних легура омогућава широке могућности успешне примене у савременој сензорској техници [5-7].

Знатно више вредности магнетне пермеабилности легура на бази кобалта су суштинска предност које оне имају у односу на легуре на бази гвожђа па одатле и потиче атрактивност за њихово истраживање. Посебно су значајне њихове високе осетљивости МИ-елемената у области ниских вредности магнетних поља којима су

изложени. Док нанокристалне легуре на бази гвожђа постижу своје одличне карактеристике тек након оптималних термомагнетних или термомеханичких третмана (током којих се формира структура са нанокристалима хомогено распоређеним у аморфној матрици), легуре на бази кобалта имају изванредне магнетно меке перформансе са потпуно аморфном структуром. Један од недостатака узорака легура на бази гвожђа након нанокристализације је и слабљење механичких својстава, што даје битну предност за примену аморфним легурама на бази кобалта.

Узорци испитиване жице на бази гвожђа добијени су стандардном технологијом хлађења растопаметалне легуре на унутрашњој површини ротирајућег цилиндра (енгл. melt-spinning technique). Испитивани узорци жица на бази кобалта су добијени технологијом хлађења растопа у ротирајућем слоју воде на унутрашњој површини ротирајућег цилиндра (енгл. in-rotating water melt-spinning technique [8]), који омогућава брзине хлађења растопа до око  $10^6$  K/s неопходне за достизање аморфне структуре чиме се проширује број феромагнетних легура које се могу успешно произвести.

Централна истраживања у оквиру дисертације су спроведена у области испитивања утицаја радних фреквенција на промене магнетоимпедансног ефекта код узорака аморфних жица изложених дејству спољашњег једносмерног магнетног поља  $H_{ex}$ , тј. у домену функционалне зависности модула импедансе  $|Z(H_{ex}, f)|$  (уобичајена ознака  $Z(H_{ex}, f)$ ). Релативне промене модула импедансе  $\Delta Z/Z$  у одговарајућем фреквентном опсегу могу достићи неколико стотина процената, на чему се и заснива рад савремених магнетних сензора високе осетљивости (резолуције до око 1 pT). У сензорској употреби су најчешће аморфне жице магнетно меких легура, било да се користе у верзији са стакленим омотачем или без ове заштите. МИ-елементи су веома погодни за бројне примене у сензорској техници: за сензоре магнетног поља, ротације, притиска, струјне сензоре, за електронске компасе, навигације/GPS, биомагнетна мерења, магнетне меморије, системе безбедности, контролу саобраћаја и индустријских процеса, космичка истраживања, спортске реквизите...

## 1.2. Основне хипотезе на којима су заснована истраживања

Спроведени свеобухватни теоријски и експериментално - аналитички рад базиран на мултидисциплинарном приступу истраживања физичких појава анализираних у оквиру ове докторске дисертације је резултовао у постављању следећих хипотеза.

На магнетоимпедансни ефекат директно утиче интеракција спољашњег једносмерног магнетног поља са магнетним доменима чија је структура последица унутрашњих напрезања насталих током поступка брзог хлађења растопа којим се добијају аморфне жице. Услед магнетоеластичне интеракције, код аморфних феромагнетних жица са негативним коефицијентом магнетострикције (легура на бази кобалта) доменска структура се састоји од унутрашњих магнетних домена, окружених циркуларним доменима наизменично распоређеним дуж правца жице. Циркуларна доменска структура на површини жице је окарактерисана наизменичним распоредом домена са супротно оријентисаним векторима

магнетизације ( $\uparrow, \downarrow$ ) раздвојених равним доменским зидовима. Код аморфних феромагнетних жица са позитивним коефицијентом магнетострикције (легури на бази гвожђа) доменска структура се састоји од лонгитудинално намагнетисаног језгра (по оси жице) и радијалног спољашњег омотача са магнетним доменима у конфигурацији лавиринта и цик-цак зидовима, што указује на присуство тракастих домена са незатвореним или затвореним магнетним флуksom.

Спољашње лонгитудинално  $dc$  магнетно поље  $H_{ex}$  и циркуларно  $ac$  магнетно поље  $h_{ac}$  (индуковано протоком наизменичне струје  $i_{ac}$ ) утичу на промену магнетне дубине продирања  $\delta_m$  и магнетне пермеабилности  $\mu$ , тако да је импеданса  $Z$  феромагнетног цилиндричног проводника (тј. аморфне жице) функција три експериментална параметра: радне фреквенције  $f$ , интензитета спољашњег једносмерног магнетног поља  $H_{ex}$  и амплитуде наизменичне струје  $I_{cc}$  која протиче кроз узорак.

Утицај фреквенције на МИ-ефекат је повезан са фреквентним зависностима физичких ефеката и генерално се дели на три подопсега:

- (а) опсег ниских фреквенција (од око 10 kHz до око 1 MHz) у којем је доминантан ефекат померања доменских зидова на процес циркуларног магнећења;
- (б) опсег средњих фреквенција (од око 1 MHz до око 1 GHz) у којем су главни утицаји скин-ефекта и ротације вектора магнетизације као механизма процеса циркуларног магнећења (померање доменских зидова је блокирано);
- (в) високо фреквентни опсег изнад 1 GHz у којем жиромагнетни ефекат доминантно утиче на ротацију вектора магнетизације.

У опсегу ниских радних фреквенција магнетна пермеабилност  $\mu$  опада са порастом  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$  (при константној фреквенцији  $f$  и при константној амплитуди струје кроз узорак  $I_{cc}$ ). Повећање магнетне дубине продирања  $\delta_m$  ( $H_{ex}$ ) има за последицу смањење модула импедансе узорка жице  $Z$  ( $H_{ex}$ ). При повећању радне фреквенције у опсегу средњих фреквенција дубина продирања значајно опада ( $\delta_m$  је значајно мања од полупречника жице  $a$ ) и циркуларна магнетна пермеабилност (тј. магнетни домени распоређени дуж површине цилиндричног феромагнетног узорка) преузима доминантну улогу. Скин ефекат и механизам ротације вектора магнетизације су одговорни за процес циркуларног магнећења (кретање зидова магнетних домена је блокирано) што значајно мења зависност МИ-односа од  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$ .

За потпуну анализу МИ-ефекта поред модула импедансе  $Z$  ( $H_{ex}, f$ ), неопходно је детаљно анализирати и зависности реалног дела импедансе  $MR$  ( $H_{ex}, f$ ) и имагинарног дела импедансе  $MX$  ( $H_{ex}, f$ ). Промене дубине магнетног продирања  $\delta_m$  ( $H_{ex}, f$ ) је могуће анализирати коришћењем експерименталних података магнетоотпорности  $MR$  ( $H_{ex}, f$ ), док је за анализу магнетне пермеабилности  $\mu$  ( $H_{ex}, f$ ) неопходно и познавање зависности магнетореактансе  $MX$  ( $H_{ex}, f$ ). При анализама зависности од ова два наведена параметра, трећи параметар (амплитуда наизменичне струје  $I_{cc}$  која протиче кроз узорак) се одржава константном.

Предложене хипотезе су базиране на оригиналним прелиминарним експерименталним резултатима и доступним подацима из међународне научне литературе у области савремених аморфних феромагнетних материјала, а

нарочито узорака у облику жица које се данас успешно користе у сензорској техници заснованој на магнетним ефектима аморфних легура.

### 1.3. Методе истраживања

На основу свеобухватне и систематске анализе спроведене при планирању рада на докторској дисертацији, изабране су адекватне експерименталне и аналитичке методе за карактеризацију жица феромагнетних аморфних металних легура као сензорског елемента:

- Структурна карактеризација материјала (дифракција X-зрака, **XRD X-Ray Diffraction**),
- Термичка карактеризација материјала (диференцијална термијска анализа, **DTA Differential Thermal Analysis**)
- Испитивање морфологије површина аморфних жица оптичком микроскопијом (ОМ)
- Структурна и хемијска карактеризација материјала (скенирајућа електронска микроскопија са енергетском дисперзивном спектроскопијом X-зрака, **SEM/EDS - Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy**).
- Испитивање електричних карактеристика аморфних жица мерењем модула магнетоимпедансе у зависности од фреквенције и спољашњег магнетног поља.
- Испитивање електричних карактеристика аморфних жица мерењем реалног и имагинарног дела импедансе у зависности од фреквенције и спољашњег магнетног поља.
- Одређивање критичне фреквенције при којој почињу да се опажају феномени МИ-ефекта.
- Одређивање зависности магнетног поља анизотропије од фреквенције.
- Одређивање зависности магнетне дубине продирања од фреквенције и спољашњег магнетног поља.
- Одређивање зависности релативне магнетне пермеабилности жице од фреквенције и спољашњег магнетног поља.
- Одређивање зависности осетљивости МИ-елемента од фреквенције и спољашњег магнетног поља.

### 1.4. Преглед стања у подручју истраживања

Магнетоимпедансни ефекат је најпре откривен код аморфних FeCoSiB жица (средином деведестих година XX века), а касније је пажња истраживача окренута и

ка планарној геометрији (сам крај XX века) нарочито ка нанокристалним тракама и филмовима начињених од легура на бази гвожђа из система FINEMET Fe-M-Cu-Si-B (M = Nb, Mo, Cr, Ta, Zr, V). Почетком XXI века у фокус истраживања светских научних лабораторија улазе аморфне масивне металне легуре (АММЛ), када се развијају мултикомпонентни феромагнетни системи на бази гвожђа (нпр. Fe-(Al,Ga)-(P,C,B,Si,Ge), Fe-(C,B)-(Cr,Mo)-Tm и (Fe,Co)-B-(Hf,Nb)-Y, код којих се ради процене склоности ка аморфизацији (узорци у облику трака увећаних димензија – преко 100  $\mu\text{m}$ ) управо користи техника брзог хлађења растопа на ротирајућем диску (енгл. melt spinning).

Истраживања су показала да су погодни састави и облици феромагнетних аморфних легура са израженим МИ-ефектом како магнетно меке легуре на бази кобалта, тако и легуре на бази гвожђа и то у сва три облика (жице, траке и филмови). Сваки од наведених геометријских облика је подразумевао развој и оптимизацију засебних технологија добијања сензорских МИ-елемената, што је дуготрајан и захтеван посао.

Напредак мерне технике остварен током последње деценије је померио тежиште истраживања МИ-ефекта ка фреквентним опсезима из ранга гигахерца, али функционални фреквентни опсеци у савременој сензорској техници су и даље остали у мегахерцном подручју (до око 50 MHz) у којем је веома изражен скин ефекат.

Важно је напоменути да се поред напред наведених стандардних облика МИ-елемената све чешће истражују и мултифункционалне композитне конфигурације, где се испитују различите комбинације аморфних феромагнетних легура у сва три поменута појавна облика са бројним непроводним материјалима, као на пример са стаклом, полимерном матрицом, бетоном, асфалтом, еластомерима, смолама, дрветом...

## 1.5. Преглед излагања

У уводном делу докторске дисертације је најпре приказан преглед истраживања магнетоимпедансног ефекта као једног од најинтересантнијих магнетних феномена који се може искористити за магнетне сензоре и сродне уређаје. Савремени микросензори засновани на импулсном МИ ефекту у аморфним магнетно меким жицама се услед високе осетљивости примењују у мобилним телефонима, за детекцију биомагнетног поља, паметном саобраћају заснованом на интернету интелигентних уређаја и сл. За постизање одличних перформанси електричних уређаја који користе компоненте израђене од аморфних или нанокристалних феромагнетних легура, неопходно је извршити детаљну карактеризацију ових материјала.

Поглавље 2. (теоријски део дисертације) садржи уводни сегмент о моделовању аморфних структура заснованом на аморфизацији металне течности при њеном преласку у чврсто стање и том приликом оствареним распоредом атома конститутивних елемената легуре. Излагање је настављено прегледом магнетно меких легура и њихових основних функционалних својстава погодних за израду жица, трака и танких филмова са израженим магнетоимпедансним ефектом. Затим

су презентована основна објашњења феномена магнетоимпедансног ефекта. МИ-ефекат је у директној корелацији са појавом скин ефекта у узорку магнетног материјала, тј. са утицајем фреквенције на магнетну дубину продирања  $\delta_m$ . Имајући у виду зависност дубине продирања  $\delta_m$  и од магнетне пермеабилности  $\mu$  феромагнетног материјала, спроведене су и анализе зависности ове две величине од интензитета спољашњег једносмерног магнетног поља  $H_{ex}$ . Приказан је модел за процену површине кроз коју постоји проток наелектрисања у цилиндричном узорку ради дефинисања зависности магнетне дубине продирања од спољашњег магнетног поља и радне фреквенције  $\delta_m(H_{ex}, f)$ . Затим је презентован модел зависности магнетне пермеабилности од спољашњег магнетног поља и радне фреквенције  $\mu(H_{ex}, f)$ . Приказани модели указују да је за комплетну анализу ова два кључна МИ-параметра неопходно коришћење и реалног  $MR(H_{ex}, f)$  и имагинарног дела импедансе  $MX(H_{ex}, f)$ .

Сам модул импедансе  $Z(H_{ex}, f)$  се користи за уобичајену дефиницију тзв. магнетоимпедансног односа којим се процењује атрактивност испитиваног МИ-елемента за сензорску примену, тј. за одређивање његове осетљивости на дејство спољашњег магнетног поља  $H_{ex}$ . Високе вредности осетљивости оваквих сензора се захтевају у многим инжењерским и индустријским применама. Порекло магнетоимпедансног ефекта везано је за динамику процеса магнетнења, па су с тим у вези презентовани и модели структуре магнетних домена код аморфних жица као цилиндричних и код аморфних трака и филмова као планарних феромагнетних узорака.

У експерименталном делу (поглавље 3.) докторске дисертације презентовани су поступци добијања аморфних металних легура у облику жице, као и инструменталне методе за карактеризацију које су коришћене током планираних и спроведених истраживања. Најпре је описана метода структурне карактеризације материјала дифракцијом X-зрачења којом је верификована аморфна структура испитиваних жица. За процену термичке стабилности узорака аморфних легура коришћена је метода диференцијалне термијске анализе DTA. Потом је приказана метода скенирајуће електронске микроскопије са енергетском дисперзивном спектроскопијом SEM/EDS за структурну и хемијску карактеризацију материјала.

Описан је систем 1Д-Хелмхолцових калемова којим је генерисано спољашње једносмерно магнетно поље хомогености од око 99,7% у којем су спроведена сва мерења над магнетоимпедансним елементима. За испитивање електричних карактеристика феромагнетних аморфних жица најпре су спроведена мерења реалног и имагинарног дела импедансе у зависности од фреквенције и спољашњег магнетног поља. У ову сврху је коришћен LCR-метар на којем је (по методи четири тачке) обављено испитивања узорака до радних фреквенција од 5 MHz. За мерења модула импедансе у зависности од фреквенције и спољашњег магнетног поља поред LCR Hi-TESTER-а коришћен је и векторски анализатор мреже VNA до радних фреквенција од 12 MHz.

Поглавље 4. у којем су приказати остварени резултати и њихова дискусија је подељено на више сегмената.

У првом сегменту су презентовани резултати добијени оптичком микроскопијом којом се одређују геометријски параметри и морфологија површина испитиваних аморфних жица. DTA методом је проверена термичка стабилност узорака жица након добијања технологијом хлађења растопа у

ротирајућем слоју воде. Верификација аморфне структуре жица обављена је анализом рендгенограма добијених коришћењем  $\text{Cu-K}\alpha$  линије X-зрачења. Следе истраживања структуре микронске резолуције скенирајућом електронском микроскопијом SEM уз коју се паралелном применом EDS методе спроводи и провера хемијског састава и жељене хомогене расподеле свих конститутивних елемената у легури.

Други сегмент је посвећен почетним анализама магнетоимпедансног ефекта, тј. испитивањима фреквентне зависности МИ-односа (рачунатог коришћењем модула импедансе  $Z(0)$  без и  $Z(H_{\text{ex}})$  при дејству спољашњег једносмерног магнетног поља ( $[Z(0) - Z(H_{\text{ex}})]/Z(H_{\text{ex}})$ ) за различите вредности магнетног поља  $H_{\text{ex}}$ . На основу добијених резултата могуће је проценити вредност критичне фреквенције на којој започињу промене импедансе при датој (константној) вредности магнетног поља  $H_{\text{ex}}$ , као и достигнуте максималне вредности МИ-односа ради процене адекватности испитиваних узорака за даља истраживања сензорских ефеката. С обзиром на фреквентну зависност физичких феномена МИ-ефекта, у наставку су најпре приказани резултати остварени при нижим радним учестаностима ( $f \leq 1 \text{ MHz}$ ), а затим и на почетку средњих учестаности ( $f \geq 2 \text{ MHz}$ ). Измене профила МИ-односа регистроване при повећању радних фреквенција су приказане засебним анализама реалног и имагинарног дела импедансе које омогућавају и накнадну фреквентну анализу самог модула импедансе. Ова анализа је нарочито значајна јер омогућава одређивање фреквентне зависности тзв. карактеристичног магнетног поља анизотропије  $H_k$  битног за процену успешног коришћења испитиваног МИ-елемента као магнетног сензора.

Напред наведени резултати и дискусије су омогућиле да се у трећем сегменту применом модела (приказних у теоријском делу дисертације) најпре успешно обаве засебне анализе зависности магнетне дубине продирања и то како од радне фреквенције, тако и од спољашњег  $dc$  магнетног поља. Усвојени модел релативне магнетне пермеабилности жице омогућава спровођење анализе њене зависности од магнетног поља при чему се радна фреквенција одржава као константан параметар. Затим су презентована истраживања осетљивости магнетоимпедансног МИ-елемента код жице аморфне легуре на бази кобалта система  $\text{CoFeSiB}$  у опсегу високих радних фреквенција од 2 MHz до 5 MHz и опсегу средњих вредности спољашњег  $dc$  магнетног поља ( $H_{\text{max}} \approx 463 \text{ A/m}$ ) са циљем процене атрактивности примене жица у сензорици. Следе испитивања МИ-ефекта код жице аморфне легуре на бази кобалта система  $\text{CoSiB}$  (радне фреквенције до 12 MHz и  $H_{\text{max}} \approx 15 \text{ kA/m}$ ) и жице аморфне легуре на бази гвожђа система  $\text{Fe-Nb-Cu-Si-B}$  (радне фреквенције до 4,5 MHz и  $H_{\text{max}} \approx 17 \text{ kA/m}$ ).

Добијени научни резултати спроведених истраживања су сумирани кроз изведене закључке представљене у поглављу 5., на чијем крају су презентовани и могући даљи правци истраживања у презентованој области савремене сензорске технике заснованој на комплексном физичком феномену магнетоимпедансног ефекта. Део остварених резултата ове докторске дисертације је успешно презентован међународном научном аудиторијуму публикавањем рада у врхунском међународном научном часопису категорије M21, а други део веома актуелних резултата се припрема за презентовање на светској научној конференцији током 2024. године.

Коначно, литературни преглед садржи 136 наслова публикованих научних резултата и спољних извора техничких података који су представљали полазну основу истраживања спроведених током израде ове докторске дисертације, као и референтне изворе са којима је изведена упоредна анализа достигнутих научних резултата.



## 2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ИСТРАЖИВАЊА

Ово поглавље представља увод у аморфне материјале, методе њиховог добијања и преглед битних електричних, магнетних и хемијских својстава. Посебан акценат је стављен на узорке у облику жице, с обзиром да су сва истраживања спроведена баш на таквим узорцима и с обзиром да су многе особине директно повезане управо са геометријом узорка. Превасходно се желело представити на којим су пређашњим истраживањима и потврђеним научним чињеницама утемељена истраживања у овој докторској дисертацији. У ту сврху поглавље је започето излагањем о моделовању аморфних структура, а настављено прегледом магнетно меких својстава феромагнетних аморфних жица. Затим су приказана теоријска разматрања магнетоимпедансног ефекта као централне теме обављених истраживања, уз детаљан преглед до сада познатих модела структуре магнетних домена чије познавање је неопходно за разумевање својстава испитиваних узорака аморфних жица.

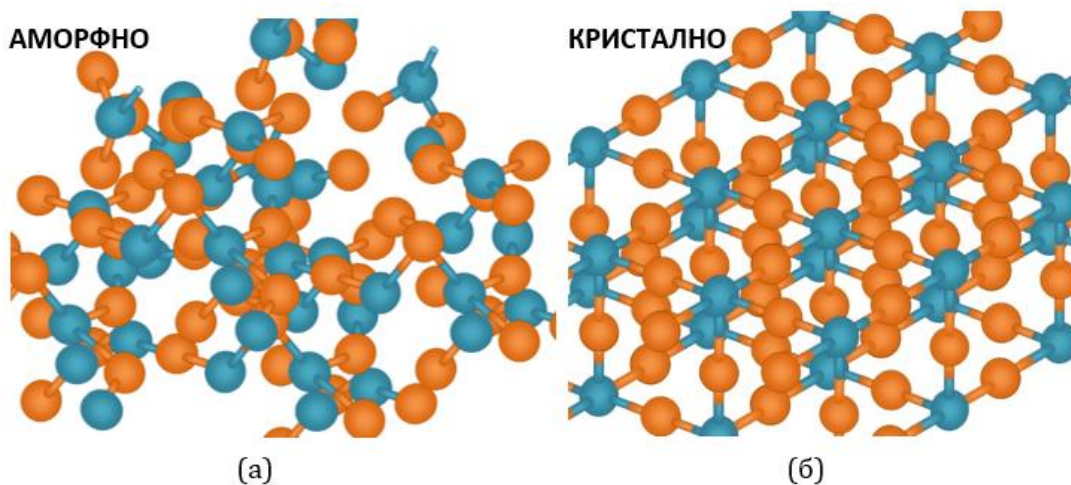
### 2.1. Аморфне металне легуре

Наука о материјалима је интердисциплинарна и веома сложена научна област без чијег развоја напредак технологије није могућ. Бави се проучавањем својстава и примене различитих врста материјала. Од друге половине XX века посебну групу чине савремени материјали. Ови материјали су дизајнирани тако да готово у потпуности одговарају захтевима специфичне намене. Истраживање у овој групи материјала се може спровести у неколико фаза: синтеза (тј. стварање нових материјала - легура), затим карактеризација (тј. анализа и испитивање добијене легуре) и пост-препаративна обрада легуре (нпр. термичка испитивања материјала). Све три фазе истраживачког процеса имају за крајњи циљ побољшање и оптимизацију својстава, као и постизање одговарајућих физичких ефеката испитиваних узорака. У овој докторској дисертацији истраживање је базирано на другој и трећој фази. Аморфни материјали према начину добијања, унутрашњој структури, а последично и према својим својствима, свакако припадају групи савремених материјала.

С обзиром на теоријски модел потпуно неуређеног система, идеално аморфно стање би требало да карактерише изотропност структуре што би за резултат имало и изотропност својстава узорка аморфног материјала. Постоје три основне

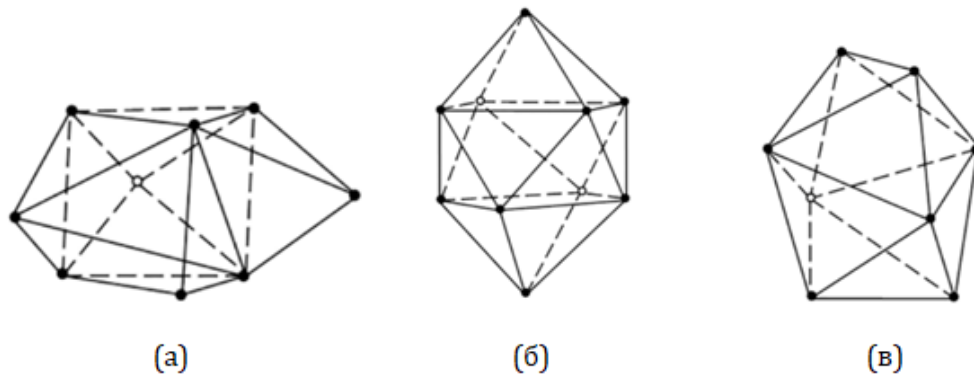
групације аморфних материјала: полимери, борсиликатна стакла, као и велики број металних стакала (енгл. **Metallic Glasses MG**) у које се убрајају и аморфне феромагнетне металне легуре.

Аморфне металне легуре имају потпуно насумичан распоред атома у својој структури, на супрот индустријским металним легурама које карактерише високо уређена, кристална структура. Структурна конфигурација металних стакала је одређена тзв. уређењем кратког домета, тополошким и композиционим. То значи да за разлику од структуре у којој имамо транслациону симетрију, односно периодичност у распореду атома по све три просторне димензије (уређење дугог домета које имамо у кристалној структури), код аморфних материјала (металних и неметалних) можемо имати највише кластере, односно групе атома са сличним окружењем где се не може уочити никакав ред и периодичност изнад 2 nm. Ове структурне разлике илустроване су сликом 2-1. Градивне блокове код металних аморфних легура обично чине икосаедричне јединице (полиедри) са металним везама, што зависи од самог хемијског састава легуре. Густина паковања атома у оваквом уређењу структуре варира локално, што даје специфична механичка, магнетна и термичка својства овим легурама. Јављају се празнине, тзв. слободне запремине, дислокације и границе зрна, што се сматра дефектима структуре. Ови структурни дефекти су најчешће предмет истраживања у пост-препаративном третману узорка кроз процес тзв. структурне релаксације.



Слика 2-1. Илустрација структурне разлике између а) аморфног и б) кристалног уређења.

Случајан атомски распоред представља озбиљан проблем у описивању структуре аморфних материјала, јер онемогућава лако дефинисање растојања најближих суседних атома или координациони број. Бернал је први пут 1959. године изнео модел за описивање структуре течности која се назива случајни густи модел паковања [9], а нешто касније Финеи (Finney [10]) је користећи Воронојеве дијаграме (тј. постављање геометријских облика у равни, без преклапања и зазора), закључио да није могуће помоћу Берналових полиедара са петоугаоним површинама формирати структуру уређења дугог домета, тј. структуре приказане на слици 2-2 су врло вероватни саставни делови у аморфној структури.

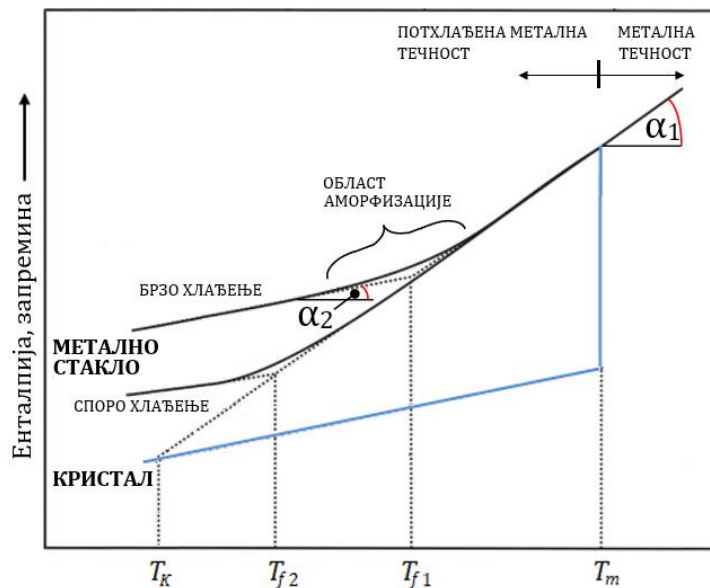


Слика 2-2. Берналови полиедри: (а) тригонална призма са три полуоктаедра, (б) Архимедова антипризма са два полуоктаедра и (в) тетрагонални додекаедар [11].

Структура аморфних металних легура је слична оној код борсиликатних стакала због чега се ове легуре и називају металним стаклима. Постоји више метода за добијање аморфне структуре код металних материјала, а једна од њих (најзаступљенија) јесте метода брзог каљења (енгл. **Rapidly Quenching RQ**), односно очвшавање растопа брзим хлађењем. Узорци аморфних жица испитивани у истраживањима спроведеним у оквиру ове докторске дисертације су добијени управо овом технологијом.

Феромагнетне аморфне металне легуре, чија синтеза је започета средином прошлог века, управо због својих јединствених својстава и потенцијала за примену у разним областима технике и индустрије (а који проистичу из могућности модификације структуре на нивоу нано скале) и даље заокупљају пажњу великог броја истраживача најреномиранијих светских научних институција у области савремених металних материјала. Хронолошки посматрано, значајан истраживачки резултат се одиграо 1959. год. у лабораторији професора Пола Дувеза (Pol Duwez) на Универзитету Калтек (CalTech, USA) [12]. Показано је како се супербрзим хлађењем од металне течности може добити метално стакло, односно чврста супстанца са структурном топологијом веома сличној оној коју је имала у течном стању. Имајући у виду да већина металних течности има ниску вискозност (око  $10^{-2}$  Pa·s - упоредиву с водом) и да је кристална структура оваквих легура једноставна, нуклеација и раст кристалних зрна у овом случају имају велику вероватноћу за лако и брзо настајање [12]. То наводи на закључак да је настајање чврсте аморфне структуре из металне течности са веома малом вероватноћом и једино могуће ако је процес хлађења растопа бржи од кристализационог процеса.

Процес аморфизације металне течности при њеном преласку у чврсто стање је илустрован на слици 2-3, где се могу уочити различите фазе у процесу очвшавања растопа металне легуре. Изнад температуре топљења  $T_m$  (индекс  $m$  означава енгл. melting) имамо металну легуру у течном стању. Уколико се растоп металне легуре хлади испод ове температуре довољно споро, тако да кинетика дозвољава нуклеацију кристалне фазе, енталпија (или запремина) ће се нагло смањити до вредности која одговара кристалној структури. Даље хлађење кристала довешће и до даљег смањења енталпије (запремине) само због термичке контракције кристала, па се уочава благи пад енталпије, односно запремине.



Слика 2-3. Аморфизација металне течности при њеном преласку у чврсто стање праћена температурским зависностима запремине/енталпије.

Уколико се растоп металне легуре хлади испод температуре  $T_m$  довољно брзо (брзином изнад критичне брзине хлађења како не би дошло до формирања кристалних језгара у структури) постоје две области криве: област потхлађене металне течности (од температуре  $T_m$  до  $T_{f2}$ , односно  $T_{f1}$  - индекс  $f$  означава енг. fictive) и област аморфизације (енг. glass transformation) у околини температуре  $T_{f2}$ , односно  $T_{f1}$ . У овом случају не долази до нагле промене енталпије (запремине) због фазних трансформација. При томе, структура има већи степен аморфности ако је остварена брзина хлађења изнад критичне већа. Дакле, у оба случаја хлађења брзином изнад критичне добија се аморфна структура, али она добијена већом брзином хлађења растопа легуре поседује већи степен аморфности.

У области потхлађене металне течности вискозност расте и до 15 редова величине. Како се температура снижава ка вредности  $T_{f1}$ , односно  $T_{f2}$ , структура растопа потхлађене течности почиње да одступа од оне која би била када би се допустило довољно времена за успостављање конфигурационе равнотеже [13], тј. енталпија (запремина) почиње да одступа од равнотежне линије (испрекидана линија дуж започетог правца). Смањење запремине при хлађењу је делом последица смањења амплитуде атомских вибрација, а делом промена у структури растопа које доводе до тога да она постаје компактнија са снижавањем температуре [14]. Правац опадања почиње постепено да мења нагиб (постаје мањи од  $\alpha_1$ ) све док вискозност не постане толико висока да се структурне промене дешавају толико споро да скоро и не зависе од температуре (структура је практично фиксна), тј. даље промене нису могуће у лабораторијски временским скалама. Са даљим падом температуре, смањење запремине је скоро у потпуности последица смањења амплитуде атомских вибрација [14]. Пресек овог правца (са мањим нагибом, угао  $\alpha_2$ ) и почетног када је вискозност била знатно нижа у потхлађеној течности одређују температуру  $T_{f1}$ , односно  $T_{f2}$ . То се обично дешава при вискозности од око  $10^{12}$  Pa·s, што је илустровано на слици 2-4.

Температурска област између металне течности и металног стакла је област аморфизације, односно прелазна област унутар које је дошло до трансформације

металне течности у матално стакло. Често се у литератури фиктивна температура означава са  $T_g$  (енгл. glass transition) како би се нагласило да се у околини те температуре десио прелаз у стакласту структуру. У целом овом процесу, испод температуре топљења,  $T_m$ , а изнад Каузманове температуре,  $T_k$ , специфична запремина се смањује, док се истовремено и унутрашња енергија смањује са тенденцијом доласка до потенцијалног минимума, који поседује кристална структура. У случају да је процес хлађења био такав да је изостала кристализација, унутрашња енергија металног стакла не достиже свој потенцијални минимум, иако је структура на неки начин у новом равнотежном стању. Због тога се овако добијени материјали називају метастабилни.

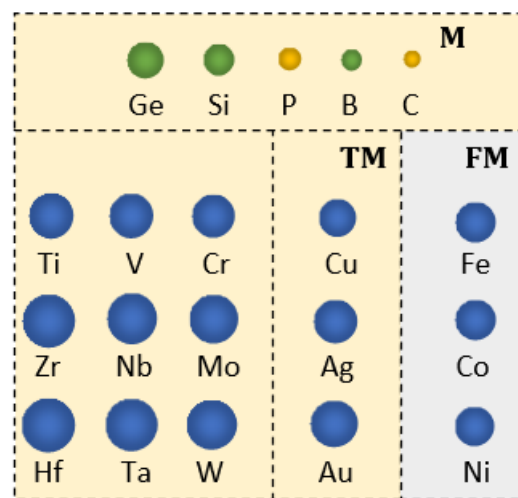
Показало се да чисти метали не могу прећи у стакласто стање, чак ни при врло високим стопама очвршћавања, иако су први прорачуни сугерисали да би то било могуће ако се метална течност хлади брзином од око  $10^{11}$ – $10^{13}$  K/s [15]. Поступак очвршћавања превасходно је олакшан легирањем метала, а касније и унапређењем разних техника брзог хлађења. Тако су настали системи металних стакала који се могу поделити у две основне групе: метал-металоид и метал-метал. Прво метално стакло добијено је на бази бинарног система (двокомпонентна метална легура) из прве групе. Наиме, формирање првог металног стакла  $Au_{75}Si_{25}$  [12, 16] добијено је техником прскања растопа легуре специјалним пиштољем, при чему је узорак у облику фолије, дебљине од 10  $\mu m$  до 50  $\mu m$ , хлађен течним хелијумом. Постигнута је брзина хлађења већа од  $10^8$  K/s, што и даље важи за екстремно велику брзину хлађења. Крајем XX века су развијени вишекомпонентни системи (до  $n=8$  елемената) аморфних масивних металних легура (АММЛ - ВМГ) за чије су очвршћавање довољне ниске брзине хлађења растопа од око  $10^2$ – $10^6$  K/s.

Основу феромагнетних аморфних металних легура чине елементи који су носиоци магнетних својстава: гвожђе, кобалт и никл (најчешће око 75-80 ат.%) и металоиди (енгл. Metaloids **M** око 20 ат.%) чија је улога да омогуће формирање аморфне структуре. Поред ове две врсте елемената, легирање се изводи и додатком одговарајућег процента прелазних метала (енгл. Transition Metals **TM**) чија је улога да побољшају поједина функционална својства аморфне легуре с циљем оптимизације техничких карактеристика неопходних за њихову финалну примену. Због различите величине атома који улазе у састав легуре (нпр. табела 1) и њихове насумичне просторне расподеле, приликом очвршћавања растопа великом брзином хлађења, атоми бивају блокирани у стакластој, тј. хаотичној конфигурацији што отежава кретање групе атома који бивају практично “замрзнути”. Као последицу имамо металне легуре са веома специфичним механичким (нпр. тврдоћа, ниска еластичност,...) и електричним (нпр. специфична електрична отпорност) својствима.

Прве примене ових легура биле су ограничене на узорке облика жице, фолије и траке, јер се према тадашњој технологији добијања узорци већих димензија нису могли довољно брзо охладити чиме би се постигла жељена некрystalна структура, тј. да би структура остала аморфна. Каснији развој аморфних масивних металних легура са нижим критичним брзинама хлађења растопа је омогућио и добијање узорака сложених геометријских облика чиме је се опсег примена аморфних легура значајно проширио. У табели 2-1 је дат упоредни приказ величина атома свих хемијских елемената који се налазе у саставима легура испитиваних у овој докторској дисертацији.

Табела 2-1. Полупречници атома конститутивних елемената феромагнетних аморфних металних легура испитиваних у докторској дисертацији.

Елемент	Симбол (Атом. Бр.)	Полупречник (pm)
Бор	B (5)	82.00
Силицијум	Si (14)	115.30
Гвожђе	Fe (26)	124.12
Кобалт	Co (27)	125.10
Бакар	Cu (29)	127.80
Ниобијум	Nb (41)	142.90



Приликом развоја аморфних масивних металних легура (АММЛ – енгл. **Bulk Metallic Glasses BMG**) крајем 20. века установљени су и емпиријски принципи за подизање склоности легуре ка достизању стакласте-аморфне структуре [17-20]:

- најмање три конститутивна елемента у легури,
- атомски пречници градивних елемената легуре треба да се разликују најмање 12%,
- у систему је потребно обезбедити да највећи број елемената поседује негативну топлоту мешања бинарних подсистема конститутивних елемената.

У табели 2-2 су приказане вредности топлота мешања бинарних подсистема конститутивних елемената у системима легура које су испитиване у овој докторској дисертацији Co(Fe)SiB и Fe-Nb-Cu-Si-B.

У првом систему на бази кобалта Co(Fe)SiB је у потпуности испуњен трећи принцип према којем сви бинарни подсистеми конститутивних елемената имају негативне топлоте мешања. У другом систему Fe-Nb-Cu-Si-B једино комбинације елемената са баком (осим бинарног подсистема бакар-силицијум) не поседују негативне топлоте мешања, што је и унапред осмишљени услов, с обзиром да је улога бакра у легури управо да омогући нуклеацију центара за нанокристализацију структуре током контролисаних термичких, термомагнетних или термомеханички третмана.

Последњи, трећи принцип омогућава да металну легуру карактерише широка температурска област подхлађене течности  $\Delta T_x$ . С обзиром да се испитиване аморфне жице добијају методама које у основи имају брзо хлађење растопа неопходно је анализирати температурске промене својстава које се тада одигравају.

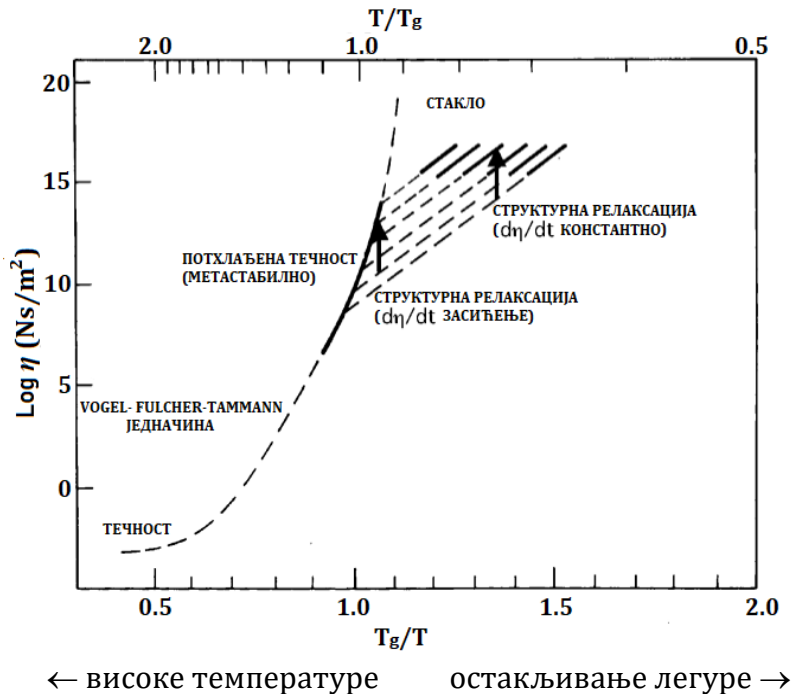
Табела 2-2. Топлоте мешања  $\Delta H_{xy}^{mix}$  (kJ/mol) бинарних подсистема конститутивних елемената у системима легура Co-(Fe)-Si-B и Fe-Nb-Cu-Si-B (вредности су добијене на основу прорачуна према Мидема моделу [17-20]).

	Co	Fe	Si	B
Co		-1	-38	-24
Fe	-1		-36	-26
Si	-38	-36		-14
B	-24	-26	-14	

	Fe	Nb	Cu	Si	B
Fe		-16	13	-36	-26
Nb	-16		3	-56	-54
Cu	13	3		-19	0
Si	-36	-56	-19		-14
B	-26	-54	0	-14	

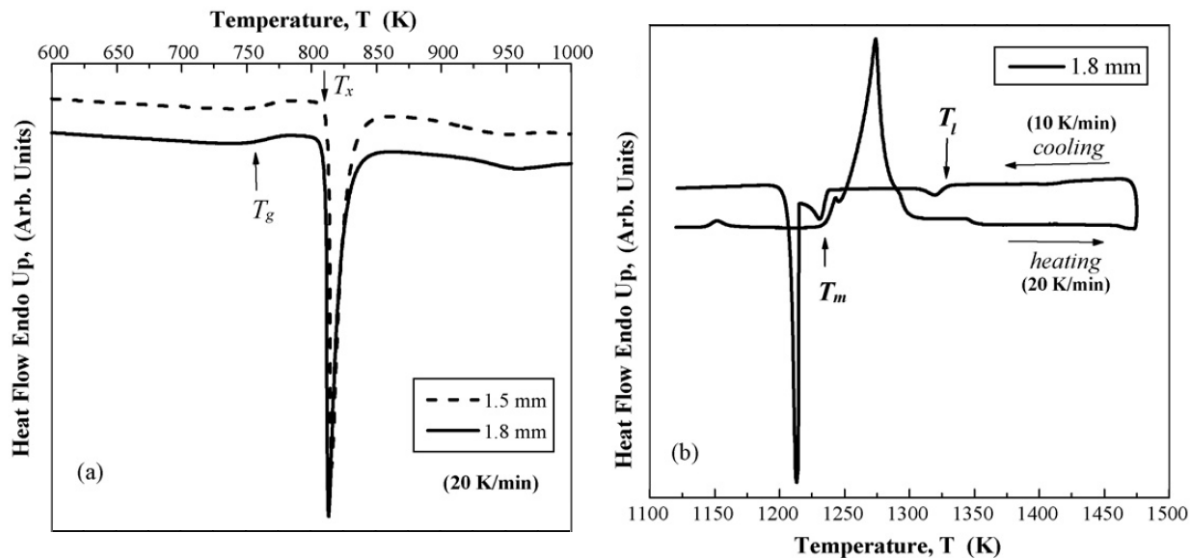
На слици 2-4 је приказан модел температурске промене вискозности, где се на температури остакљивања  $T_g$  уочава прелаз из области подхлађене течности у стакло - аморфно стање. При веома високим температурама вискозност растопа  $\eta$  се смањује до око  $10^{-4}$  Pa-s, док на температури остакљивања  $T_g$  достиже вредност од око  $10^{12}$  Pa-s [21, 22]. Брзина хлађења растопе металне легуре мора обезбедити драматично повећање вискозности система (за готово десет до петнаест редова величине у уском температурском опсегу) како би се онемогућило прегруписавање и уређивање атома унутар структуре пре него што она очврсне.



Слика 2-4. Температурска зависност вискозности [21, 22].

Област подхлађене течности легуре која се налази између температуре кристализације  $T_x$  и температуре остакљивања  $T_g$  ( $\Delta T_x = T_x - T_g$ ) је могуће одредити

помоћу експеримента диференцијалне сканирајуће калориметрије (**Differential Scanning Calorimetry DSC**). У условима високотемпературског експеримента могуће је одредити и температуру топљења ( $T_m$ ) и температуру ликвидуса ( $T_l$ ). На слици 2-5 су приказане DSC криве ливених узорка легуре састава  $Fe_{65.5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5.5}$  у облику цилиндра пречника од 1,5 mm и 1,8 mm [23]. Експериментално одређене вредности наведених карактеристичних температура су  $T_g = 754$  K,  $T_x = 814$  K,  $T_l = 1330$  K за пречник 1,5mm и  $T_g = 753$  K,  $T_x = 812$  K,  $T_l = 1330$  K, за пречник 1,8 mm, док је ширина температурске области подхлађене течности  $\Delta T_x$  од око 60 K.



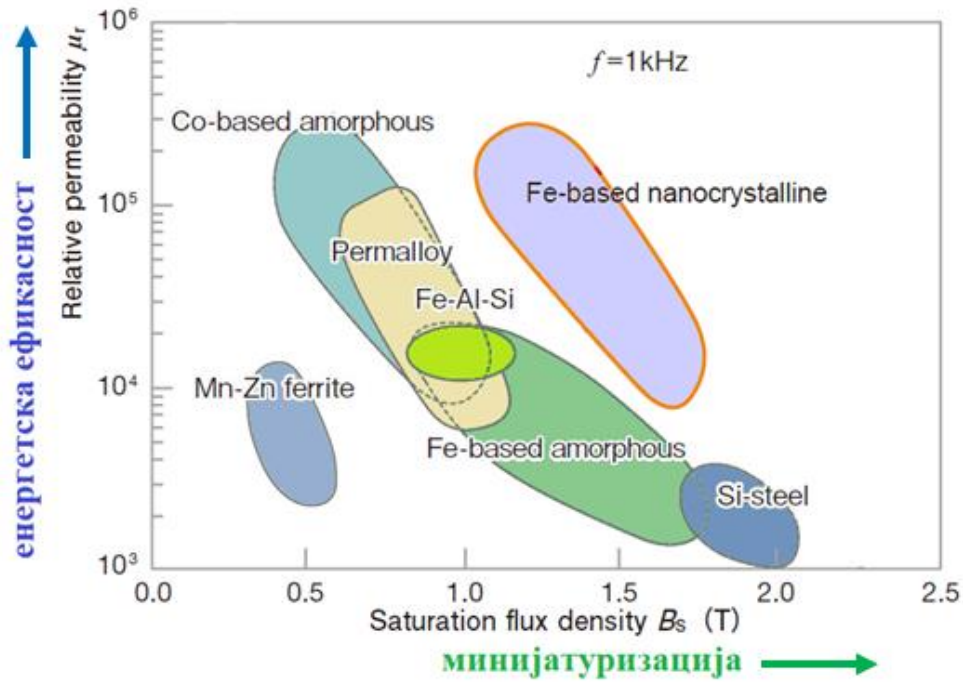
Слика 2-5. DSC криве ливених узорка легуре састава  $Fe_{65.5}Cr_4Mo_4Ga_4P_{12}C_5B_{5.5}$  у облику цилиндра: (а) за узорке пречника цилиндра од 1,5 mm и 1,8 mm при брзини загревања од 20 K/min, и (б) за узорак пречника цилиндра од 1,8mm - високотемпературни регион са процесом топљења ( $T_m$ ), прегревања и накнадног хлађења ( $T_l$ ) при брзини загревања 20 K/min и брзини хлађења 10 K/min [23].

## 2.2. Магнетно меке карактеристике феромагнетних аморфних жица

На слици 2-6 је приказана корелација релативне магнетне пермеабилности и магнетне индукције засићења  $B_s$  код свих класа магнетно меких материјала (@ 1 kHz). Аморфне легуре на бази кобалта имају ниске вредности магнетне индукције засићења али међу свим класама магнетно меких материјала поседују највише вредности магнетне пермеабилности (често око и изнад  $10^5$ ) што их између осталог сврстава међу кандидате за израду уређаја највише енергетске ефикасности. Обратно, аморфне легуре на бази гвожђа поседују ниже вредности магнетне пермеабилности, али их њихове високе вредности магнетне индукције засићења кандидују за уређаје са високим степеном минијатуризације.

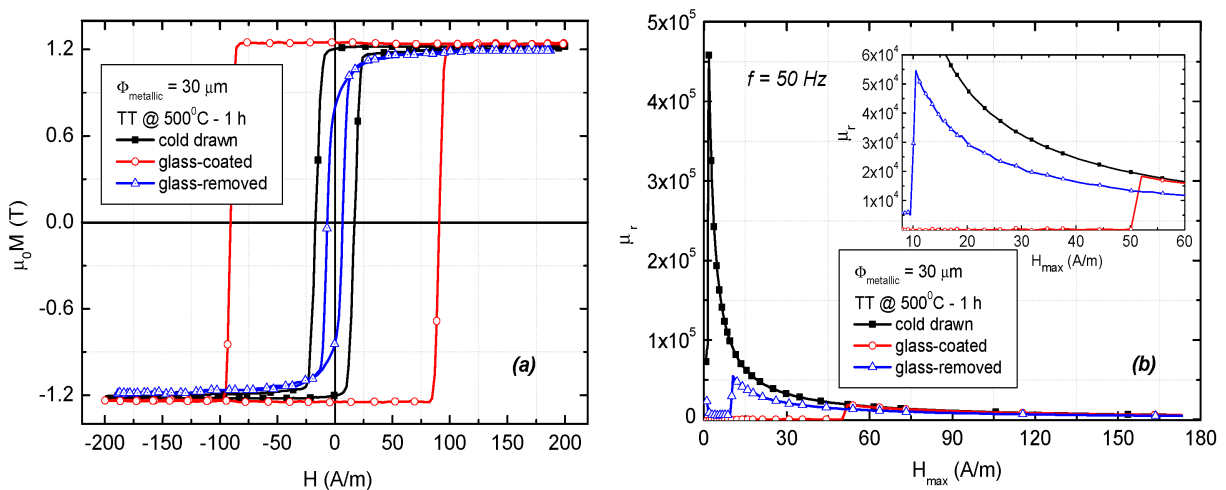
За достизање високих вредности промене импедансе феромагнетних жица под дејством спољашњег једносмерног магнетног поља (МИ-ефекат), неопходне су магнетно меке карактеристике аморфних легура (што ниже вредности коерцитивног поља  $H_c$  и што више вредности релативне магнетне пермеабилности  $\mu_r$ ).





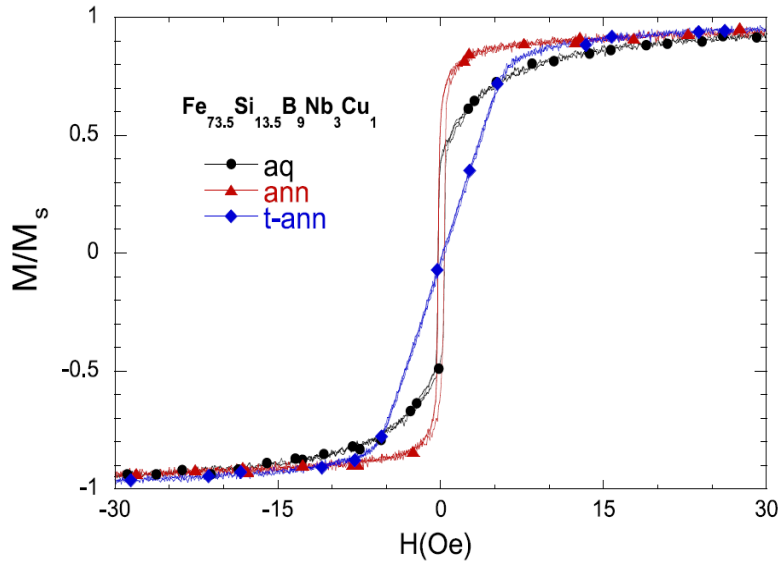
Слика 2-6. Корелација релативне магнетне пермеабилности  $\mu_r$  и магнетне индукције засићења  $B_s$  код свих класа магнетно меких материјала (@ 1 kHz).

Слика 2-7а приказује хистерезисне криве код ултратанких аморфних микрожица (метално језгро пречника  $30 \mu\text{m}$ ) легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$  пре и после уклањања стакленог омотача [24]. Структура са стакленим омотачем показује бистабилну криву са  $H_c \approx 85 \text{ A/m}$  (црвена крива), док је након уклањања омотача задржан пожељни бистабилни облик криве али са изузетно ниском коерцитивношћу од око свега  $10 \text{ A/m}$  (плава крива). Паралелно су праћене и промене релативне магнетне пермеабилности од спољашњег магнетног поља које након уклањања стакленог омотача достижу високе вредности од преко  $5 \times 10^4$ . (слика 2-7.б).



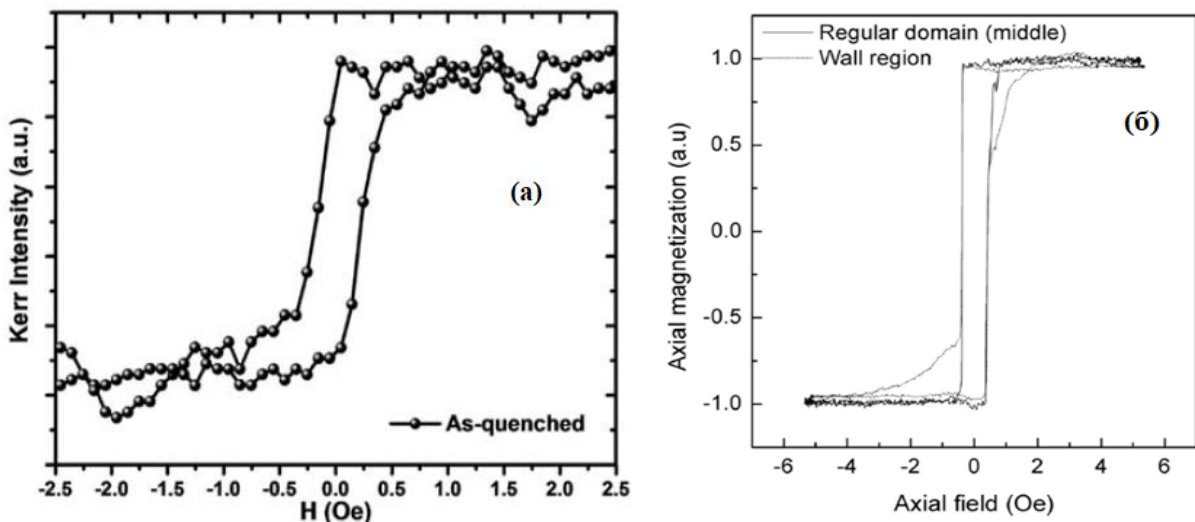
Слика 2-7. а) хистерезисне криве и б) зависност релативне магнетне пермеабилности од спољашњег магнетног поља код ултратанких аморфних микрожица (метално језгро пречника  $30 \mu\text{m}$ ) легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$  пре и после уклањања стакленог омотача [24].

На слици 2-8 је приказан ефекат одгревања на жице ове легуре, када се достиже нанокристална структура са додатним повећањем и магнетне пермеабилности и реланентног односа магнетизације  $M_r/M_s$  (тзв. Z-облик криве магнетног хистерезиса). Уз примену механичког истезања током одгревања (термомеханички третман) постиже се F-облик криве магнетног хистерезиса са ниским реланентним односом [25].



Слика 2-8. Утицај одгревања на криве магнетног хистерезиса код жица легуре  $Fe_{73.5}Si_{13.5}B_9Cu_1Nb_3$  (пречника  $98 \mu m$ ), нанокристална структура са Z-обликом хистерезиса (без напрезања) и F-обликом хистерезиса (са напрезањем) [25].

Криве са Z-обликом магнетног хистерезиса и са ниском коерцитивношћу су евидентирание и код аморфних жица легура на бази кобалта: слика 2-9.а легура  $Co_{69.25}Fe_{4.25}Si_{13}B_{13.5}Nb_1$  (пречник  $55 \mu m$ ,  $H_c \approx 0,125 Oe \approx 10 A/m$  [26]) и слика 2-9.б легура  $Co_{68.5}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  (пречник  $125 \mu m$ ,  $H_c \approx 0,25 Oe \approx 20 A/m$  [27]).



Слика 2-9. Z-облици кривих магнетног хистерезиса код аморфних жица легура на бази кобалта: а) легура  $Co_{69.25}Fe_{4.25}Si_{13}B_{13.5}Nb_1$  (пречника  $55 \mu m$ ,  $H_c \approx 10 A/m$  [26]) и б)  $Co_{68.5}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  (пречника  $125 \mu m$ ,  $H_c \approx 20 A/m$  [27]).

На основу напред наведених магнетних испитивања аморфних жица система Co-Fe-Si-B и Fe-Si-B-Cu-Nb јасно је да оба система легура поседују одличне магнетно меке карактеристике, што је први предуслов за евиденцију израженог МИ-ефекта који се затим може успешно користити за израду савремених магнетних сензора [28-33]. У табели 2-3 су приказани погодни састави и облици феромагнетних аморфних легура са израженим МИ-ефектом, уз нумеричке експерименталне податке при којима су добијене максималне вредности МИ-односа ( $H_{max}$ ,  $f_m$ ).

Табела 2-3. Састави и облици феромагнетних аморфних легура са израженим МИ-ефектом,  $H_{max}$  - вредност примењеног максималног спољашњег  $dc$  магнетног поља на МИ-елемент и  $f_m$ -радна фреквенција при којој је детектована максимална вредност МИ-односа.

Легура	Облик МИ-елемента	$H_{max}$ (kA/m)	МИ-однос (%)	$f_m$ (MHz)	Реф.
(Co <sub>94</sub> Fe <sub>6</sub> ) <sub>75</sub> Si <sub>10</sub> B <sub>15</sub>	жица	0,8	125	3,22	[34]
Co <sub>83.2</sub> Mn <sub>7.6</sub> Si <sub>5.9</sub> B <sub>3.3</sub>	жица	0,08	7,8	1	[35]
Fe <sub>73.5</sub> Si <sub>13.5</sub> B <sub>9</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3</sub>	жица	2	25,5	2	[36]
Co <sub>70</sub> Fe <sub>5</sub> Nb <sub>2.2</sub> Cu <sub>0.8</sub> Si <sub>15</sub> B <sub>7</sub>	трака	4	513	4	[37]
Fe <sub>71</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>14</sub> B <sub>8.5</sub> Cu <sub>1</sub> Nb <sub>3.5</sub>	трака	8	640	5	[37]
Fe <sub>84</sub> Zr <sub>7</sub> B <sub>8</sub> Cu <sub>1</sub>	трака	6	1100	4,6	[38]
Co <sub>70.3</sub> Fe <sub>3.7</sub> Cr <sub>3</sub> Si <sub>13</sub> B <sub>10</sub>	композит жица-полимер	4	470	10	[39]

Из наведеног прегледа се види да су у фокусу истраживања подједнако и магнетно меке легуре на бази кобалта [34, 35, 37, 39] и легуре на бази гвожђа [36-38] и то у оба облика (жице, траке). Важно је нагласити да се поред ових стандардних облика МИ-елемената све чешће истражују и композитне конфигурације, где се испитују комбинације аморфних легура са другим материјалима, као на пример са полимерном матрицом [39]. Поред наведених својстава, истраживања обухватају и димензије, осетљивост (на спољашње магнетно поље), опсег радних фреквенција и термичку стабилност испитиваног МИ-елемента.

### 2.3. Теоријски модел магнетоимпедансног ефекта

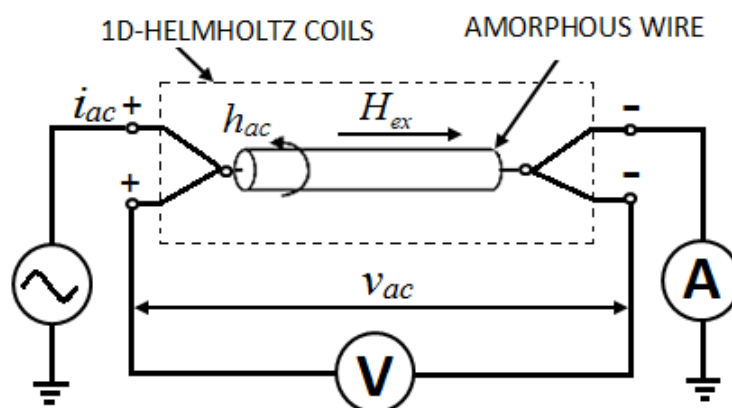
Један од најинтересантнијих физичких феномена који се може искористити за магнетне сензоре је магнетоимпедансни (МИ) ефекат уочен код аморфних или нанокристалних магнетно меких трака, жица или танких филмовима. Овај ефекат, примењен најпре код аморфних FeCoSiB жица [40, 41], омогућио је интензиван

развој сензора на бази МИ-елемената, који су данас у широкој примени код електронских компаса, ГПС навигација, сензора ротације, система безбедности, биомагнетних мерења и др.

У сензорској употреби су углавном две геометријске форме: цилиндрична (жице [42-44]) и планарна (траке, филмови [45-47]). Аморфне жице се могу користити са заштитним стакленим омотачем [48] или без омотача [49]. Високе вредности магнетне пермеабилности су неопходно својство при избору материјала за МИ-елементе, те су легуре на бази кобалта са тог становишта у предности у односу на легуре на бази гвожђа. За разлику од легура на бази кобалта које имају изванредне магнетно меке перформансе са потпуно аморфном структуром, легуре на бази гвожђа постижу своје одличне карактеристике након оптималних термомагнетних или термомеханичких третмана (током којих се формирају  $\alpha$ -Fe(Si) нанокристална зрна равномерно распоређена у аморфној матрици [2, 50]).

Импеданса узорка феромагнетног материјала је сложена (тј. вишестука) функција више параметара: зависи од магнетне предисторије узорка, електричних својстава материјала и геометрије узорка. Испитивања импедансе су дакле повезана са три параметра: оријентацијом и интензитетом спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$ , интензитетом и фреквенцијом  $f$  наизменичне струје  $i_{ac}$  која протиче кроз узорак [51]. Магнетоимпедансни ефекат је директно повезан са феноменом скин ефекта код феромагнетних материјала, тј. са променама у динамици процеса магнетнења. Те промене утичу на магнетну пермеабилност, а самим тим и на дубину продирања наизменичне струје кроз магнетни проводник са повећањем фреквенције [52]. Познато је да добри проводници са великом пермеабилношћу показују велики МИ ефекат. Поред тога, за наизменичну побуду високих фреквенција (реда од 1 MHz до 1 GHz) модификација дубине продирања (скин ефекта) и магнетне пермеабилности има јаку зависност од фреквенције примењене побуде, као и од спољашњег статичког магнетног поља. Услед вихорних струја ток наелектрисања је потиснут ка површини узорка, што доводи до повећања импедансе  $Z$ , док се примењеним магнетним пољем то потискивање модулише, односно мења се ефективна површина попречног пресека кроз коју протиче наелектрисање (при одређеној константној фреквенцији побуде). Дакле, велика пермеабилност и висока фреквенција смањују магнетну дубину продирања, док се примењеним магнетним пољем она повећава.

Импеданса  $Z$  је количник тренутних вредности наизменичног напона  $V_{ac}(t)$  и наизменичне струје  $i_{ac}(t)$  (слика 2-10).



Слика 2-10. Дефиниција магнетоимпедансе код феромагнетних аморфних жица.

Код узорка феромагнетног цилиндричног проводника полупречника  $a$  комплексна магнетоимпеданса је дата следећом једначином:

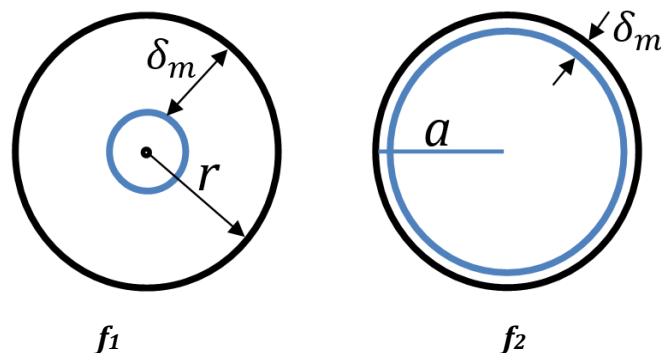
$$\underline{Z} = R + jX = \frac{1}{2} \cdot R_{dc} \cdot (ka) \cdot \frac{J_0(ka)}{J_1(ka)} \quad (1)$$

где су  $R_{dc}$  електрични отпор при једносмерном сигналу;  $R$  и  $X$  реални и имагинарни део импедансе  $\underline{Z}$ , респективно;  $J_0$  и  $J_1$  Беселове функције нултог и првог реда прве врсте,  $k = (1+j)/\delta_m$ ;  $j^2 = -1$  [53]. Овај модел магнетоимпедансе је изведен коришћењем Максвелових једначина и уз претпоставку линеарне зависности између магнетне индукције и магнетног поља  $B = \mu \cdot H$ .

На магнетној дубини продирања  $\delta_m$

$$\delta_m = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad (2)$$

код магнетно меких материјала са ниским вредностима специфичне електричне отпорности  $\rho$ , високим вредностима магнетне пермеабилности  $\mu$ , а при релативно високим радним фреквенцијама  $f$ , амплитуда вектора густине струје опада на  $1/e$  своје вредности уз површину узорка [54]. Слика 2-11 приказује смањење магнетне дубине продирања  $\delta_m$  са повећањем фреквенције ( $f_1 \ll f_2$ ), тј. утицај скин ефекта код феромагнетног цилиндричног проводника.

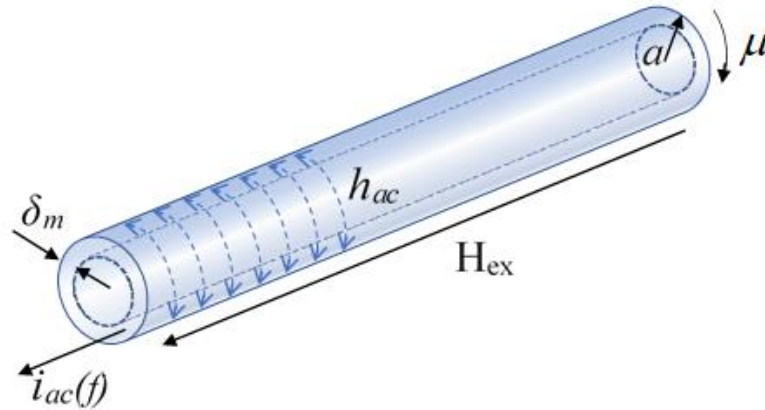


Слика 2-11. Смањење магнетне дубине продирања  $\delta_m$  са повећањем фреквенције ( $f_1 \ll f_2$ ), утицај скин ефекта код феромагнетног цилиндричног проводника.

Фреквенција при којој магнетна дубина продирања  $\delta_m$  постаје мања од полудебљине узорка (за траке дебљине  $d$  је  $\delta_m \leq d/2$  а код жица полупречника  $a$  је  $\delta_m \leq a$ ) се назива критична фреквенција [53, 55], тако да се при даљем повећању учестаности запажају феномени МИ-ефекта. Промене и осталих напред наведених физичких својстава ( $\rho$ ,  $\mu$ ) ће резултовати у изменама расподеле тока наелектрисања по попречном пресеку жице и утицати на измену импедансе.

Спољашње лонгитудинално  $dc$  магнетно поље  $H_{ex}$  и циркуларно  $ac$  магнетно поље  $h_{ac}$  (индуковано протоком наизменичне струје  $i_{ac}(t) = I_{cc} \cdot \sin(\omega t)$ ) утичу на промену магнетне пермеабилности  $\mu$ , тако да је импеданса феромагнетног цилиндричног проводника (у нашем случају аморфних жица) функција три

експериментална параметра  $Z = Z(H_{ex}, f, I_{cc})$ . На слици 2-12 је приказан феномен скин ефекта код феромагнетног цилиндричног проводног узорка.



Слика 2-12. Феромагнетни цилиндрични проводник полупречника  $a$  током праћења магнетоимпедансног ефекта са изменом магнетне дубине продирања  $\delta_m$  под дејством спољашњег лонгитудиналног  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$ .

Интензитет циркуларног  $ac$  магнетног поља  $h_{ac}$  је:

$$h_{ac}(r, t) = \frac{I_{cc} \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \cdot \sin \omega t = H_{ac} \cdot \sin \omega t \quad (3)$$

где је  $r$  радијална координата,  $0 < r \leq a$ , док интензитет поља на површини узорка-жице достиже вредност  $H_{ac} = I_{cc}/2\pi \cdot a$ . Током већине експеримената амплитуда струје  $I_{cc}$  је одржавана константном да би се омогућиле засебне анализе утицаја или радне фреквенције или интензитета лонгитудиналног  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$  (приликом варијација једне од ове две величине друга је одржавана константном).

Магнетоимпедансни (МИ) однос се најчешће дефинише као релативна промена модула импедансе  $|Z(H)|$  узорка (надаље у ознаци  $Z(H)$  што је пракса најреномиранијих светских издавача који публикују радове у области МИ-ефекта) са променом спољашњег  $dc$  магнетног поља  $(H)$  [7]:

$$\Delta Z/Z (\%) = 100 \% \cdot [|Z(H)| - |Z(H_{max})|] / |Z(H_{max})| \quad (4)$$

где је  $|Z(H_{max})|$  модул импедансе при максималном спољашњем магнетном пољу  $H_{max}$ . Узорак се најчешће позиционира лонгитудинално (у правцу спољашњег магнетног поља), тј. у центру система 1Д-Хелмхолцових калемова где је постигнута скоро потпуна хомогеност спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$ .

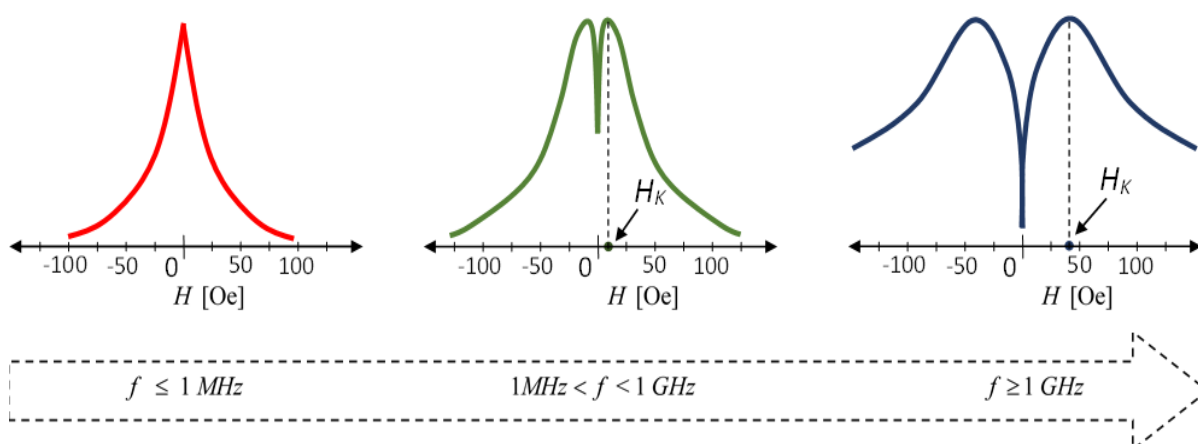
Утицај фреквенције  $f$  на магнетоимпедансни ефекат је повезан са фреквентним зависностима физичких феномена и генерално се дели на три подопсега [56]:

1. Ниско фреквентни опсег од око 10 kHz до око 1 MHz у којем је доминантан ефекат померања доменских зидова на процес циркуларног магнећења (дубина магнетног продирања  $\delta_m$  постаје мања од полудебљине узорка; али код узорка облика цилиндра и даље има вредности  $\delta_m \leq a$ );
2. Средње фреквентни опсег од око 1 MHz до око 1 GHz (магнетна дубина продирања  $\delta_m$  је знатно мања од полудебљине узорка, тј. код узорка облика

цилиндра  $\delta_m \ll a$ ) у којем су главни утицаји скин-ефекта и ротације вектора магнетизације као механизми процеса циркуларног магнећења (померање доменских зидова је блокирано услед индукованих вихорних струја), и

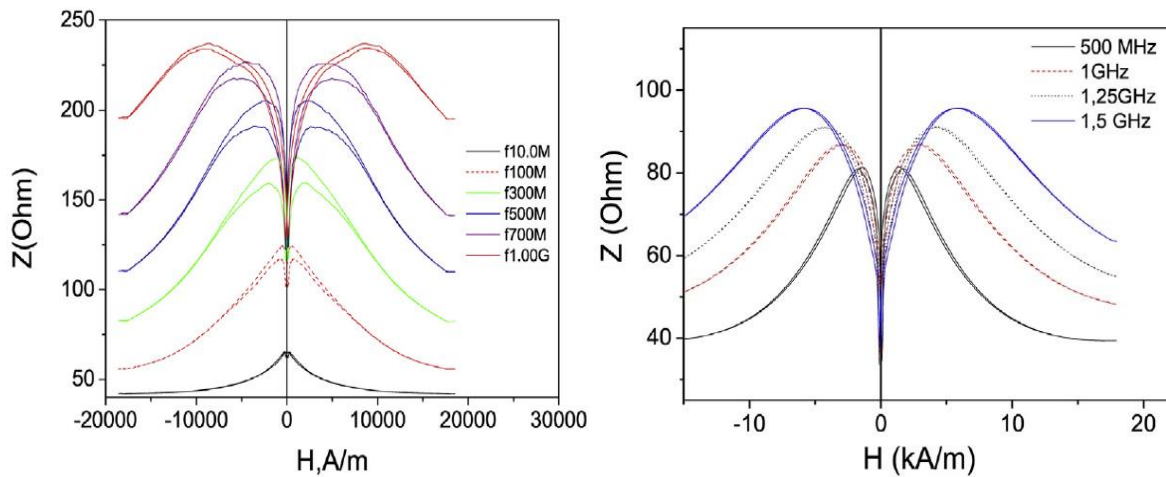
3. Високо фреквентни опсег изнад 1 GHz када жироманетни ефекат доминантно утиче на ротацију вектора магнетизације и максимум пермеабилности се јавља при великим вредностима спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$ . Магнетизација поприма прецесиони карактер а промене импедансе су услед феромагнетне резонанције (мале промене спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$  доводе до велике промене импедансе  $Z$ ).

Утицај фреквенције  $f$  на облике кривих МИ-односа, при измени спољашњег магнетног поља  $H_{ex}$  од негативних до позитивних вредности ( $-H_{max} < H_{ex} < +H_{max}$ ) је приказан на слици 2-13. У ниско фреквентном опсегу облик криве има карактеристичну форму тзв. једног пика (енгл. single peak – слика 2-13.а), док се са повећањем фреквенције у средње фреквентном опсегу од око реда MHz развија облик криве са тзв. двоструким пиком (енгл. double peak – слика 2-13.б) позиционираним на вредностима магнетног поља анизотропије  $\pm H_k$ . Стално повећање фреквенције ће имати као последицу и константно померање ових пикова ка све вишим вредностима поља анизотропије, да би при веома високим фреквенцијама реда GHz (слика 2-13.в) попримиле облике кривих са слабије израженим максимумима МИ-односа позиционираних на  $\pm H_k$ .



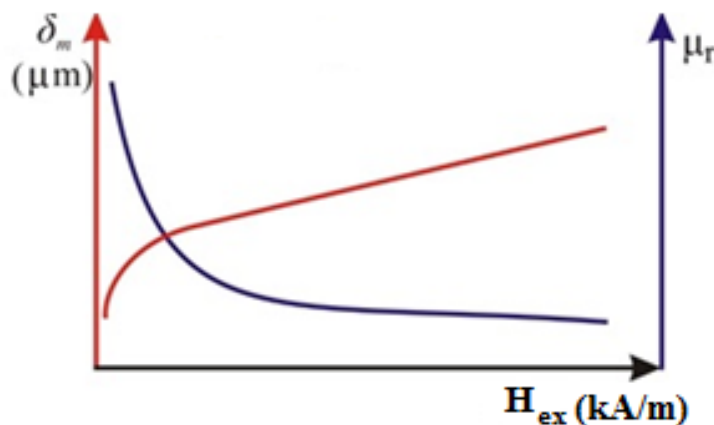
Слика 2-13. Утицај фреквенције  $f$  на магнетоимпедансни ефекат: облици кривих МИ-односа за: а) ниско, б) средње и в) високофреквентни опсег.

На слици 2-14 су презентована експериментална испитивања утицаја фреквенције  $f$  на облике кривих модула импедансе код микрожице аморфне легуре  $Co_{69.2}Fe_{4.1}Si_{13.8}B_{11.8}C_{1.1}$  са заштитним стакленим омотачем и то у виша два фреквентна подопсега (истраживања су спроведена при максималној вредности спољашњег магнетног поља од око 17 A/m [57]). При радној фреквенцији од 10 MHz је евидентиран развој пика на ниским вредностима магнетног поља анизотропије  $H_k$ , који се затим са повећањем фреквенције помера ка вишим вредностима  $H_k$ . Коначно, када фреквенције достигну веома високе вредности (реда гигахерца) евидентирају се широки пикови магнетоимпедансе (максимум пермеабилности је тада при великим вредностима спољашњег магнетног поља).



Слика 2-14. Утицај фреквенције  $f$  на магнетоимпедансни ефекат: облици кривих модула импедансе за микрожице са стакленим омотачем: а) аморфна легура  $\text{Co}_{69.2}\text{Fe}_{4.1}\text{Si}_{13.8}\text{B}_{11.8}\text{C}_{1.1}$  ниско, средње и високо фреквентни опсег и б) аморфна легура  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_{3.85}\text{Ni}_{1.45}\text{Si}_{14.5}\text{B}_{11.5}\text{Mo}_{1.7}$  средње и високо фреквентни опсег [57].

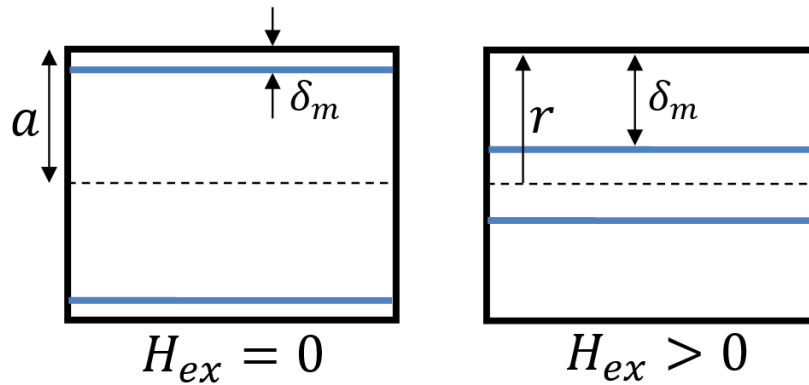
Утицај спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$  на магнетну дубину продирања  $\delta_m$  и релативну магнетну пермеабилност  $\mu_r$  је приказан на слици 2-15 [7]. С обзиром да магнетна пермеабилност  $\mu_r$  опада са порастом магнетног поља (при константној фреквенцији  $f$  и при константној амплитуди струје напајања  $I_{cc}$ ), долази до ефекта повећања магнетне дубине продирања, што коначно узрокује смањење импедансе узорка жице  $Z(H_{ex})$ .



Слика 2-15. Промена магнетне дубине продирања  $\delta_m$  и релативне магнетне пермеабилности  $\mu_r$  у зависности од спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$  код цилиндричног узорка магнетно меког материјала [7].

С обзиром на зависност магнетне дубине продирања  $\delta_m$  од магнетне пермеабилности (која се смањује при повећању интензитета спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$  - слика 2-15), коначно се добија повећање магнетне дубине продирања ( $H_{ex} \uparrow$ ,  $\delta_m \uparrow$ , при константној радној фреквенцији - слика 2-16) а самим тим и смањење импедансе  $Z$  ( $Z \downarrow$ ) узорка феромагнетне аморфне металне жице.





Слика 2-16. Повећање магнетне дубине продирања  $\delta_m$  при повећању интензитета спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$ .

Дакле, магнетоимпедансни ефекат у узорку феромагнетног материјала је преко скин ефекта у корелацији са магнетном дужином продирања  $\delta_m$ . Како фреквенција наизменичне струје расте  $i_{ac}(f, t) = I_{cc} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$ , дубина магнетног продирања  $\delta_m = (\rho / \pi \cdot \mu \cdot f)^{1/2}$  опада, а проток струје се помера према површини узорка. Самим тим је и површина кроз коју тече наелектрисање смањена, а у жици она има облик прстена са површином:

$$S_{\delta_m}(H_{ex}, f) = a^2 \cdot \pi - [a - \delta_m(H_{ex}, f)]^2 \cdot \pi \quad (5)$$

и са евидентном последицом повећања импедансе.

Имајући у виду зависност дубине продирања  $\delta_m$  од магнетне пермеабилности која опада са повећањем интензитета магнетног поља  $H_{ex}$ , добија се повећање дубине продирања. Дакле, смањење магнетоимпедансе узорка аморфне жице  $Z(H_{ex}, f) = MR(H_{ex}, f) + j \cdot MX(H_{ex}, f)$  (при константној радној фреквенцији) је евидентно.

Полазећи од уобичајене дефиниције електричног отпора  $R = \rho \cdot l / S$ , однос електричног отпора при једносмерној побуди  $R_{dc}$  и магнетоотпорности  $MR(H_{ex}, f)$  је обрнуто пропорционалан односу површина области кроз које постоји проток наелектрисања:

$$\frac{R_{dc}}{MR(H_{ex}, f)} = \frac{S_{\delta_m}(H_{ex}, f)}{S_{dc}} = \frac{a^2 - a^2 \cdot \left[1 - \frac{\delta_m(H_{ex}, f)}{a}\right]^2}{a^2} \quad (6)$$

Коначно, једначина за израчунавање магнетне дубине продирања је:

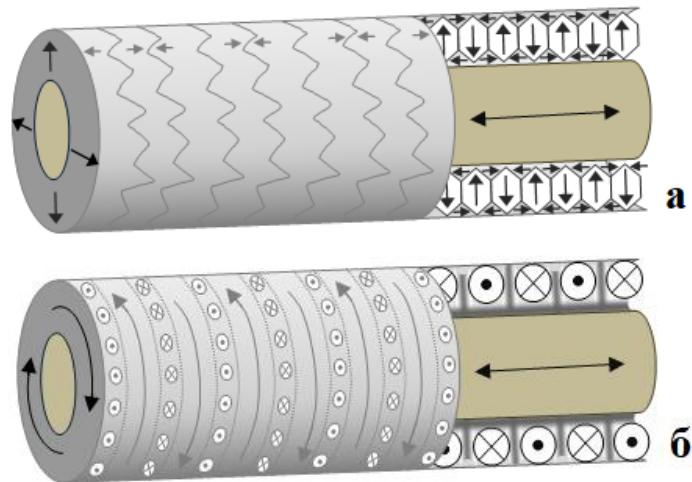
$$\delta_m(H_{ex}, f) = a \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{R_{dc}}{MR(H_{ex}, f)}}\right) \quad (7)$$

тј.  $\delta_m(H_{ex}, f)$  се може израчунати коришћењем мерних података за  $R_{dc}$  и  $MR(H_{ex}, f)$  добијених при променама спољашњег магнетног поља и фреквенције.

У условима израженог утицаја магнетног поља на дубину продирања, може се изразити релативна магнетна пермеабилност жице  $\mu_w(H_{ex}, f)$  у зависности од магнетне дубине продирања  $\delta_m(H_{ex}, f)$  и магнетореактансе  $MR(H_{ex}, f)$  [58]:

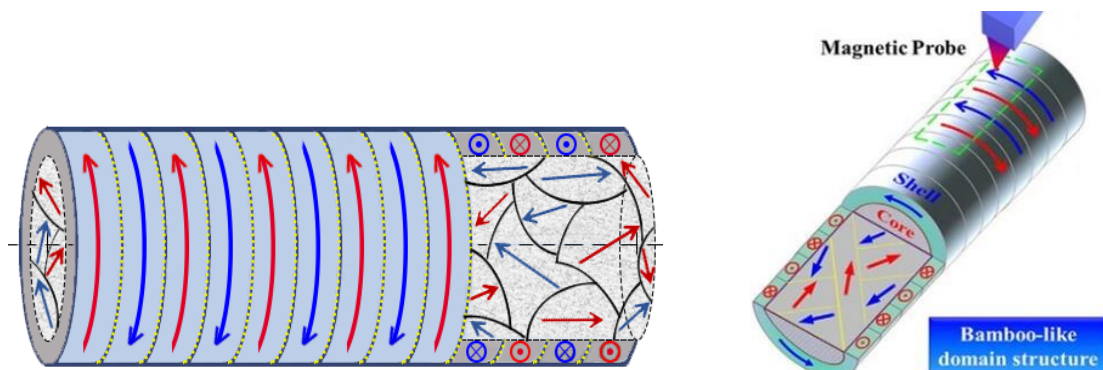
$$\mu_w(H_{ex}, f) = \frac{2 \cdot a \cdot MX(H_{ex}, f)}{\mu_0 \cdot f \cdot l \cdot \delta_m(H_{ex}, f)} \quad (8)$$

На сам МИ-ефекат директно утиче интеракција магнетног поља са магнетним доменима чија је структура последица унутрашњих напрезања насталих током поступка брзог хлађења растопа којим се добијају аморфне легуре (у облику траке или жице). Услед магнетоеластичне интеракције, код аморфних феромагнетних жица са позитивним коефицијентом магнетострикције (слика 2-17.а, легуре на бази гвожђа  $\lambda_s > 0$  и најчешће реда величине од око  $10^{-5}$ ) доменска структура се састоји од лонгитудинално намагнетисаног језгра (по оси жице) и радијалног спољашњег омотача са магнетним доменима у конфигурацији лавиринта и цик-цак зидовима на целој површини, што указује на присуство тракастих домена са незатвореним или затвореним магнетним флуksom.



Слика 2-17. Шематски приказ структуре магнетних домена код феромагнетних аморфних жица услед дејства спољашњег магнетног поља: а) жице са позитивним коефицијентом магнетострикције (легуре на бази гвожђа  $\lambda_s > 0$ ) и б) жице са негативним коефицијентом магнетострикције (легуре на бази кобалта  $\lambda_s < 0$ ).

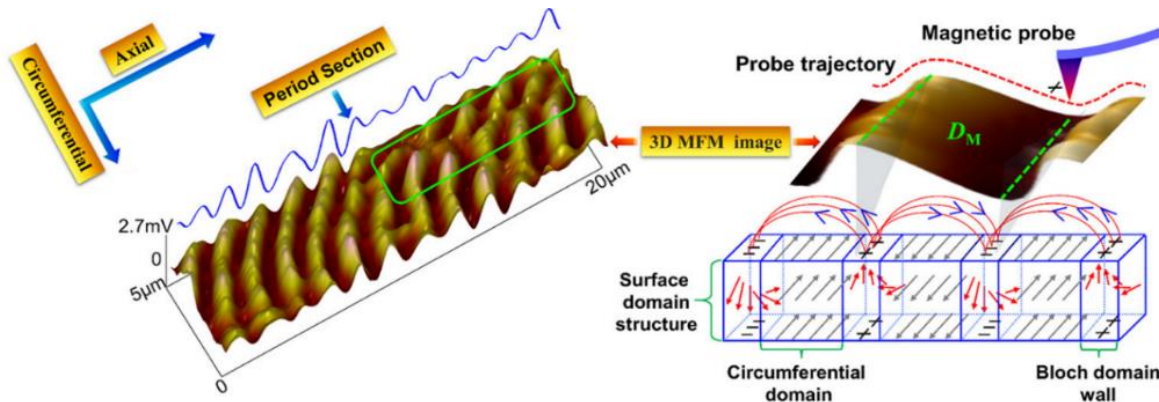
Код аморфних феромагнетних жица са негативним коефицијентом магнетострикције (легуре на бази кобалта  $\lambda_s < 0$  и најчешће реда величине од око  $10^{-6}$ ) доменска структура се састоји од унутрашњих магнетних домена, окружених циркуларним доменима наизменично распоређеним дуж правца жице, слично површини бамбуса (слика 2-17.б „bamboo domain structure“ [59]).



Слика 2-18. Модел структуре магнетних домена код аморфне жице са негативним коефицијентом магнетострикције (легуре на бази кобалта), а) конфигурација без дејства спољашњег магнетног поља  $H_{ex}$  и б) испитивање површинских магнетних домена техником микроскопа магнетних сила.

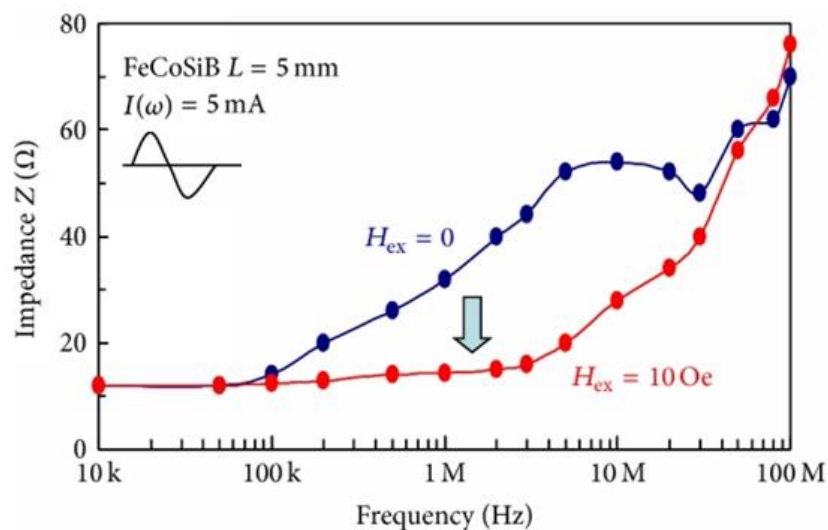
Циркуларна структура на површини жице је окарактерисана са наизменичним распоредом домена са супротно оријентисаним векторима магнетизације ( $\uparrow, \downarrow$ ) раздвојених са равним (тзв.  $180^\circ$ ) доменским зидовима. При довољно високим фреквенцијама (када је дубина продирања  $\delta_m$  довољно мала) површински део материјала са оваквим распоредом магнетних домена доминантно утиче на импедансу узорка (слика 2-18).

Експериментална евиденција структуре магнетних домена на површини аморфних феромагнетних жица добијена 3Д-техником микроскопа магнетних сила је презентована на слици 2-19 [60].



Слика 2-19. Експериментална евиденција структуре магнетних домена добијена 3Д-техником микроскопа магнетних сила на површини аморфних феромагнетних жица састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.25}\text{B}_{15.25}$  са негативним коефицијентом магнетострикције (легури на бази кобалта  $\lambda_s < 0$ ) [60].

Најјаснију експерименталну потврду самог МИ-ефекта приказује фреквентна зависност модула импедансе код узорка жице аморфне легуре  $\text{FeCoSiB}$  (дужине од 5 mm) без дејства ( $H_{\text{ex}} = 0$ ) и при дејству спољашњег једносмерног магнетног поља ( $H_{\text{ex}} = 10 \text{ Oe} \approx 800 \text{ A/m}$ ), која је приказана на слици 2-20 [61].

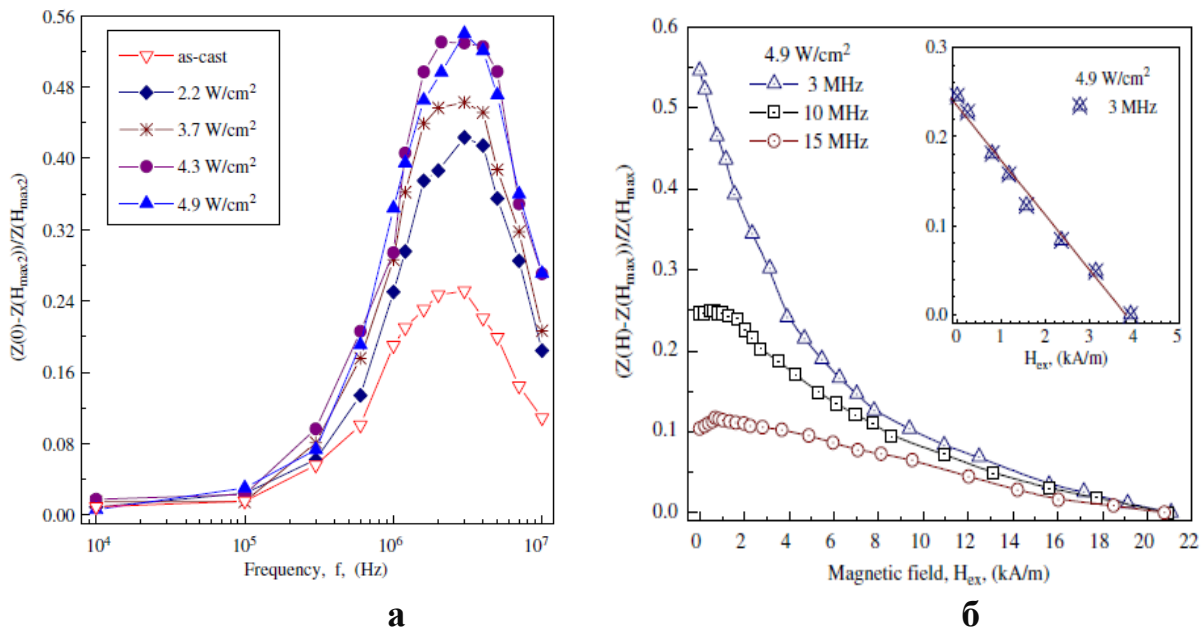


Слика 2-20. Фреквентна зависност модула импедансе код жице аморфне легуре  $(\text{Fe}_{0.06}\text{Co}_{0.94})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  без дејства спољашњег једносмерног магнетног поља  $H_{\text{ex}} = 0$  и при дејству спољашњег магнетног поља интензитета  $H_{\text{ex}} = 10 \text{ Oe} \approx 800 \text{ A/m}$  (синусна побуда амплитуде 5 mA,  $f \in [10 \text{ kHz}, 100 \text{ MHz}]$ ) [61].

У оба случаја (са дејством и без дејства  $H_{ex}$ ) са порастом фреквенције (струјне побуде синусног облика) регистрован је очекивани стални пораст импедансе. Међутим, утицај спољашњег магнетног поља  $H_{ex}$  евидентно доводи до смањења модула импедансе (при радним фреквенцијама већим од критичне фреквенције - од око 50 kHz) и то путем ефекта повећања магнетне дубине продирања  $\delta_m$  при дејству спољашњег магнетног поља  $H_{ex}$  (повећањем магнетне дубине продирања се повећава површина области кроз коју постоји проток наелектрисања, што коначо доводи до смањења модула импедансе).

МИ-ефекат је експериментално потврђен 1994. године код аморфних FeCoSiB жица, а затим и код осталих магнетно меких материјала - нанокристалних трака и филмова легура система FINEMET Fe-M-Cu-Si-B ( $M = Nb, Mo, Cr, Zr, V$ ). Каснији интензиван развој аморфних масивних металних легура (мултикомпонентни феромагнетни системи на бази гвожђа [62], где се као пилот-техника процене сколоности ка аморфизацији користи техника брзог хлађења растопа легуре на ротирајућем диску - производња аморфних трака дебљине преко 100  $\mu m$ ) је довео до истраживања планарних МИ-елемената код система Fe-(Al, Ga)-(P, C, B, Si, Ge).

За контролу МИ-ефекта користе се и промене специфичне електричне отпорности  $\rho$  аморфних легура применом методе специјално пројектованих термичких третманима с циљем добијања материјала за конструкцију магнетних сензора високе осетљивости [63-65]. На слици 2-21 су приказана испитивања магнетоимпедансног ефекта код трака аморфне легуре  $Fe_{72}Al_5Ga_2P_{11}C_6B_4$ , пре и након термомагнетних третмана струјним импулсима (одгревање на бази Џуловог ефекта) [55].

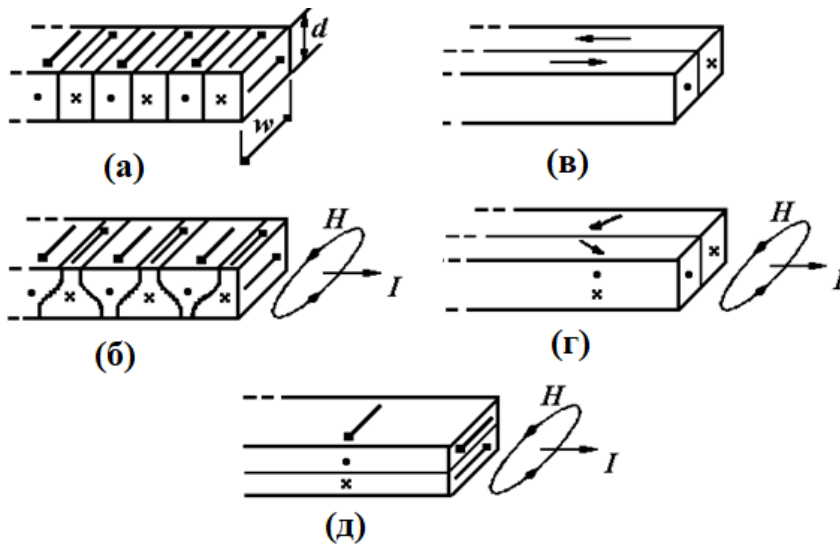


Слика 2-21. Зависности МИ-односа код траке аморфне легуре  $Fe_{72}Al_5Ga_2P_{11}C_6B_4$  пре и након третмана струјним импулсима (одгревање на бази Џуловог ефекта): а) фреквентне зависности ( $@H_{max} \approx 21$  kA/m) и б) зависности од јачине магнетног поља за три фреквенције (3 MHz, 10 MHz и 15 MHz) код оптимално одгреваног узорка са 4,9 W/cm<sup>2</sup> (на инсерту је приказана линеарност МИ-односа при радној фреквенцији од 3 MHz) [55].

При фреквенцији од 3 MHz евидентиран је МИ-однос од око 56% након оптималног одгревања при површинској снази одгревања од око 4-5 W/cm<sup>2</sup>, што је око три пута повећање у односу на МИ-однос код неодгреваног узорка испитиване аморфне траке.

За разлику од монотоног опадања уоченог при  $f \leq 3$  MHz, крива добијена на 10 MHz показује благо колено (запажа се почетак развоја пика), док је даље повећање фреквенције праћено еволуцијом слабог пика на 15 MHz. Овакав развој пика указује на пораст доприноса механизма ротације вектора магнетизације који се појављује изнад фреквенције релаксације зидова магнетних домена. Дакле, за разлику од константног смањења уоченог на нижим радним фреквенцијама, МИ-профили трака који поседују јасан пик позициониран при вредности поља магнетне анизотропије  $H_k$ , указују на доминантан механизам ротације вектора магнетизације.

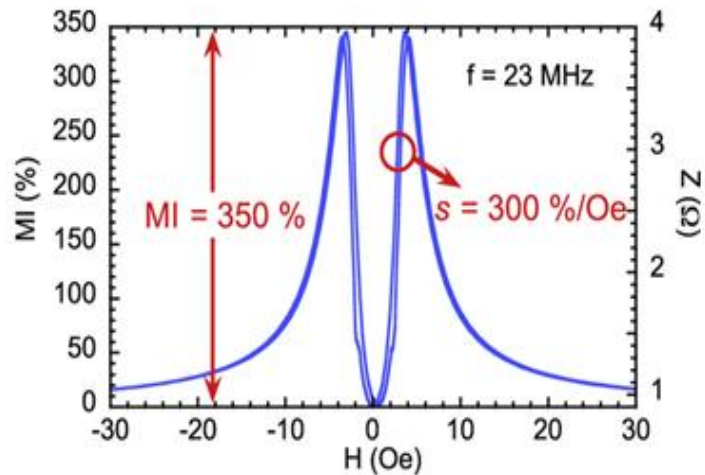
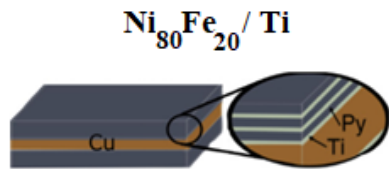
Развој трансверзалне магнетне анизотропије код аморфних трака изложених одгревању једносмерним струјним импулсима који истовремено креирају трансверзално (циркуларно) магнетно поље је приказано на слици 2-22. Закључује се да је финална структура са попречно оријентисаним магнетним доменима креирана dc струјним импулсима (тј. термомагнетним третманима) независна од почетне доменске структуре аморфних трака.



Слика 2-22. Утицај генерисаног dc магнетног поља  $H$  на измену структуре магнетних домена аморфних трака током третмана dc струјним импулсима (одгревање на бази Џуловог ефекта): (a) и (б) трансверзална, (v) и (г) лонгитудинална почетна оријентација домена, (e) постигнута финална доменска структура креирана струјним импулсима независно од почетне доменске структуре.

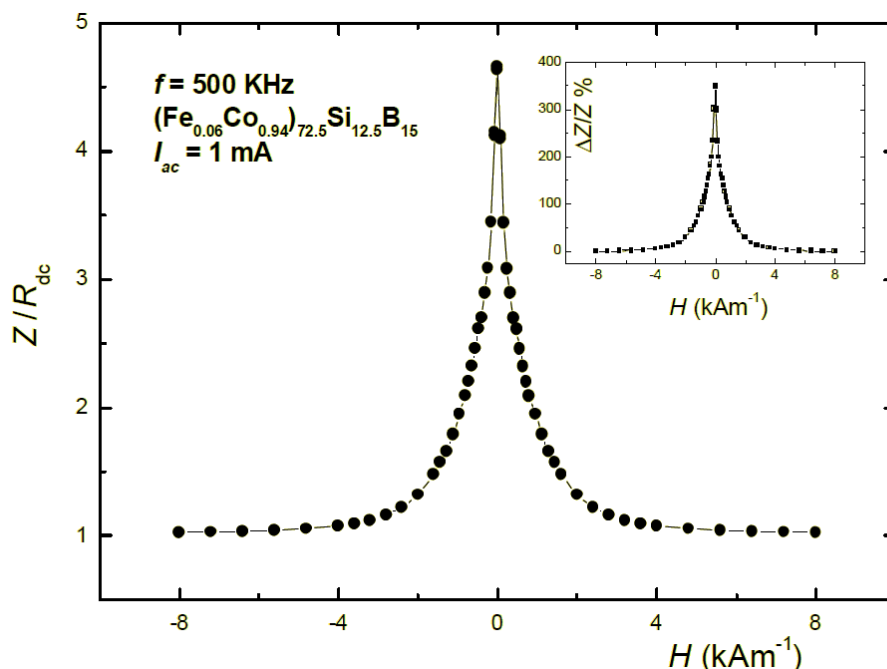
Планарна геометрија сендвич структуре танких филмова легуре  $Ni_{80}Fe_{20}/Ti$  приказана на слици 2-23, такође поседује високе вредности МИ-односа од око 350% (при фреквенцији од 23 MHz). Ову структуру карактерише и изузетно висока вредност осетљивости МИ-елемента од око  $s = 300\%/Oe$  ( $1 Oe \approx 80 A/m$ ) при ниским вредностима спољашњег једносмерног магнетног поља ( $H_{ex} < 5 Oe \approx 400 A/m$ ) [66].

сендвич структура са више слојева танких филмова (магнет/проводник/магнет)



Слика 2-23. Зависности МИ-односа сендвич структуре танких филмова легуре  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Ti}$  (лево), приказана је и радна тачка максималне осетљивости МИ-елемента од око  $s = 300\%/Oe$  (при фреквенцији од 23 MHz- десно) [66].

Потребно је нагласити и да поједине интерпретације експерименталних резултата МИ-ефекта користе и количник модула магнетоимпедансе  $Z(H_{ex})$  и електричне отпорности при једносмерној побуди  $R_{dc}$ , с обзиром на практичне примене МИ-елемената за конструкцију магнетних сензора као електричне компоненте. Овим количником ( $Z(H_{ex})/R_{dc}$ ) се анализира процентуално увећање импедансе током експеримента повећања интензитета спољашњег  $dc$  магнетног поља (при одговарајућој константној радној фреквенцији и константној амплитуди струје која протиче кроз испитивани узорак). На слици 2-24 су приказане обе верзије интерпретације експерименталних резултата и  $(Z(H_{ex})/R_{dc})$  и  $\Delta Z/Z$  код аморфне легуре  $(\text{Fe}_{0.06}\text{Co}_{0.94})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  [56].



Слика 2-24. Нормализација модула магнетоимпедансе  $Z(H_{ex})$  са електричном отпорности при једносмерној побуди  $R_{dc}$  код аморфне легуре  $(\text{Fe}_{0.06}\text{Co}_{0.94})_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  у нискофреквентном региону при 500 kHz [56].

При сатурацији МИ-ефекта (када интензитет спољашњег магнетног поља достиже највеће вредности, тј. када је  $H_{ex} \approx H_{max}$ ) у нискофреквентном региону овај количник достиже јединичну вредност  $Z(H_{max})/R_{dc} = [(k \cdot a) \cdot J_0(k \cdot a)]/[2 \cdot J_1(k \cdot a)] \approx 1$ . Тада магнетна дубина продирања има вредности приближно једнаке полупречнику аморфне жице ( $\delta_m \approx a$ ) и проток наелектрисања је практично по целом попречном пресеку узорка.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

У овом поглављу су презентовани спроведени експерименти на испитиваним феромагнетним аморфним жицама. Најпре су презентоване методе добијања аморфних металних жица брзим хлађењем растопа легура, а затим су приказане две основне експерименталне методе које се прво спроводе над управо добијеним-изливеним узорцима: рендгеноструктурна анализа за проверу достигнуте структуре (дифракција X-зрака, XRD X-Ray Diffraction) и диференцијална термијска анализа (DTA Differential Thermal Analysis) за процену термичке стабилности аморфних легура. Потом је приказана метода скенирајуће електронске микроскопије са енергетском дисперзивном спектроскопијом (SEM/EDS - Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy) којом је испитивана микроструктурна и хемијска карактеризација аморфних легура. Коначно, презентована су испитивања електричних карактеристика аморфних жица мерењем модула магнетоимпедансе у зависности од фреквенције и спољашњег магнетног поља, које представљају и централна истраживања спроведена у оквиру ове докторске дисертације.

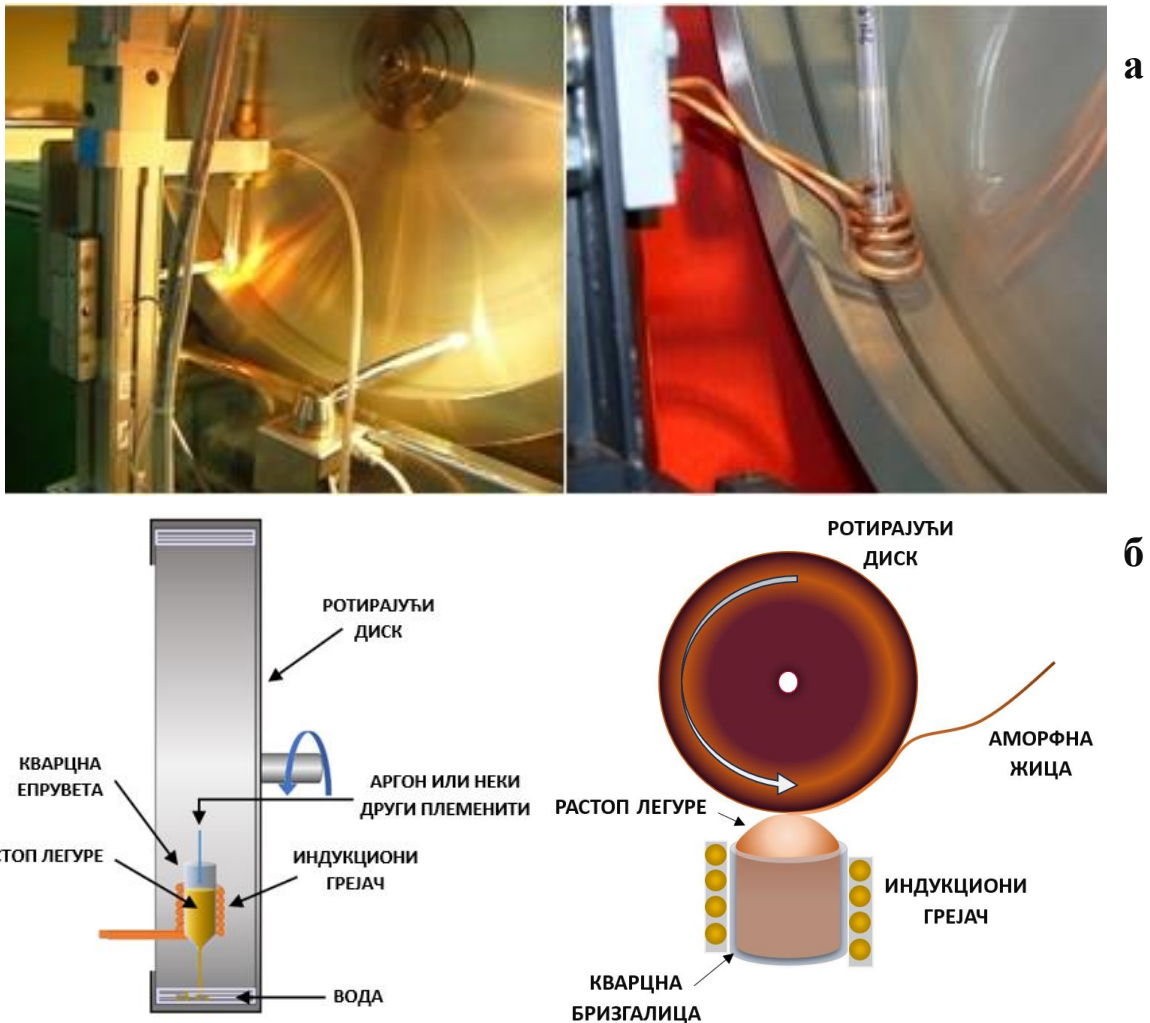
#### 3.1. Поступци добијања аморфних металних жица брзим хлађењем растопа

Аморфне жице металних легура је могуће добити путем неколико технолошких поступака.

1. Брзим хлађењем растопа на унутрашњој површини ротирајућег (најчешће бакарног или челичног цилиндра - melt spinning), током којег центрифугална сила омогућава контакт растопа са површином диска где услед брзине хлађења од око  $10^4$ - $10^6$  K/s растоп очвршћава и формирају се жице феромагнетних легура између  $100\ \mu\text{m}$  и  $200\ \mu\text{m}$  у пречнику [67]. Узорци аморфних жица на бази гвожђа испитиваних у овој докторској дисертацији - легура из система FINEMET Fe-M-Cu-Si-B (M=Nb) састава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  су управо произведени овом технологијом. Коришћењем спољашње површине ротирајућег диска за хлађење растопа се производе узорци аморфних легура у облику трака. Модификацијом ове методе, којом се очврсла жица креће кроз растоп стакла, добијају се аморфне жице са металним језгрома (пречника око  $50\ \mu\text{m}$ ) уз заштитни стаклени омотач (дебљине око  $30\ \mu\text{m}$ ) [68].



2. Брзим хлађењем растопа у ротирајућем слоју воде (in rotating water quenching) који се налази на унутрашњој површини цилиндра, током којег центрифугална сила омогућава контакт воде са површином диска. Процес очвршћавања растопа се одиграва унутар ротирајућег слоја воде чиме се достижу брзине хлађења од око  $10^5$ - $10^6$  K/s и обликују жице од 30  $\mu\text{m}$  до 300  $\mu\text{m}$  у пречнику. Димензије жице зависе од пречника отвора стаклене ампуле са растопом легуре и притиска инертног гаса – најчешће аргона, којим се растоп истискује. Аморфне жице на бази кобалта састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  испитиване у овој докторској дисертацији су управо произведене овим поступком у Националном Институту за истраживање и развој техничке физике у Јашију, Румунија (слика 3-1.а [69]).
3. Екстракцијом растопа легуре (слика 3-1.б), током којег се контактом веома оштре спољне ивице ротирајућег диска са растопом омогућава његово очвршћавање и формира жица [70]. За разлику од претходне две технологије, овај поступак омогућава достизање највеће брзине хлађења од око  $10^6$  K/s и производњу аморфних микрожица, тј. узорака са нешто мањим пречником, обично између 30  $\mu\text{m}$  и 60  $\mu\text{m}$  [71].



Слика 3-1. Поступак а) производње аморфних металних жица брзим хлађењем растопа легуре у ротирајућем слоју воде на унутрашњој површини цилиндра [69] и б) принципи хлађења растопа у ротирајућем слоју воде и екстракције растопа.

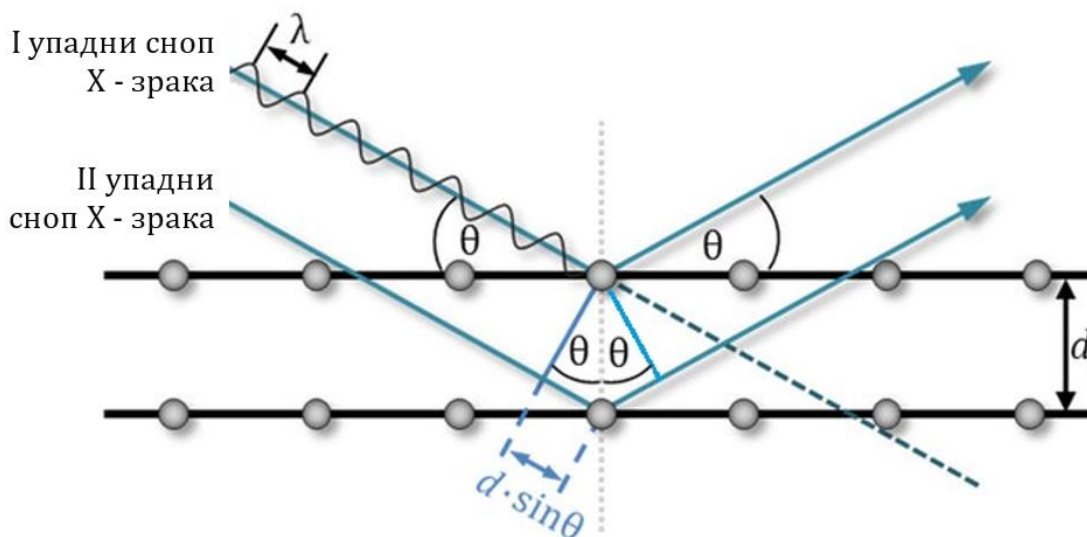
### 3.2. Структурна карактеризација материјала дифракцијом X-зрачења XRD

Рендгеноструктурна испитивања (XRD X-Ray Diffraction)) узорка жица су спроведена у Лабораторији за теоријску физику и физику кондензоване материје Института за нуклеарне науке ВИНЧА – Института од националног значаја Републике Србије. Експерименти су спроведени на уређају Philips PW 1050 који користи  $\text{Cu-K}\alpha$  зрачење таласне дужине  $\lambda = 0.154 \text{ nm}$  са Bragg–Brentano геометријом фокусирања снопа X-зрачења, при чему је корак мерења износио  $0.05^\circ$  са задржавањем детектора по кораку од 1 s. За евиденцију карактеристичних рефлексија коришћене су интернационалне еталонске JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) рендгенолошке картице.

Провера аморфности узорка легура добијених технологијом брзог хлађења растопа (било да су у облику трака или жица) се обавља на основу Bragg-овог закона о разлици пређених путева при дифракцији рендгенског зрачења таласне дужине  $\lambda$  [72]:

$$z \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (9)$$

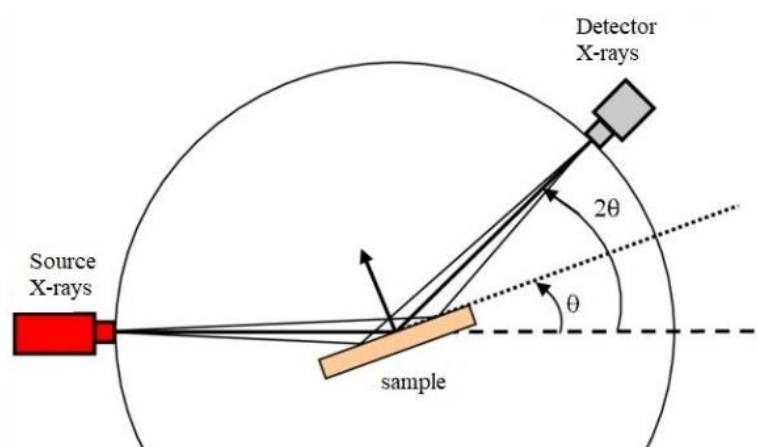
где је  $z$  ред интерференционих максимума X-зрачења (рефлектовани таласи су тада у фази),  $d$  је растојање између равни кристалне решетке на којој настају ефекти интерференције, а  $\theta$  је дифракциони угао између снопа X-зрачења и кристалографских равни узорка (слика 3-2).



Слика 3-2. Bragg - ов принцип интерференције при дифракцији X-зрачења [72].

Детектор рендгенског снопа броји дифрактване зраке у функцији угла  $2\theta$  између упадног и дифрактованог таласа. Угаона брзина ротације носача узорка се подешава према дефинисаним условима извођења експеримента [73]. Приликом припреме испитиваног узорка потребно је водити рачуна да он буде позициониран у равни носача узорка. На слици 3-3 је приказан уређај Philips PW 1050 са Bragg-

Brentano геометријом фокусирања снопа X-зрачења приликом одређивања кристалографских параметара испитиваних узорака аморфних жица.



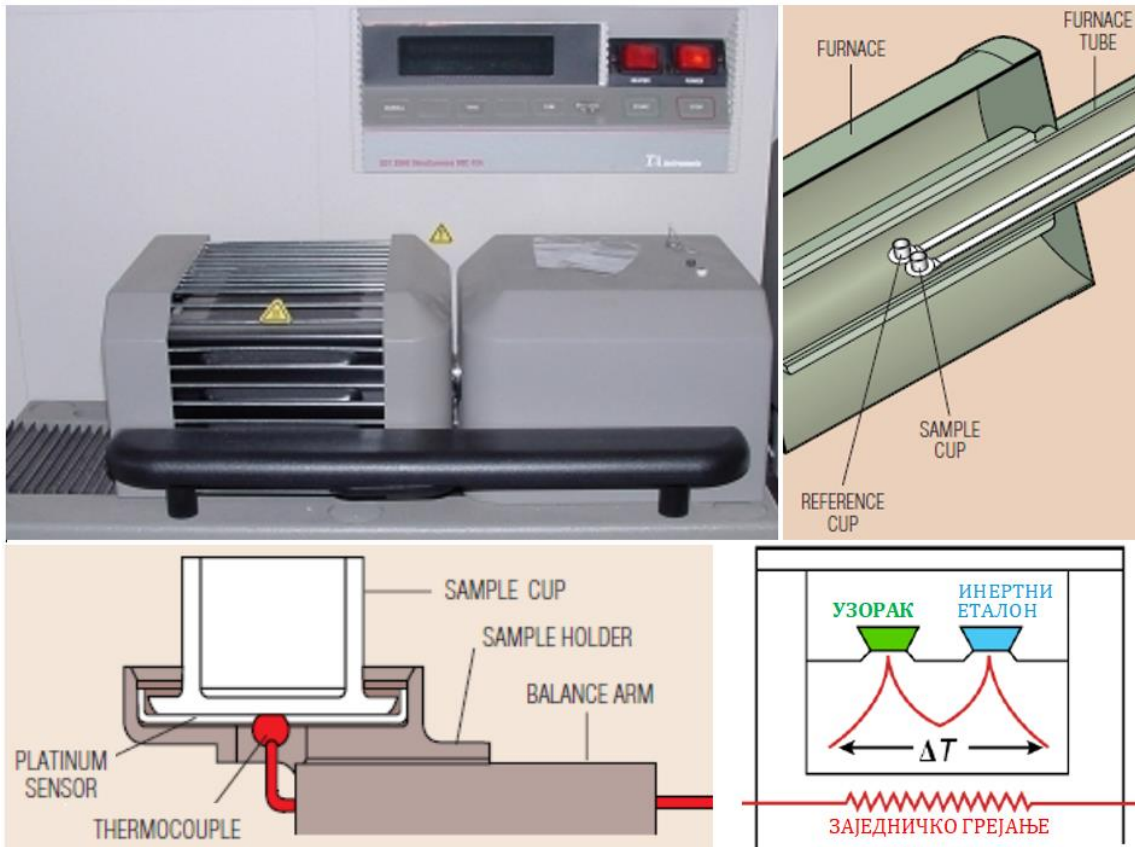
Слика 3-3. Уређај Philips PW 1050 са Bragg–Brentano геометријом фокусирања снопа при дифракцији X-зрачења.

### 3.3. Испитивање термичких својстава аморфних легура диференцијалном термијском анализом DTA

Експерименти диференцијалне термијске анализе су спроведени на Факултету за физичку хемију Универзитета у Београду на уређају *TA Instruments DTA SDT 2960*. Мерења су обављена у температурском интервалу од собне температуре до максималне темепратуре од 700 °C, у заштитној атмосфери проточног хелијума која се користи ради спречавања нежељеног процеса оксидације на површини испитиваних узорака аморфних металних легура у облику жица.

На слици 3-4 је приказана DTA ћелија са позицијама испитиваног и референтног узорка у условима заједничког грејања. Током експеримента се прати температурска разлика  $\Delta T$  (између термички активног узорка и инертног еталона)

настала услед различитих физичко-хемијских процеса који се одигравају код испитиваног узорка. Реално, мери се разлика термоелектромоторних сила – ТЕМС код два еквивалентна термопара позиционирана уз посуде носача узорка и носача еталона.



Слика 3-4. Уређај TA Instruments DTA SDT 2960 за обављање испитивања термичких својстава материјала са приказаним позицијама испитиваног узорка и инертног еталона [74].

Диференцијална термијска анализа се користи за испитивања термичких својстава материјала познатог хемијског састава, што је и био случај код испитиваних феромагнетних жица аморфних легура. Најчешће се прати температурска област у којој се одиграва егзотермни процес кристализације, тј. процењује се област температурске стабилности легуре уколико се не жели да се термичким третманом изазове процес кристализације, већ се само жели иницирати процес структурне релаксације који се одиграва при нижим температурама одгревања.

### 3.4. Скенирајућа електронска микроскопија са енергетском дисперзивном спектроскопијом SEM/EDS

Микроструктурна и хемијска карактеризација испитиваних аморфних легура је спроведена коришћењем скенирајућа електронске микроскопије са енергетском дисперзивном спектроскопијом (SEM/EDS-Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) (слика 3-5). Експерименти су спроведени у Лабораторији за електронску микроскопију Пољопривредног факултета Универзитета у Београд, на уређају SEM JEOL JSM-6390 LV опремљеним са додатком за EDS анализу Oxford Instruments X-MaxN.

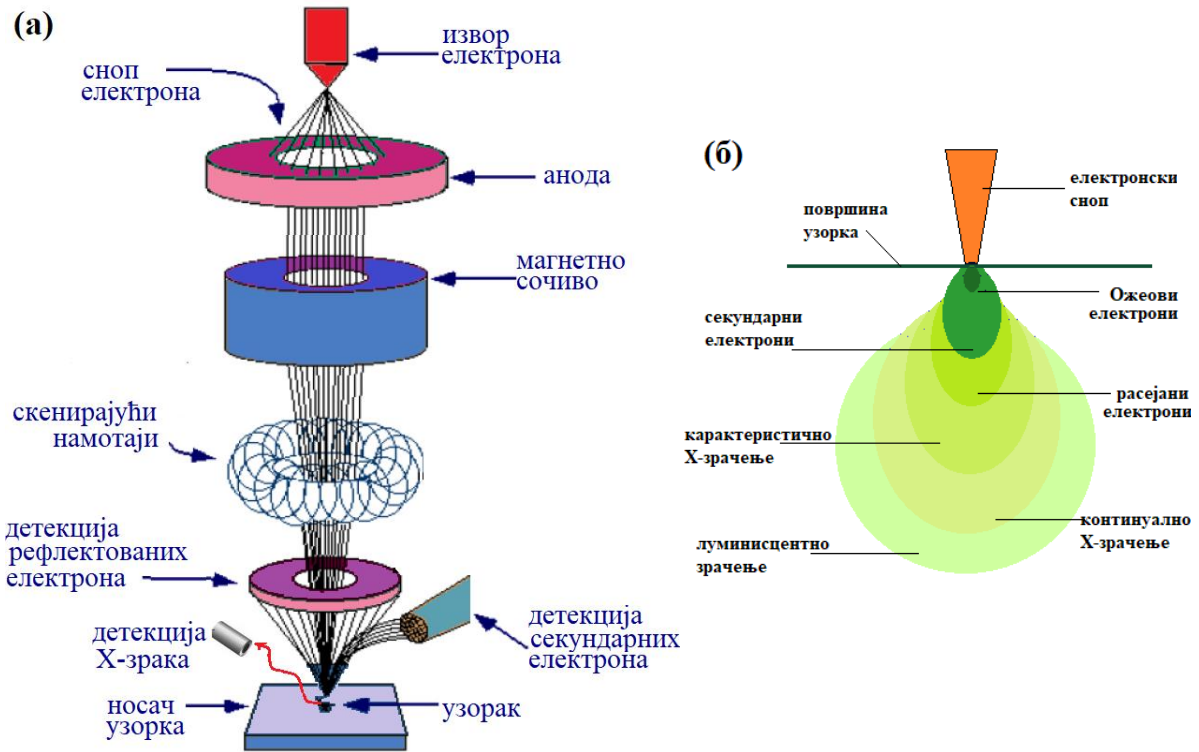


Слика 3-5. Уређај за скенирајућу електронску микроскопију JEOL JSM-6390 LV.

Скенирајућа електронска микроскопија (SEM) поседује могућности испитивања површинске морфологије и микроструктурне карактеризације и испод микронских димензија. Интеракција која се одвија између упадног електронског снопа и чврстог узорка резултује у емисији расејаних електрона, секундарних електрона и карактеристичног X-зрачења које омогућава анализу хемијског састава испитиваног узорка (EDS) [75].

Електронски извор микроскопа формира снап електрона који надаље пролази кроз три система сочива на путу ка узорку (слика 3-6.а). Емитовани снап најпре пролази кроз сочива за кондензовање која формирају узак снап електрона, а потом кроз скенирајуће намотаје који омогућавају кретање снопа по површини узорка и коначно кроз објектив који снап фокусира на испитивану материју. Интеракција електрона на површини узорка доводи до више генерисаних сигнала које примају одговарајући детектори, а затим се сигнали појачавају и обликују.

Слика 3-6.б илуструје интеракцију између снопа електрона и слоја уз површину испитиваног узорка. Рефлектовани електрони и секундарни електрони са користе за генерисање SEM микрографије, док се карактеристично X-зрачење користи за EDS анализу.



Слика 3-6. а) Шематски приказ скенирајуће електронске микроскопије, и б) интеракција између снопа електрона и слоја уз површину узорка при којој се генерише више сигнала.

При спроведеним испитивањима узорци аморфних жица су (након сечења и фиксирања на носач) направани танким слојем злата ради елиминације нагомилавања негативног наелектрисања на површини узорка. Убрзање упадног снопа електрона је постигнуто применом максималног напона од 30 kV, а за анализу микроструктуре коришћена су увећања слике до 6000x.

### 3.5. Мерење магнетоимпедансе

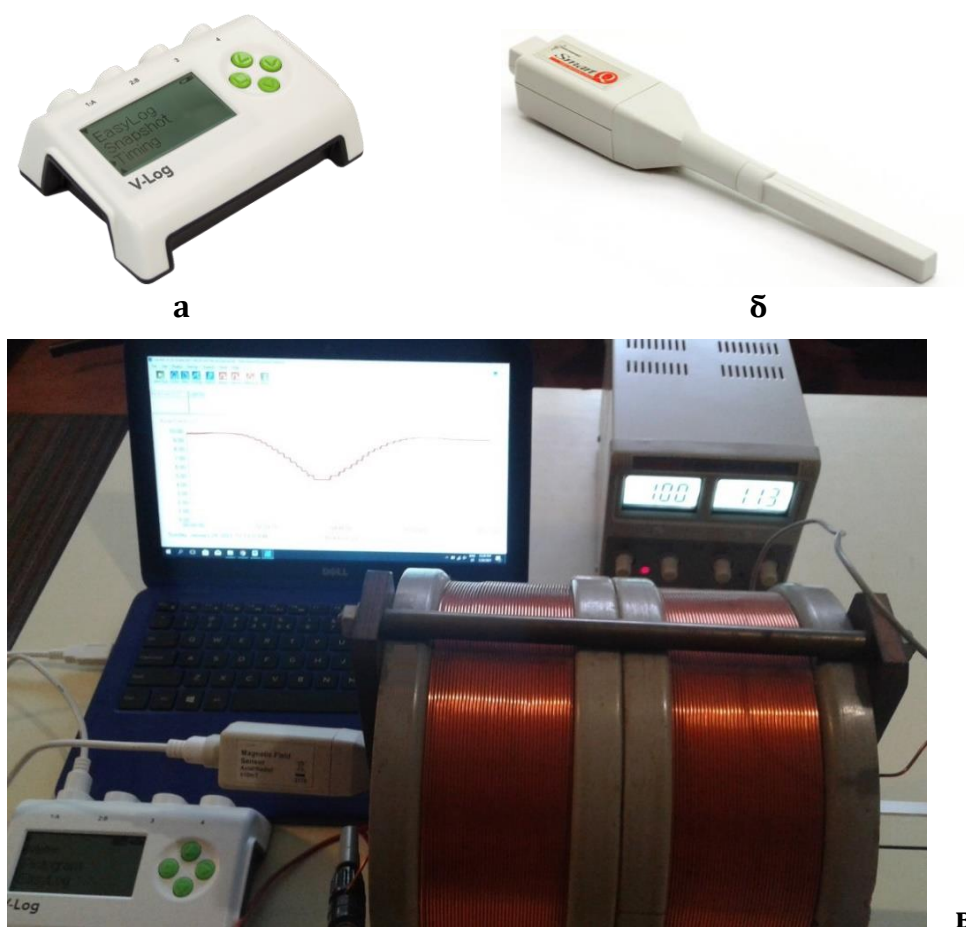
Мерење магнетоимпедансе је изведено у хомогеном магнетом пољу генерисаном помоћу 1Д-Хелмхоцових калемова при лонгитудиналној оријентацији МИ-елемента. Мерења у фреквентном опсегу до 5 MHz су спроведена у Лабораторији за сензорику на Факултету техничких наука у Чачку при Здруженој Лабораторији за савремене материјале САНУ, док су мерења у фреквентном опсегу од 1 MHz до 12 MHz обављена у Лабораторији за електромагнетну компатибилност на Војнотехничком институту у Београду.

### 3.5.1 Извор једносмерној магнејној поља - 1Д Хелмхолцови калемови

Систем Хелмхолцових калемова је конструисан у Здруженој Лабораторији САНУ на Техничком факултету у Чачку према моделу два спрегнута соленоида са више слојева навојака [76]. Провера хомогености једносмерног магнетног поља у централној зони Хелмхолцових калемова је спроведена поређењем нумеричких вредности јачине магнетног поља добијених на основу теоријских израза за јачину магнетног поља код два еквивалентна вишеслојно мотана соленоида позиционирана на заједничкој лонгитудиналној оси.

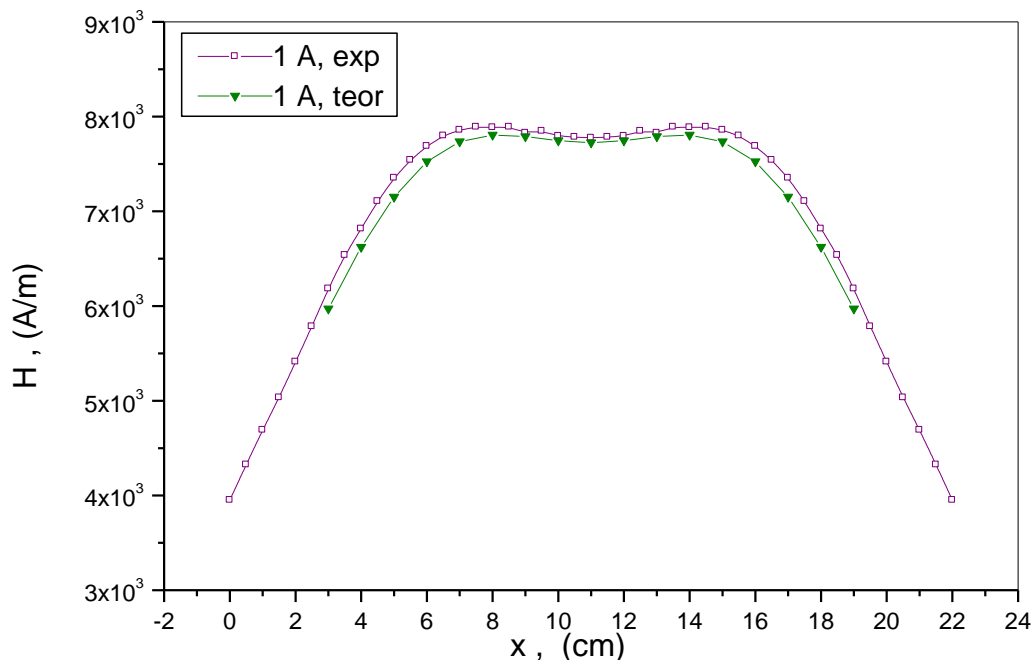
На овај начин процењена хомогеност магнетног поља у централном делу калемова је око 99,73%.

Поред овога, спроведено је и поређење вредности јачине магнетног поља по оси Хелмхолцових калемова добијених експериментом са вредностима одређених напред описаним теоријским прорачуном. У ту сврху су изведени експерименти мерења јачине магнетног поља на оси Хелмхолцових калемова уз коришћење опреме компаније Data Harvest: дата логер V-Log (слика 3-7.а - лево), сензор магнетног поља (до  $\pm 10$  mT) (слика 3-7.б - десно) и одговарајућег софтвера EasySense-Data Harvest [77].



Слика 3-7. а) Дата логер V-Log, б) сензор магнетног поља (до  $\pm 10$  mT) и в) експеримент провере интензитета магнетног поља по оси 1Д-Хелмхолцових калемова (Лабораторија за сензорику ФТН Чачак).

На слици 3-8 су презентоване упоредне вредности јачина магнетног поља по оси Хелмхоцових калемова измерених сензором магнетног поља и добијених теоријским прорачуном (при вредности једносмерне струје која протиче кроз редну везу соленоида од 1 А).



Слика 3-8. Поређење вредности јачине магнетног поља по осима Хелмхолцових калемова измерених током експеримента ( $\square$ ) и добијених теоријским прорачуном ( $\blacktriangledown$ ).

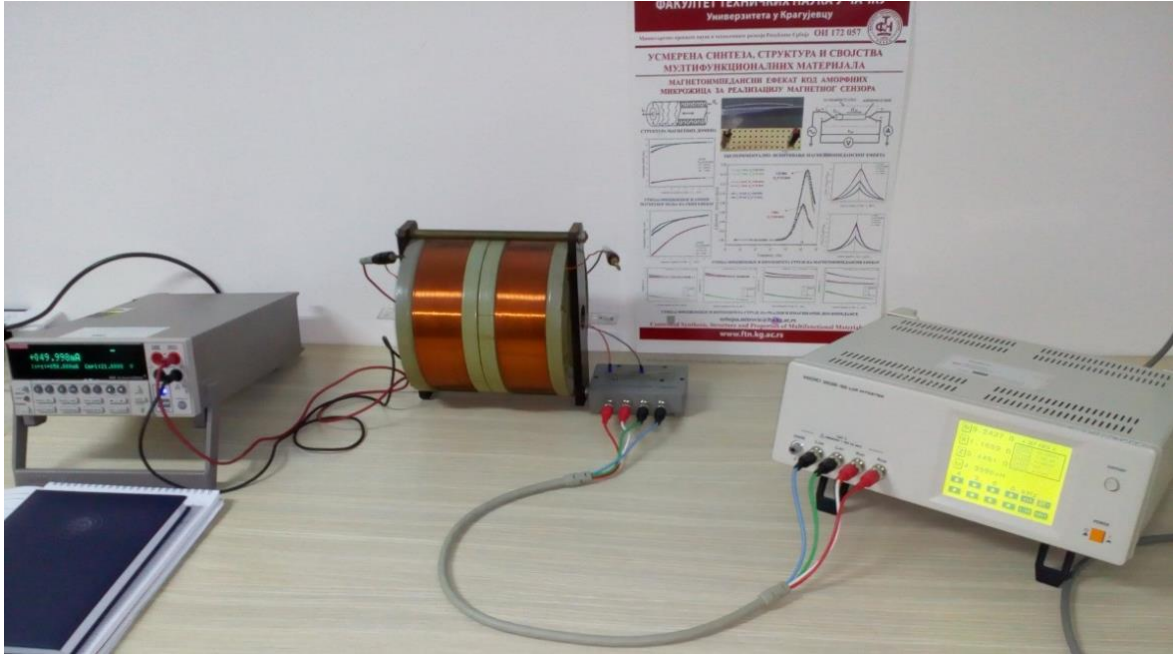
У централној зони калемова (где се позиционирају испитивани МИ-елементи аморфних феромагнетних жица) неслагање вредности јачина магнетног поља добијених експериментом са вредностима одређеним на основу теоријских прорачуна је свега 0,3%.

### 3.5.2 Мерења магнетоимпедансе на LCR-мешру

Импеданса испитиваних узорака аморфних жица дужине око 17 mm, мерена је по методи четири тачке помоћу инструмента LCR Hi-TESTER HIOKI 3532-50, у фреквентном опсегу од 50 Hz до 5 MHz у Лабораторији за сензорику Факултета техничких наука у Чачку. Током експеримената амплитуда наизменичне струје  $I_{cc}$  је мењана у опсегу од 3 mA до 10 mA при чему је интензитет циркуларног ас магнетног поља  $h_{ac}$  на површини узорака аморфних жица пречника  $2 \cdot a$  достигао вредност  $h_{ac} = I_{cc} / 2 \cdot \pi \cdot a$ . Струја кроз редну везу 1Д-Хелмхолцових калемова је обезбеђена помоћу висококвалитетног извора напајања - инструмент Keithley Series 2400 SourceMeter.

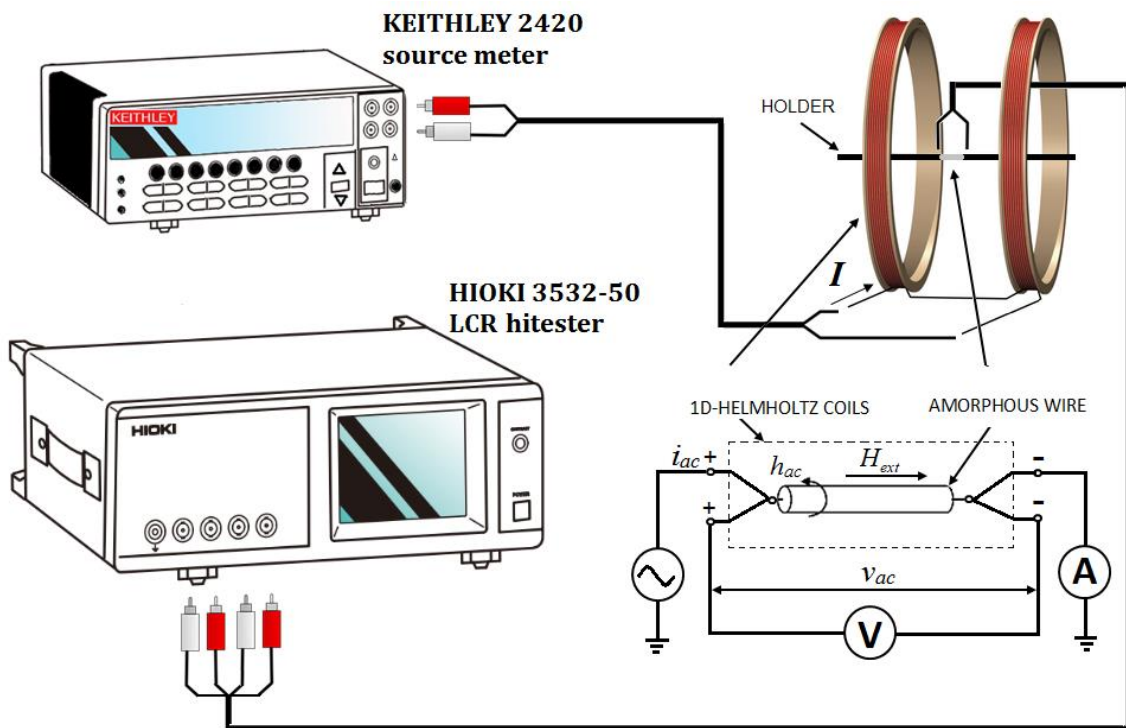
На слици 3-9 је приказана експериментална поставка за мерење магнетоимпедансе узорака аморфних феромагнетних жица у систему 1Д-Хелмхолцових калемова.





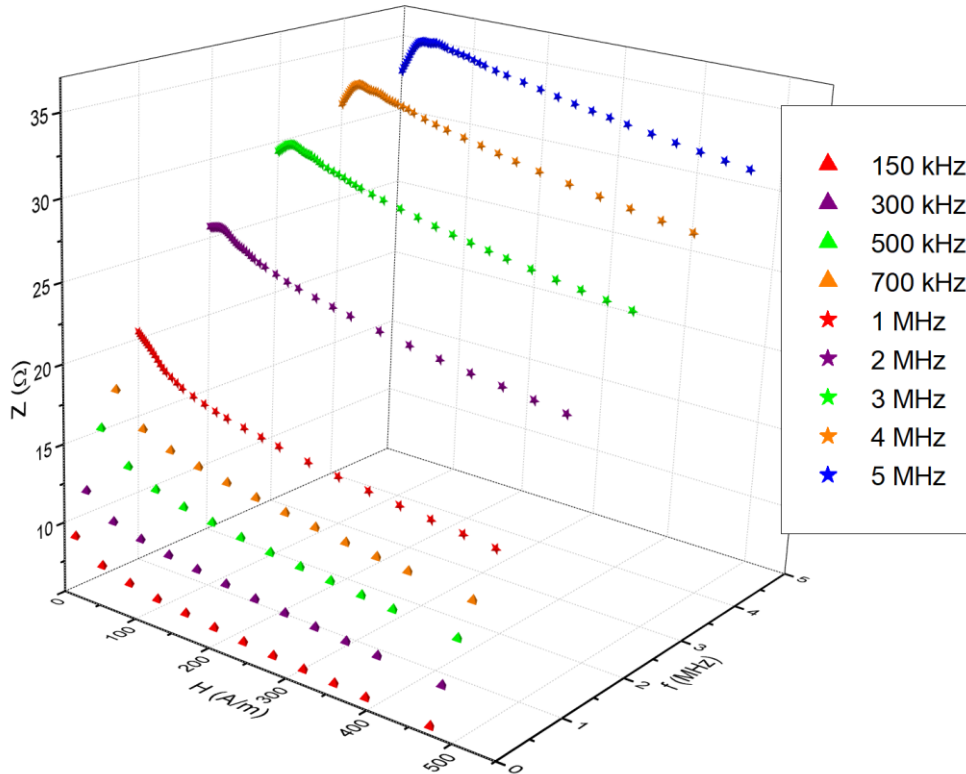
Слика 3-9. Лабораторијска поставка експеримента мерења магнетоимпедансе по методи четири тачке у хомогеном магнетом пољу генерисаном помоћу 1Д-Хелмхолцових калемова.

Шема везе лабораторијске поставке експеримента мерења магнетоимпедансе аморфних жица по методи четири тачке у хомогеном магнетом пољу генерисаном помоћу 1Д-Хелмхолцових калемова је приказана на слици 3-10.



Слика 3-10. Шема везе лабораторијске поставке експеримента мерења магнетоимпедансе аморфних жица по методи четири тачке у хомогеном магнетом пољу генерисаном помоћу 1Д-Хелмхолцових калемова.

Резултати мерења модула магнетоимпедансе  $Z(H_{ex}, f)$  по методи четири тачке код жице аморфне легуре  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  су приказани на слици 3-11 ( $f \in [150 \text{ kHz}, 5 \text{ MHz}] @ H_{max} = 463 \text{ A/m}$ ).



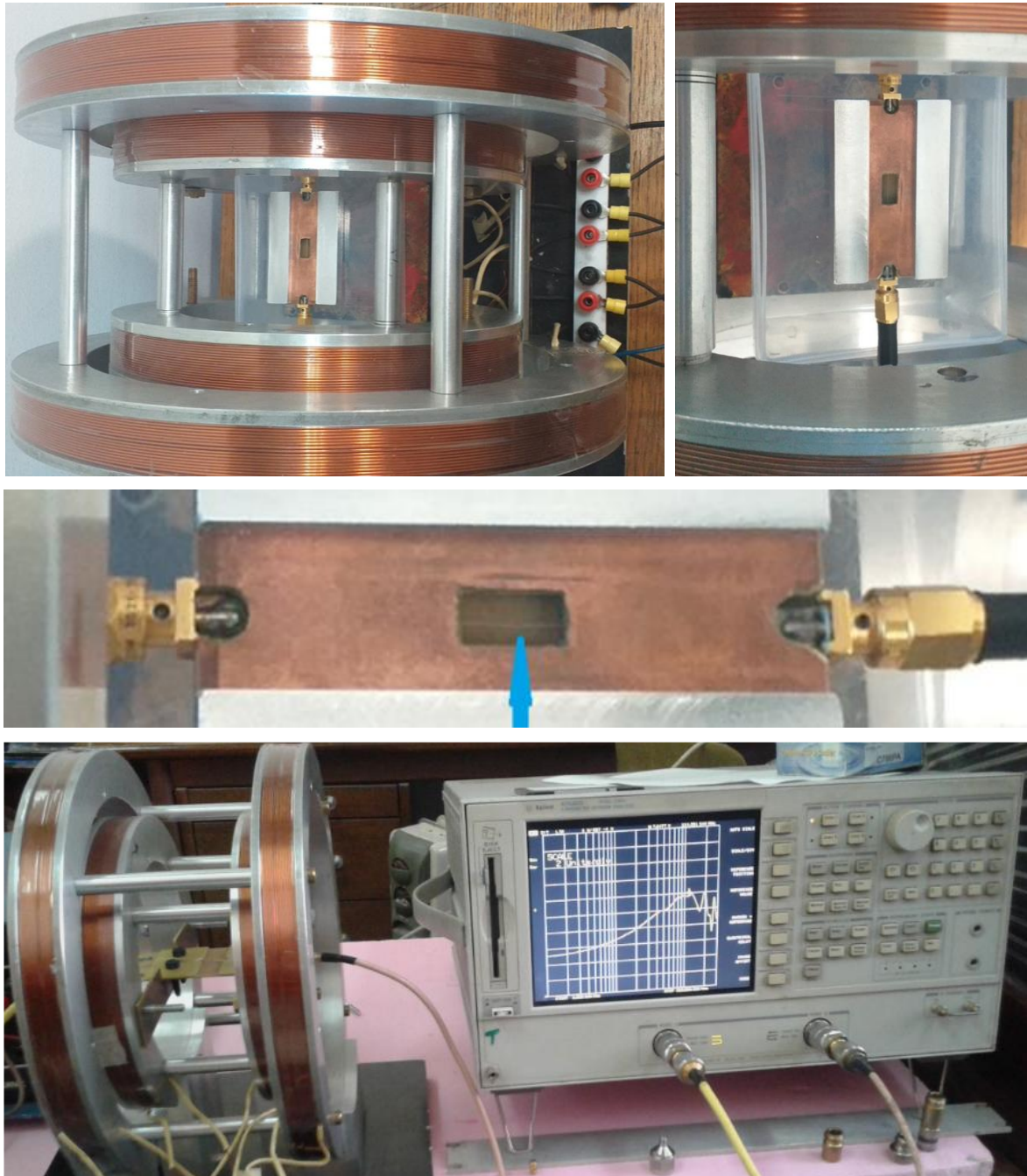
Слика 3-11. Зависности модула магнетоимпедансе од спољашњег једносмерног магнетног поља код жице аморфне легуре  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  (радне фреквенције у опсегу  $f \in [150 \text{ kHz}, 5 \text{ MHz}] @ H_{max} = 463 \text{ A/m}$ , мерења импедансе по методи четири тачке инструментом LCR Hi-TESTER HIOKI 3532-50).

### 3.5.3 Одређивање модула магнетоимпедансе помоћу векторској анализи мреже VNA

Лабораторијска поставка за одређивање модула магнетоимпедансе  $Z(H_{ex}, f)$  на основу експеримента одређивања параметара расејања (у микроталасној техници  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  и  $S_{22}$  scattering parameters [78]) мерених помоћу векторског анализатора мреже VNA (инструмент Vector Network Analyzer Agilent 8753ES [79]) је приказана на слици 3-12 (Лабораторија за електромагнетну компатибилност на Војнотехничком институту у Београду).

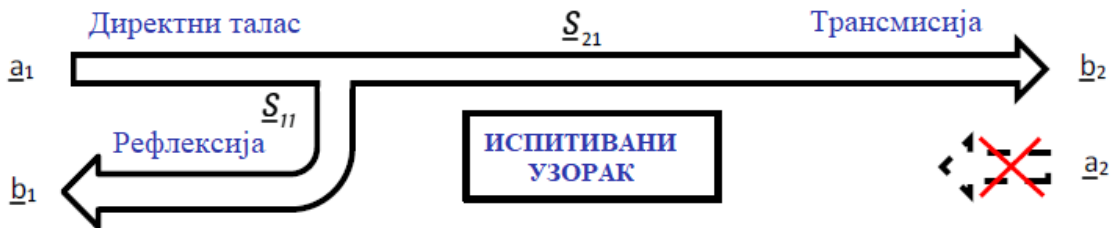
Мерења су спроведена у хомогеном магнетом пољу генерисаном коришћењем два пара Хелмхолцових калемова спрегнутих по истој магнетној оси. Услед техничких ограничења напајања појединачних калемова ограничене су и максималне вредности магнетног поља које појединачно генеришу, па се спроводи и спрезање два пара 1Д - Хелмхолцових калемова различитих пречника ради повећања максималне јачине укупног спољашњег магнетног поља којем је изложен

испитивани узорак феромагнетне аморфне жице позициониран на заједничкој оси ових калемова – лонгитудинална конфигурација мерења.



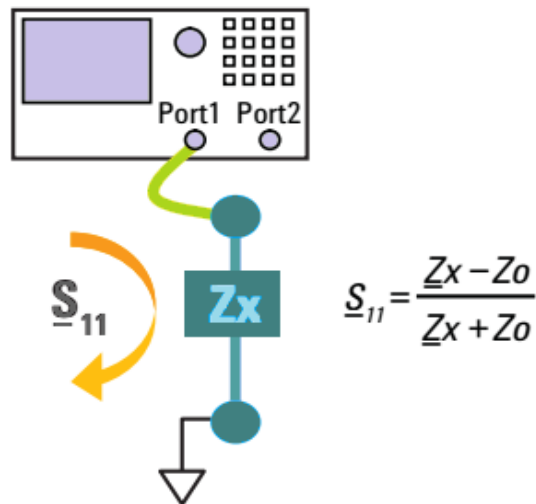
Слика 3-12. Експеримент мерења модула магнетоимпедансе по методи одређивања параметара расејања (уређај векторски анализатор мреже VNA Agilent 8753ES) у хомогеном магнетном пољу генерисаном помоћу два пара 1Д - Хелмхолцових калемова различитих пречника (Лабораторија за електромагнетну компатибилност ВТИ Београд).

Носач узорка је прилагођен геометријским параметрима испитиваних аморфних жица и повезан је са VNA мерним инструментом преко SMA (SubMiniature version A) позлаћеним конекторима постављеним на крајевима коаксијалних каблова карактеристичне импедансе  $Z_0 = 50 \Omega$ . На слици 3-13 је представљен концепт параметара расејања микроталасне мреже (испитиваног узорка жице) где су  $S_{11}$  – коефицијент рефлексије и  $S_{21}$  - коефицијент трансмисије дефинисани преко једначина које садрже интензитете директног и рефлектованог таласа (у којима фигуришу коефицијенти  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  и  $b_2$  [78]).



Слика 3-13. Параметри расејања микроталасне мреже (испитиваног узорка):  $S_{11}$  – коефицијент рефлексије и  $S_{21}$  - коефицијент трансмисије.

Слика 3-14 приказује одређивање параметра расејања рефлексије мреже  $S_{11}$  у конфигурацији повезивања узорка преко једног приступа векторском анализатору мреже VNA ради одређивања непознате импедансе  $Z_x$  испитиваног МИ-елемента феромагнетне аморфне жице.



Слика 3-14. Повезивање испитиваног узорка аморфне жице за одређивање параметра расејања рефлексије  $S_{11}$  преко једног приступа векторском анализатору мреже VNA Agilent 8753ES.

Према конфигурацији са слике 3-14 параметар расејања рефлексије мреже  $S_{11}$  се може изразити као:

$$S_{11} = \frac{Z_x - Z_0}{Z_x + Z_0} \quad , \quad (10)$$

одакле се добија једначина за одређивање непознате импедансе  $Z_x$  код МИ-елемента феромагнетне аморфне жице:

$$Z_x = Z_0 \cdot \left( \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \right) \quad (11)$$

где је  $Z_0$  карактеристична - номинална импеданса приступа микроталасне мреже  $Z_0 = 50 \Omega$ .

## 4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

У овом поглављу су приказани остварени резултати током истраживања три врсте аморфних жица са магнетно меким својствима, као и дискусија свих ових резултата.

У првом сегменту су најпре презентовани резултати оптичке и скенирајуће електронске микроскопије којима су измерени геометријски параметри и испитана морфологија површина аморфних жица на бази кобалта. Затим је приказан ДТА дијаграм којим је дефинисана област термичке стабилности аморфне легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ . Структурна анализа је започета снимањима дифрактограма X-зрачења, након чега је EDS методом потврђено присуство и хомогене расподеле свих конститутивних елемената у легурама на бази кобалта.

Други и највећи сегмент посвећен анализама магнетоимпедансног ефекта, започиње испитивањима фреквентне зависности МИ-односа ( $[Z(0) - Z(H_{\text{ex}})]/Z(H_{\text{ex}})$ ) за процену критичне фреквенције на којој отпочињу промене импедансе при датој вредности  $H_{\text{ex}}$ . У наставку су најпре приказани резултати мерења остварени при нижим радним фреквенцијама ( $f \leq 1 \text{ MHz}$ ), као и на почетку опсега средњих фреквенција ( $2 \text{ MHz} \leq f \leq 5 \text{ MHz}$ ) добијених на LCR метру. Измене профила МИ-односа регистроване при повећању фреквенције су приказане засебним анализама реалног и имагинарног дела импедансе које омогућавају и накнадну анализу самог модула импедансе. Следи фреквентна зависност магнетног поља анизотропије  $H_k$  која је битна за процену успешног коришћења испитиваног МИ-елемента у магнетним сензорима.

На основу наведених резултата и дискусија су у трећем сегменту (применом модела приказних у теоријском делу дисертације) обављене засебне анализе зависности магнетне дубине продирања и то како од радне фреквенције, тако и од спољашњег  $dc$  магнетног поља. Усвојени модел релативне магнетне пермеабилности жице је послужио за спровођење анализе њене зависности од спољашњег магнетног поља при чему је фреквенција одржавана као константан параметар. На крају су обављени прорачуни осетљивости испитиваног МИ-елемента на спољашње магнетно поље при радним фреквенцијама реда мегахерца.

Четврти део је посвећен анализама магнетоимпедансног ефекта аморфне жице легуре на бази кобалта састава  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ , у којем су испитивања обављена при нешто вишим фреквенцијама  $1 \text{ MHz} \leq f \leq 12 \text{ MHz}$  на VNA уређају. Ради поређења са обављеним испитивањима код аморфне жице легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$

спроведена је и аналогна анализа фреквентне зависности магнетног поља анизотропије  $H_k$ .

У последњем петом сегменту, испитивање МИ-елемента аморфне жице легуре на бази гвожђа из система FINEMET Fe-M-Cu-Si-B (M=Nb) састава  $Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$  је започето проценом критичне фреквенције где започиње МИ-ефекат. Затим је спроведена детаљна фреквентна анализа реалног и имагинарног дела импедансе (при  $f \leq 1,2$  MHz) и коначно одређене зависности магнетне дубине продирања од оба кључна параметра (фреквенције и спољашњег dc магнетног поља).

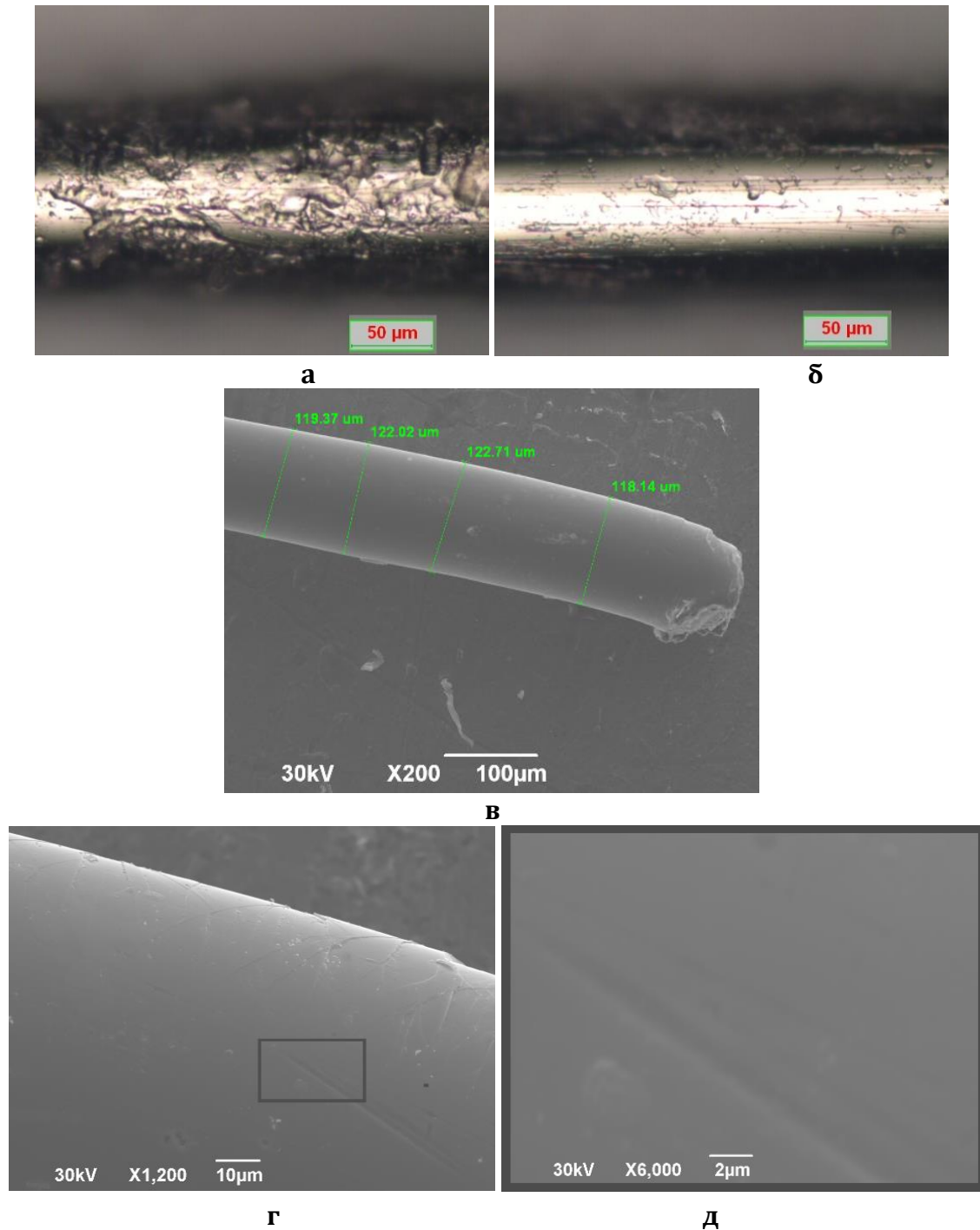
#### **4.1. Испитивање морфологије аморфних жица оптичком и SEM микроскопијом**

Методама оптичке микроскопије OM и скенирајуће електронске микроскопије SEM одређивањи су геометријски параметри и испитивана морфологија површина аморфних жица на бази кобалта састава  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  и  $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ . Презентована су испитивања две верзије узорака аморфних жица: са стакленим омотачем и без ове заштите.

На сликама 4-1.а-б и 4-2.а-б су приказане површине испитиваних аморфних жица без стакленог омотача снимљене оптичком микроскопијом. На површини узорака приметне су области повећање храпавости настале током поступка добијања жица брзим хлађењем растопа. Приликом процеса магнећења жица, ове области се јављају као центри пининга на зидовима магнетних домена [80], чиме се нарушавају магнетно мека својства феромагнетних легура (ниска коерцитивност и висока пермеабилност) [81]. Испитивањима уз помоћ микроскопа атомских сила (AFM) могуће је квантитативно описати површинску морфологију - храпавост, тако да су експерименти спроведени на аморфним тракама легуре састава  $Co_{69}Fe_{4.5}Ni_{1.5}Si_{10}B_{15}$  показали директну коорелацију МИ-ефекта са површинском храпавошћу [82].

На сликама 4-1.в-д и 4-2.в-д су приказане SEM микрографије аморфних жица (без стакленог омотача) помоћу којих су са великом прецизношћу одређене вредности пречника испитиваних узорака. Снимци приказују незнатна одступања од средње вредности пречника жице уочена на испитиваној дужини узорка, чиме је потврђена висока поузданост технологије добијања аморфних жица хлађењем растопа металних легура у ротирајућем слоју воде.

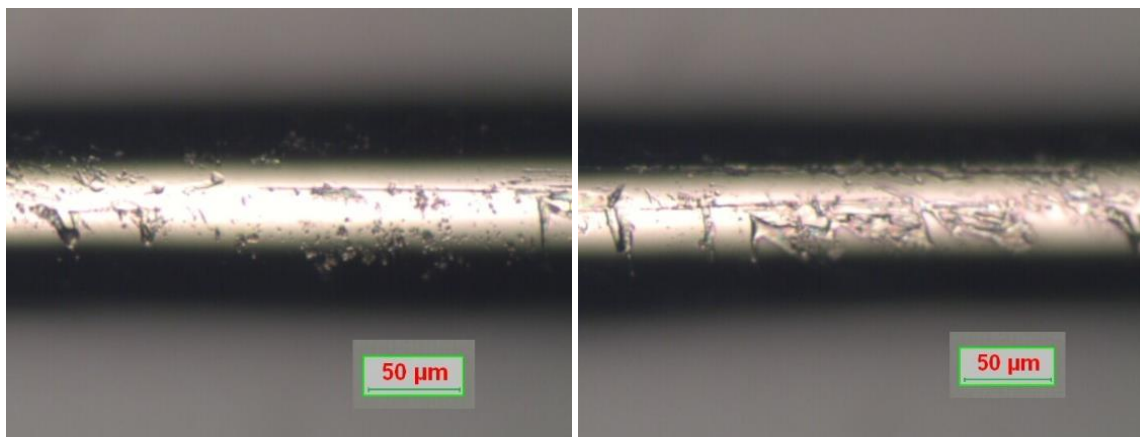
На сликама 4-3.а-в, су приказани снимци аморфних микрожица са стакленим омотачем снимљени оптичком микроскопијом [83]. Јасно се запажају области металног језгра пречника од око 25  $\mu m$  и стаклени омотач дебљине око 7  $\mu m$ . На површини металног језгра нису запажене области са израженом храпавошћу, као што је то уочено код узорака жица без стаклене заштите, а одатле и потичу изузетна магнетно мека својства овако припремљених феромагнетних аморфних микрожица [84].



Слика 4-1. Оптичка микроскопија (а, б) и SEM микрографија (в, г, д) узорка жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  пречника око  $120 \mu\text{m}$ .

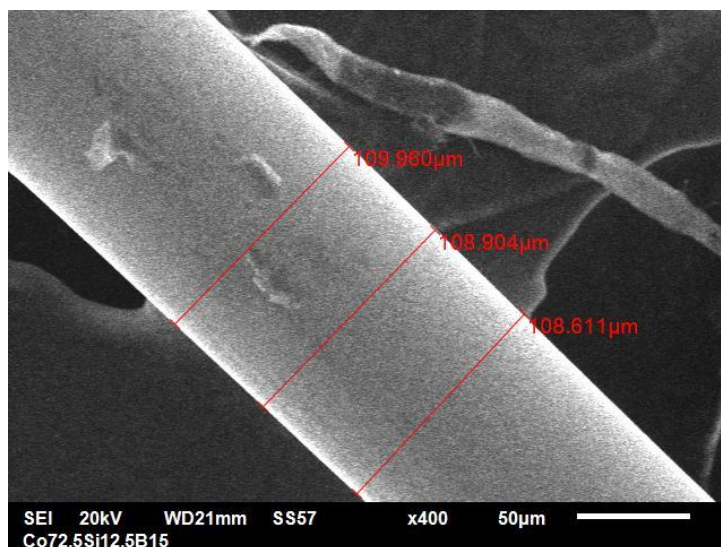
На сликама 4-3.г-д и 4-4 су приказане SEM микрографије аморфних феромагнетних жица са стакленим омотачем. Оваква структура представља композитну конфигурацију две цилиндричне форме: у језгру - метална легура а у омотачу – борсиликатно стакло. Приликом поступка производње жица, а услед мањег коефицијената термичког ширења стакла (око  $3 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  што стаклу омогућава изражену отпорност на термичке промене) и метала, добија се измењена расподела магнетне анизотропије у односу на аморфне металне жице без стакленог омотача.



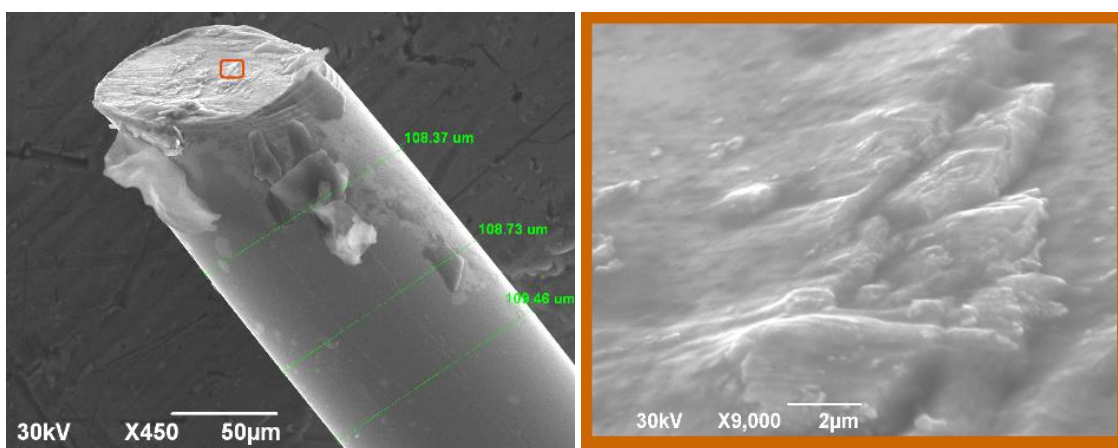


а

б



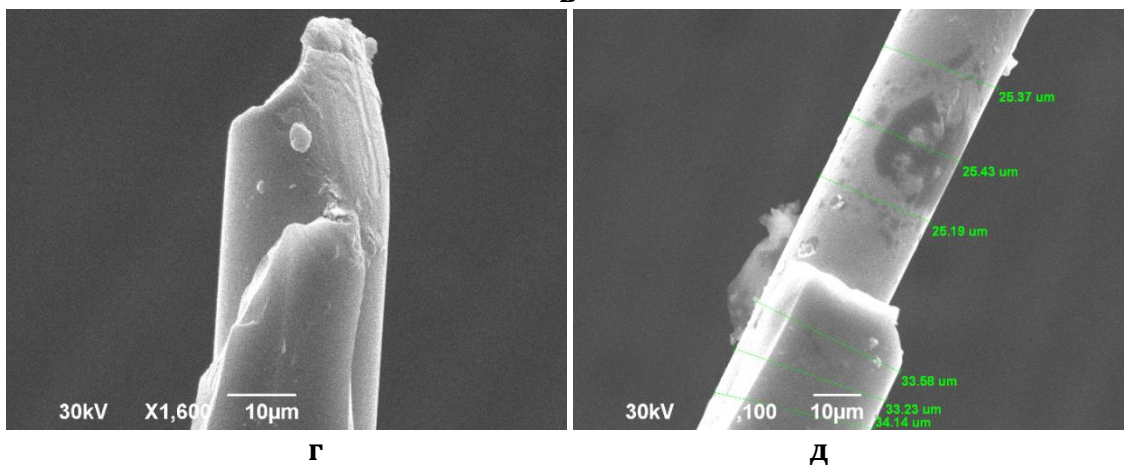
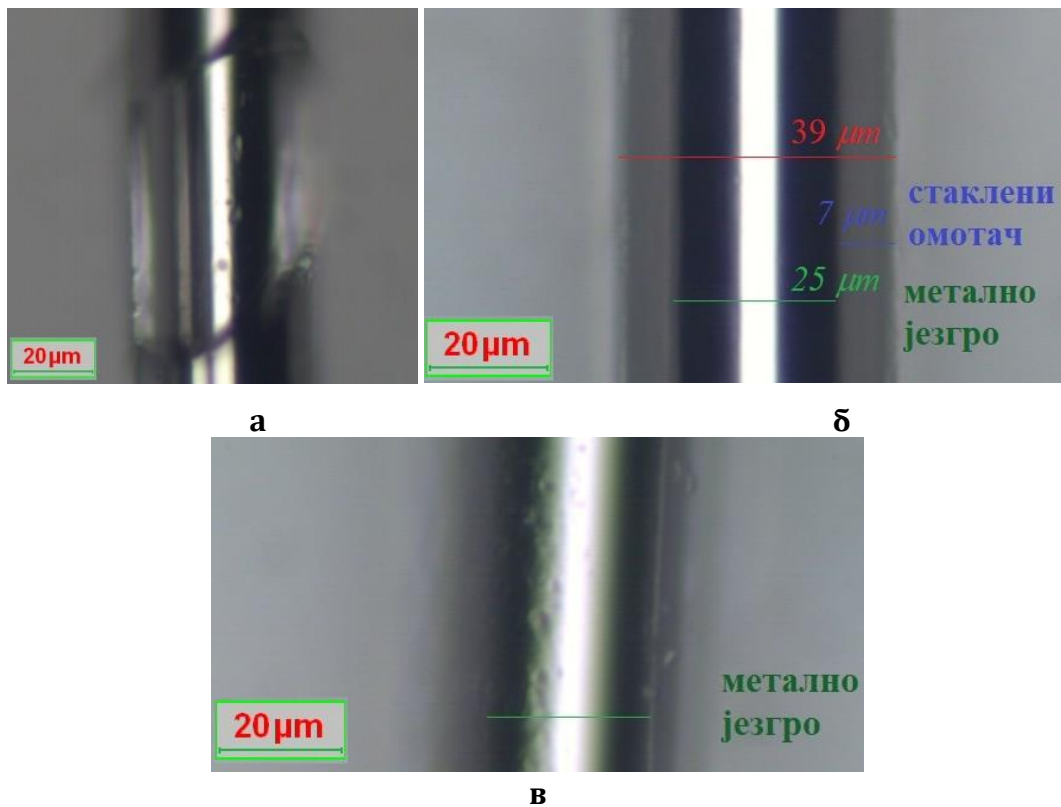
в



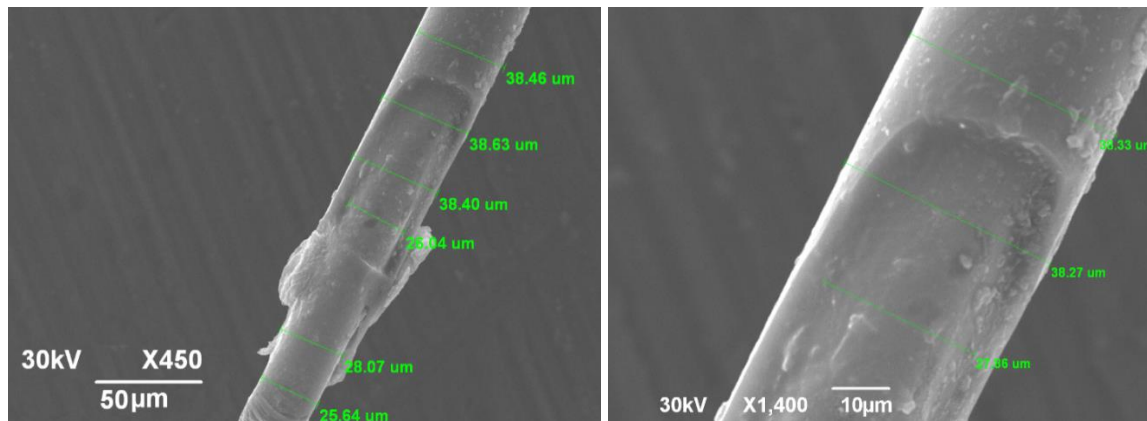
г

д

Слика 4-2. Оптичка микрофотографија (а, б) и SEM микрофотографија (в, г, д) узорка жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  пречника око 110 μm.



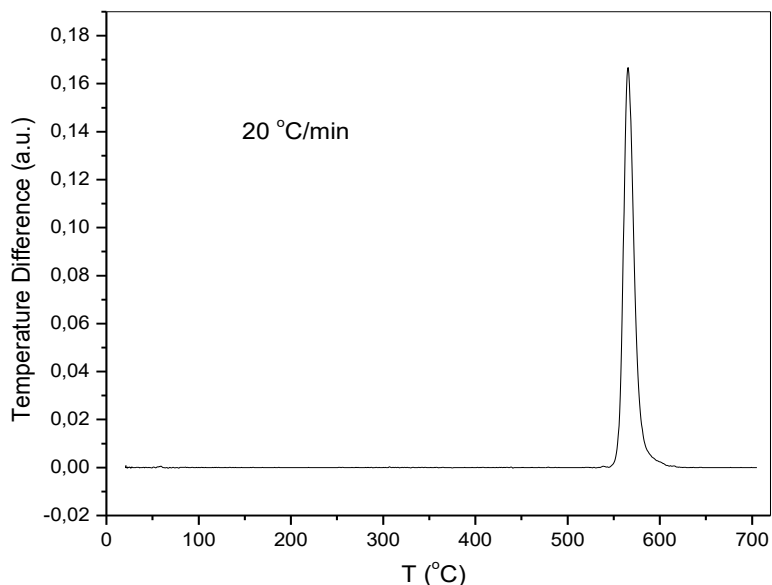
Слика 4-3. Оптика микрографија (а, б, в) и SEM микрографија (г, д) жице легуре састава  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  укупног пречника око 40 μm, са стакленим омотачем.



Слика 4-4. SEM микрографије узорка жице аморфне легуре састава  $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$  укупног пречника око 40 μm, са стакленим омотачем.

#### 4.2. Испитивање термичких својстава аморфне легуре $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ диференцијалном термијском анализом DTA

DTA термограм узорка жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  дебљине 120  $\mu\text{m}$ , је приказан на слици 4-5. Експеримент је спроведен у температурском интервалу од собне температуре до максималне температуре од 700  $^{\circ}\text{C}$ , а приказана крива је добијена накнадним одузимањем базне линије DTA инструмента.



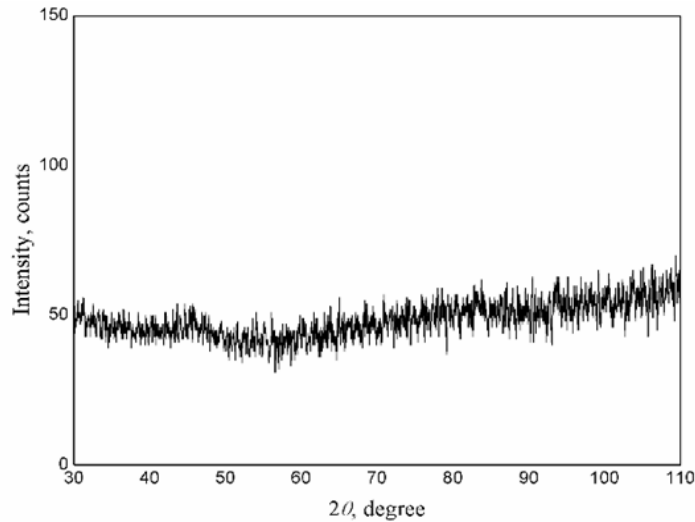
Слика 4-5. DTA термограм узорка жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  дебљине 120  $\mu\text{m}$  (брзина грејања од 20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ).

Термограм приказује присуство само једног егзотермног процеса који је резултат одигравања процеса кристализације са температуром пика од 566  $^{\circ}\text{C}$ . Термички процеси који се одигравају у температурском интервалу до око 400  $^{\circ}\text{C}$  могу изазвати ефикасну структурну релаксацију (без отпочињања процеса кристализације) заосталих механичких напрезања насталих током процеса брзог хлађења растопа приликом производње узорка аморфних жица.

#### 4.3. Испитивање аморфних жица легуре $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ дифракцијом X-зрачења XRD

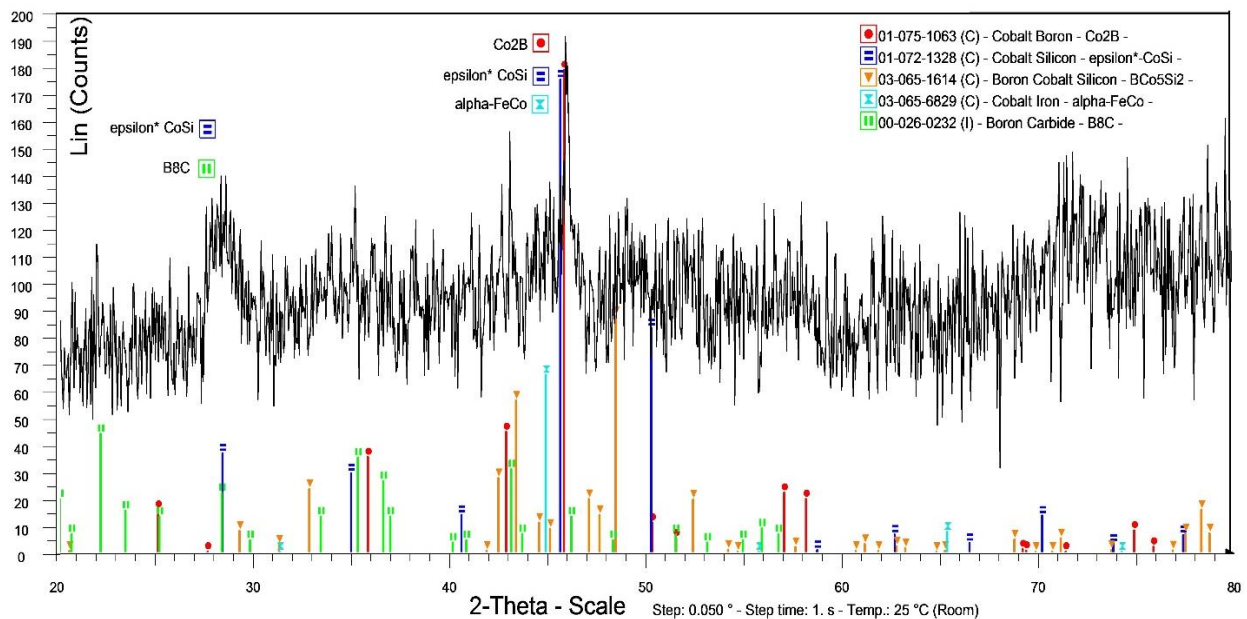
Рендгенограм неодгреваног узорка аморфне жице легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  пречника 120  $\mu\text{m}$  је представљен на слици 4-6. Као што се може видети рендгенограм показује веома слаб широки дифузни пик (око  $2\theta \approx 45^{\circ}$ ) који потврђује потпуно аморфну структуру испитиваног узорка жице. За успешну примену феромагнетних жица као сензора веома су битна и одлична механичка својства која увек прате потпуно аморфне легуре (изузетна еластичност), за

разлику од делимично кристалних микроструктура код којих механичка својства деградирају [7].



Слика 4-6. Рендгенограм неодреваног узорка жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  пречника  $120\ \mu\text{m}$ .

На слици 4-7 је приказана детаљна анализа кристалних фаза рендгенограма загреваног узорка жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  (брзина грејања од  $20\ \text{°C}/\text{min}$  до максималне температуре  $700\ \text{°C}$ ).

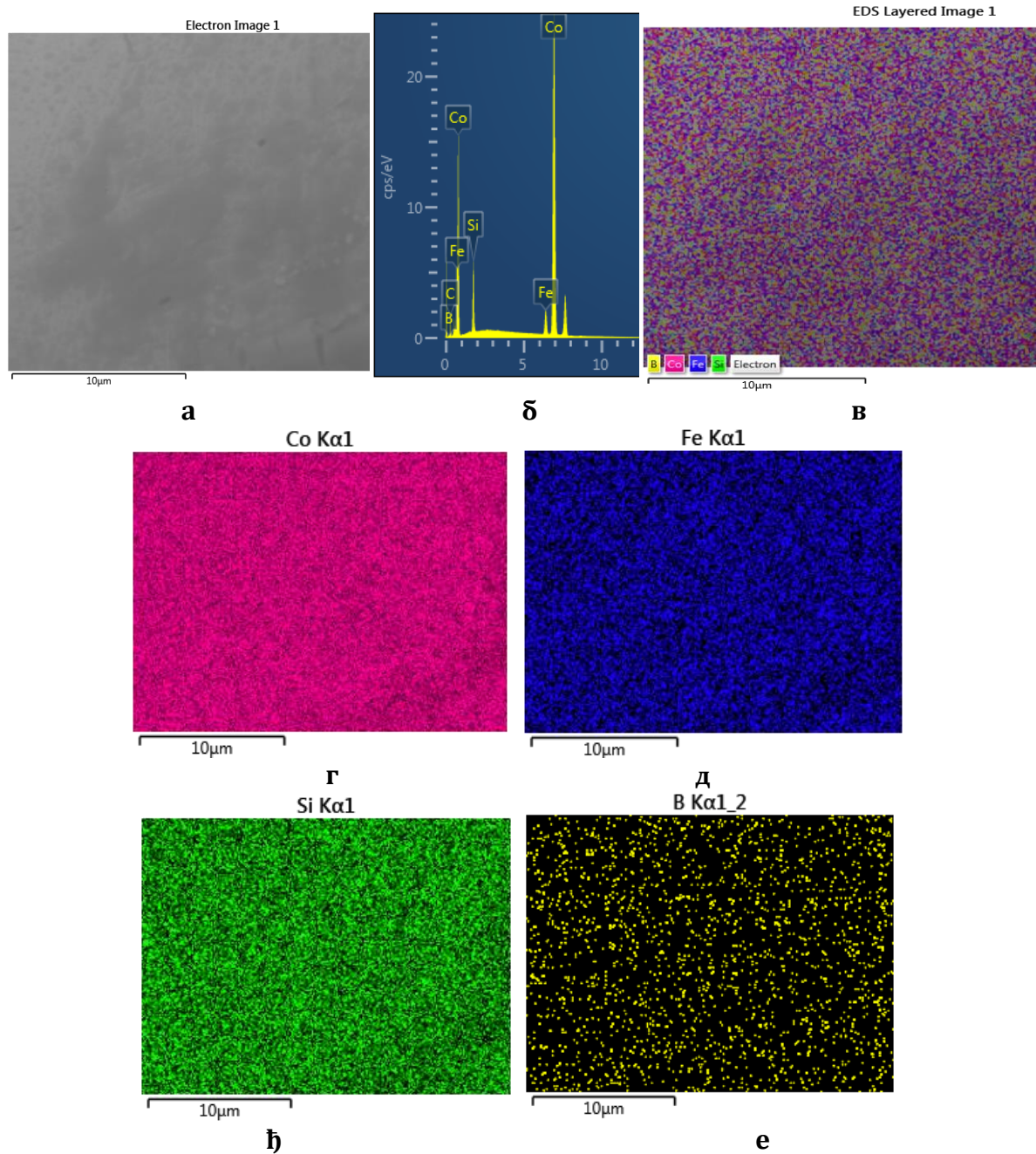


Слика 4-7. Рендгенограм загреваног узорка жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  пречника  $120\ \mu\text{m}$  (брзина грејања од  $20\ \text{°C}/\text{min}$  до максималне температуре  $700\ \text{°C}$ ).

Регистрована је тек појава развоја два дифракциона пика: првог при углу  $2\theta \approx 28,5^\circ$  (кристалне фазе:  $\epsilon\text{-CoSi}$  (кристална структура типа P2) и  $\text{B}_8\text{C}$ ) и другог при углу  $2\theta \approx 45^\circ$  (кристалне фазе  $\text{Co}_2\text{B}$ ,  $\epsilon\text{-CoSi}$  (кристална структура типа P2) и  $\alpha\text{-FeCo}$  (кристална структура типа B2)).

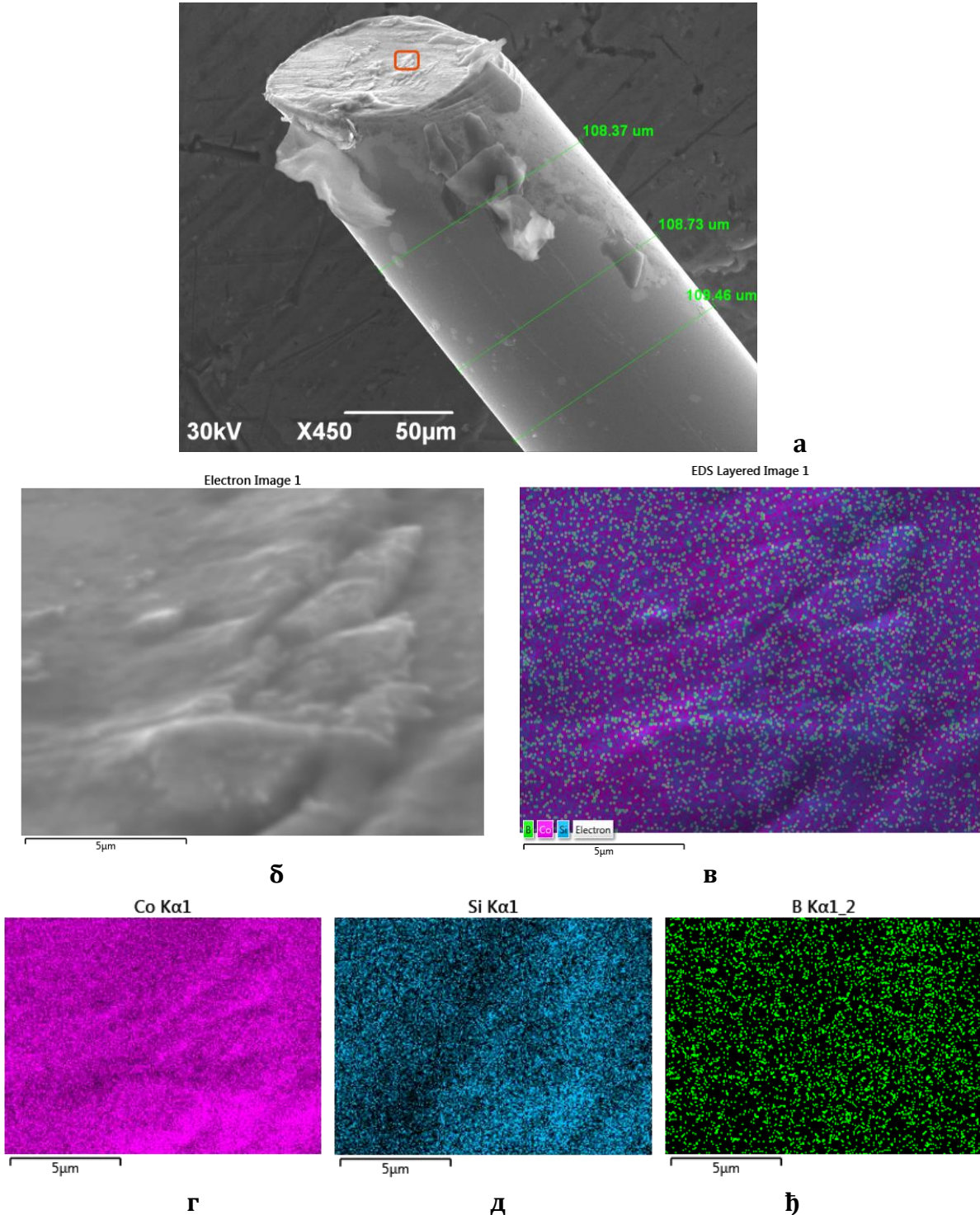
#### 4.4. Испитивање аморфних жица легура $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ и $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ скенирајућом електронском микроскопијом SEM са енергетском дисперзивном спектроскопијом EDS

SEM микрографија узорка жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  је представљена на слици 4-8.а. Анализа EDS пикова (слика 4-8.б) и мапирања свих (слика 4-8.в) и одговарајућих конститутивних хемијских елемената (слике 4-8.г-е) су потврдиле присуство и хомогену расподелу свих саставних елемената легуре.



Слика 4-8. а) SEM микрографија жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ , б) EDS микроанализе (пикови су означени EDS линијом одговарајућег хемијског елемента) и EDS микроанализе - мапирања в) свих и г-е) одговарајућих конститутивних хемијских елемената на испитиваном сегменту површине жице.

SEM микрографије узорка жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  је представљена на слици 4-9.а-б. EDS мапирања свих (слика 4-9.в) и одговарајућих конститутивних хемијских елемената (слике 4-9.г-ђ) су потврдиле присуство и хомогену расподелу сва три саставна елемената у легури.



Слика 4-9. SEM микрографије а) и б) жице аморфне легуре састава  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ , и EDS микроанализе - мапирања в) свих и г-ђ) одговарајућих конститутивних хемијских елемената на испитиваном сегменту површине жице.

## 4.5. Магнетоимпедансни ефекат

Као што је већ најављено напред приказаним резултатима основних својстава аморфних металних легура, у оквиру дисертације су спроведена истраживања магнетоимпедансних елемената начињених од аморфних жица на бази кобалта састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и на бази гвожђа састава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ .

Магнетоимпедансни ефекат је у директној вези са феноменом скин ефекта код феромагнетних материјала, тј. са променама у динамици процеса магнећења. При наизменичним сигнаlima (најчешће у фреквентном опсегу од 1 MHz до 1 GHz) магнетна дубина продирања  $\delta_m$  и магнетна пермеабилност  $\mu$  показују изразиту зависност од фреквенције и интензитета примењеног спољашњег  $dc$  магнетног поља. Стога се приликом планирања експеримената водило рачуна о контроли следећих параметра: интензитету и оријентацији спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$  и интензитету  $I_{cc}$  и фреквенцији  $f$  наизменичне струје  $i_{ac}$  која протиче кроз цилиндричне узорке аморфних металних жица. Генерално, појава вихорних струја потискује ток наелектрисања ка површини, што резултује са повећањем импедансе  $Z$ , док се примењеним спољашњим магнетним пољем то потискивање модулише, односно мења се ефективна површина попречног пресека кроз коју протиче наелектрисање (при константној радној фреквенцији). Дакле, велика пермеабилност и висока фреквенција смањују магнетну дубину продирања, док се примењеним  $dc$  магнетним пољем она повећава.

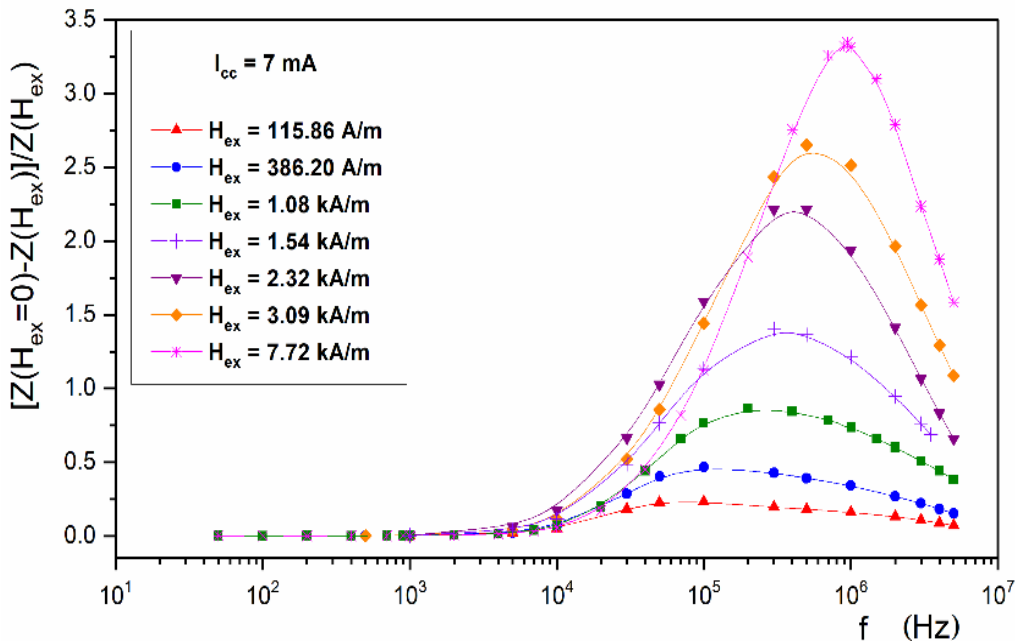
Централна истраживања су спроведена у домену функционалне зависности модула импедансе  $|Z(H_{ex}, f)|$  (уобичајена ознака  $Z(H_{ex}, f)$ ) као и њеног реалног дела магнетоотпорности  $MR(H_{ex}, f)$  и имагинарног дела магнетореактансе  $MX(H_{ex}, f)$ . Затим су на основу ових података одређиване зависности два кључна параметра МИ-ефекта: магнетна дубина продирања  $\delta_m(H_{ex}, f)$  и магнетна пермеабилност  $\mu(H_{ex}, f)$ . При анализи су коришћене две математичке формулације МИ-односа у зависности од тога који од два параметра ( $H_{ex}$  или  $f$ ) је одржаван константним (што је најчешће био и случај са интензитетом  $I_{cc}$  наизменичне струје  $i_{ac}$ ). Рад савремених магнетних сензора високе осетљивости (резолуције до око 1 pT [85]) се заснива на МИ-елементима са променама модула импедансе  $\Delta Z/Z$  од неколико стотина процената, те су стога спроведене и процене осетљивости код испитиваних узорака аморфних жица.

### 4.5.1 Магнетоимпедансни ефекат жице аморфне легуре на бази кобалта састава $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$

Пре мерења магнетоимпедансе узорци аморфне жице легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  су термички третирани *ac* загревањем на бази Џуловог ефекта [86-89], са амплитудом струје одгревања од  $I_{an} = 100 \text{ mA}$  (@ 50 Hz, трајања 60 s на ваздуху), а затим споро хлађени постепеним смањењем струје одгревања брзином од 5 mA/s [55, 90]. Константна вредност специфичне електричне отпорности од  $\rho = 133 \mu\Omega \text{ cm}$  испитиваног узорка жице дужине  $l = 17 \text{ mm}$  након овог термичког третмана је потврдила и надаље постојање аморфног стања са оствареном

структурном релаксацијом, што је био и основни циљ примене оваквог метода ас одгревања.

Слика 4-10 приказује фреквентну зависност МИ-односа (рачунаог коришћењем модула импедансе без  $Z(0)$  и при дејству  $Z(H_{ex})$  спољашњег једносмерног магнетног поља  $[Z(0) - Z(H_{ex})]/Z(H_{ex})$  за различите вредности магнетних поља  $H_{ex} \in [115,86 \text{ A/m}; 7,72 \text{ kA/m}]$  и при  $I_{cc} = 7 \text{ mA}$ . Критична фреквенција од око  $5 \text{ kHz} - 7 \text{ kHz}$  (када је  $\delta_m \approx a = 50 \mu\text{m}$ ) уочена је као вредност када почиње МИ ефекат, тј. када одпочињу промене импедансе при датој (константној) вредности  $H_{ex}$  [90]. МИ-однос најпре расте са фреквенцијом и достиже максимум који је зависан од примењеног спољашњег магнетног поља (видети табелу 4-1).



Слика 4-10. Фреквентна зависност МИ-односа аморфне жице  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  (рачунаог коришћењем модула импедансе без  $Z(0)$  и при дејству  $Z(H_{ex})$  спољашњег једносмерног магнетног поља  $[Z(0) - Z(H_{ex})]/Z(H_{ex})$  за опсег ниских и високих вредности  $H_{ex} \in [115,86 \text{ A/m}, 7,72 \text{ kA/m}]$  [90].

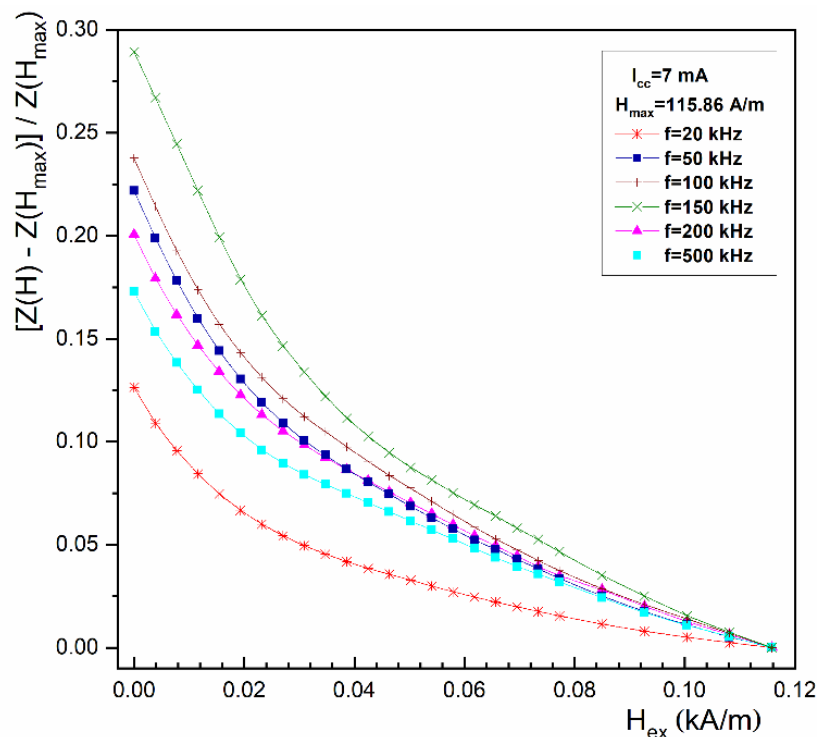
Табела 4-1. Максималне вредности МИ-односа  $[Z(0) - Z(H_{ex})]/Z(H_{ex})$  аморфне жице  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и одговарајућа фреквенција  $f_{\text{max}}$  (при датој вредности спољашњег једносмерног магнетног поља  $H_{ex}$ ).

$H_{ex}$ (kA/m)	МИ-однос (%)	$f_{\text{max}}$ (kHz)
7,72	334	950
3,09	265	500
1,54	140	300
1,08	86	200
0,386	47	100



Максимална вредност од 334% забележена је на радној фреквенцији од 0,95 MHz (@ $H_{ex} = 7,72$  kA/m). Са даљим повећањем фреквенције, МИ-однос се смањује услед смањења магнетне пермеабилности (снажно пригушивање померања зидова магнетних домена услед појаве индукованих вртложних струја).

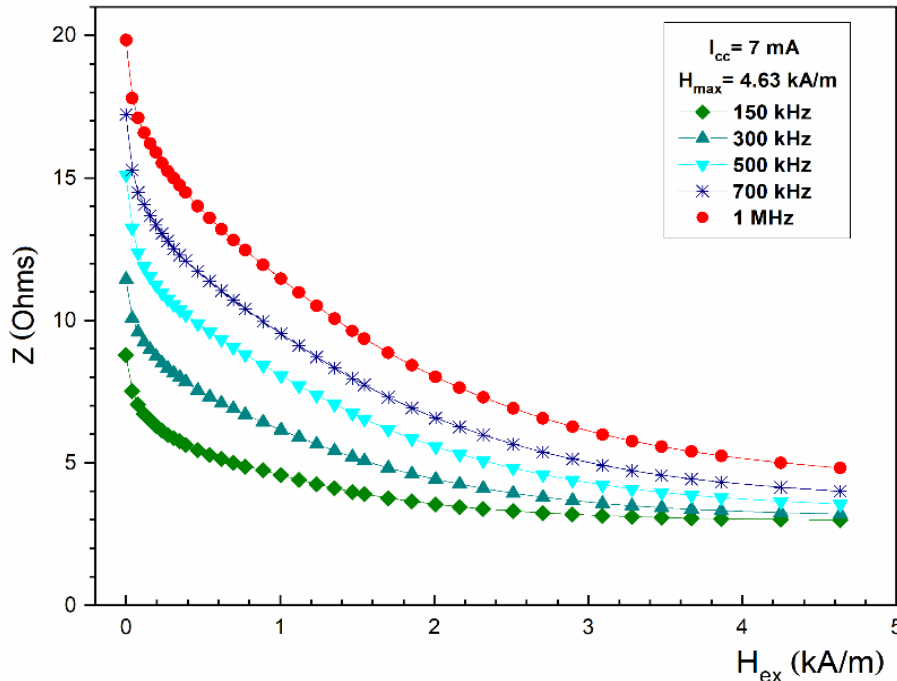
МИ-однос  $\Delta Z / Z = [Z(H_{ex}) - Z(H_{max})] / Z(H_{max})$  при мањим вредностима једносмерног спољашњег магнетног поља ( $H_{ex} < H_{max} \approx 116$  A/m) и у опсегу ниских радних фреквенција  $f \in [20$  kHz, 500 kHz] је приказан на слици 4-11. Све криве показују константно смањење МИ-односа услед смањења модула импедансе  $Z(H_{ex})$ , које је резултат повећања магнетне дубине продирања  $\delta_m$  са повећањем спољашњег магнетног поља  $H_{ex}$ . Највећа вредност МИ-односа од око 30% забележена је на радној фреквенцији од 150 kHz.



Слика 4-11. МИ-однос код аморфне жице  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  при мањим вредностима једносмерног спољашњег магнетног поља ( $H_{ex} < 116$  A/m) и у опсегу ниских радних фреквенција  $f \in [20$  kHz, 500 kHz] [90].

На слици 4-12 приказана је зависност модула импедансе  $|Z(H_{ex})|$  од магнетног поља, а на слици 4-13 приказан је профил МИ-односа при високим вредностима магнетног поља ( $H_{max} = 4,63$  kA/m) и у нискофреквентном опсегу  $f \in [150$  kHz, 1 MHz]. Све МИ криве  $|Z(H_{ex})|$  карактерише константно смањење са повећањем магнетног поља  $H_{ex}$  и очекивано константно повећање модула импедансе са повећањем радне фреквенције [91]. На релативно ниским фреквенцијама реална компонента импедансе има доминантан утицај на промену модула импедансе [56, 92]. При високим вредностима спољашњег једносмерног магнетног поља ( $H_{max} = 4,63$  kA/m) и релативно ниским фреквенцијама (150 kHz и 300 kHz), скин ефекат је ниског интензитета па је магнетна дубина продирања и даље велика (проток наелектрисања је практично дуж целог попречног пресека,  $\delta_m \leq a$ ). Дакле,

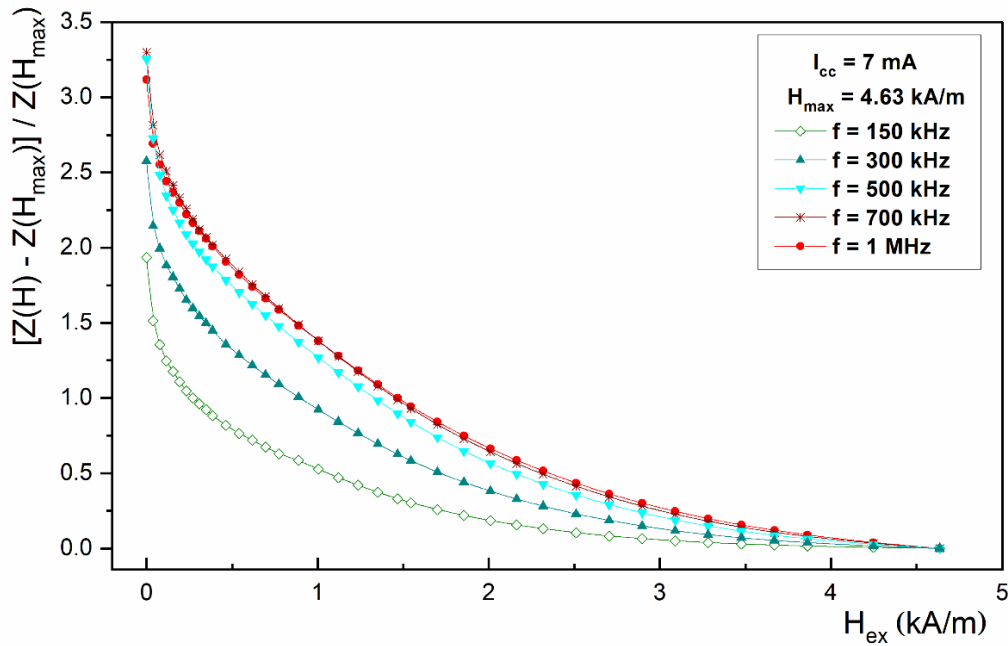
магнетоотпор  $MR$  је доминантна компонента магнетоимпедансе  $Z$  испитиваног узорка жице, а обе зависности од спољашњег магнетног поља  $MR(H_{ex})$  и  $|Z(H_{ex})|$  показују монотono смањење са тенденцијом ка вредности једносмерног електричног отпора  $Z(H_{max}) \approx MR(H_{max}) \approx R_{dc} \approx 3 \Omega$ , тј. количник  $Z(H_{max})/R_{dc} \approx 1$ .



Слика 4-12. Зависност модула импедансе  $Z$  од магнетног поља аморфне жице  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  са радном фреквенцијом као параметром (нискофреквентни опсег  $f \in [150 \text{ kHz}, 1 \text{ MHz}]$  при високим вредностима магнетног поља  $H_{max} \approx 4,63 \text{ kA/m}$ ) [91].

На константно смањење модула импедансе са повећањем једносмерног магнетног поља  $H_{ex}$  (а самим тим и на смањење вредности МИ-односа приказаног на слици 4-13) утиче процес магнећења који се одвија механизмом померања зидова магнетних домена. Како је анализирано ГМИ спектрима у референци [93], у овом случају (нискофреквентни опсег  $f \in [150 \text{ kHz}, 1 \text{ MHz}]$ ) осно-лонгитудинална анизотропија у језгру жице као извор промена магнетне пермеабилности је доминантна над циркуларном анизотропијом по ободној површини аморфне жице.

За разлику од промена МИ-односа у опсегу ниских интензитета магнетних поља ( $H_{ex} < 116 \text{ A/m}$ ), при већим вредностима магнетног поља је дошло до засићења повећања МИ-односа при радним фреквенцијама  $f \in [700 \text{ kHz}, 1 \text{ MHz}]$ . Регистроване су сличне вредности максималног МИ-односа од око 330% и скоро идентични облици кривих. При повећању радних фреквенција дубина продирања значајно опада ( $\delta_m \ll a = 50 \mu\text{m}$ ) и циркуларна пермеабилност (тј. магнетни домени распоређени дуж површине цилиндричног феромагнетног узорка) преузима доминантну улогу.

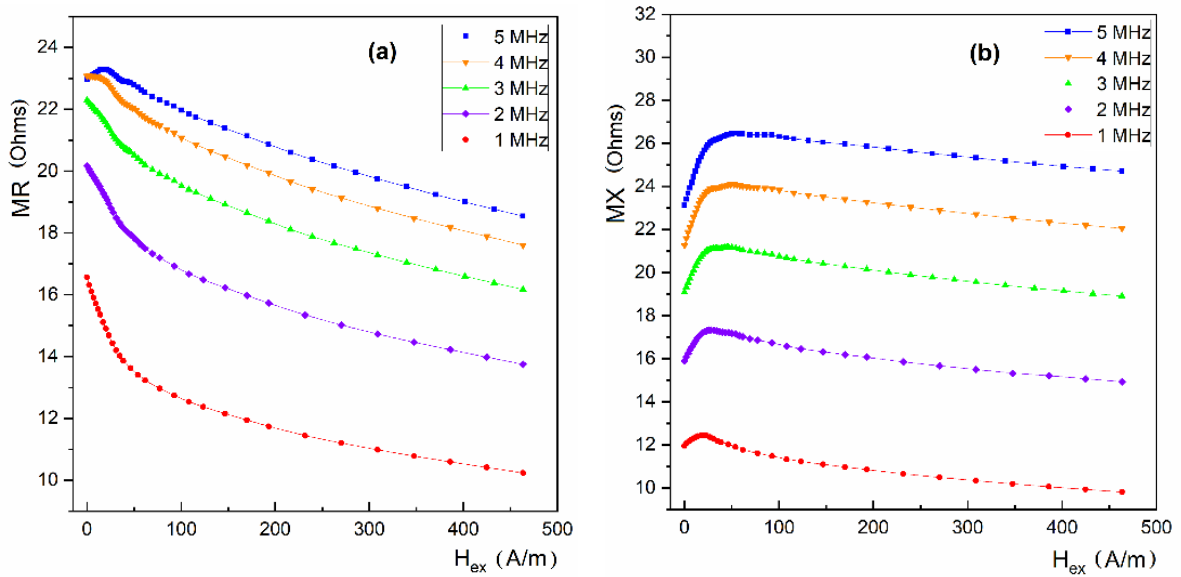


Слика 4-13. Зависност МИ-односа од магнетног поља аморфне жице  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  са фреквенцијом као параметром у нискофреквентном опсегу  $f \in [150 \text{ kHz}, 1 \text{ MHz}]$  (опсег високих вредности магнетног поља  $H_{\text{max}} \approx 4,63 \text{ kA/m}$ ) [91].

У средње фреквентном опсегу (који обично почиње око 1 MHz) скин ефекат и механизам ротације вектора магнетизације су доминантни у процесу циркуларног магнећења (кретање зидова магнетних домена је блокирано). Стога се облик зависности МИ-односа од спољашњег једносмерног магнетног поља значајно мења и евидентирана је појава пика. За потпуну анализу МИ-ефекта као функције спољашњег једносмерног магнетног поља  $H_{\text{ex}}$ , поред модула импедансе  $Z(H_{\text{ex}}, f)$ , неопходно је детаљно анализирати и зависности реалног дела импедансе  $\text{MR}(H_{\text{ex}}, f)$  и имагинарног дела импедансе  $\text{MX}(H_{\text{ex}}, f)$ .

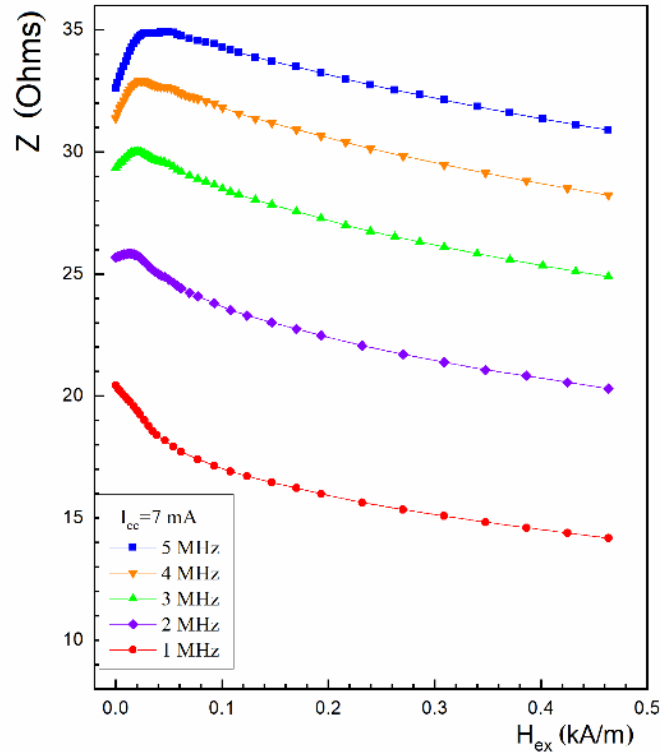
Зависности магнетоотпорности  $\text{MR}(H_{\text{ex}})$  од спољашњег магнетног поља са фреквенцијом као параметром (@  $H_{\text{max}} \approx 463 \text{ A/m}$  средњи опсег магнетних поља), су приказане на слици 4-14.а. За разлику од монотоног опадања уоченог при  $f \leq 3 \text{ MHz}$ , крива добијена на 4 MHz показује благо колено (запажа се почетак развоја пика), док је даље повећање фреквенције праћено еволуцијом слабог пика на 5 MHz. Слично понашање магнетоотпорности  $\text{MR}(H_{\text{ex}})$  уочено је код аморфних жица легуре  $\text{CoFeSiBMo}$  [94], где је примећено монотono опадање за  $f < 5 \text{ MHz}$  и развој пика при фреквенцијама изнад 5 MHz.

Различито од магнетоотпорности, зависност магнетореактансе  $\text{MX}(H_{\text{ex}})$  од спољашњег  $\text{dc}$  магнетног поља показује профил са појавом пика за све фреквенције у испитиваном опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ , као и очекивани константан пораст вредности са повећањем радних фреквенција (слика 4-14.б).



Слика 4-14. Зависности а) магнетоотпорности MR и б) магнетореактансе MX аморфне жице  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  од спољашњег једносмерног магнетног поља са фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ , ( $@H_{max} = 463 \text{ A/m}$ ) [91].

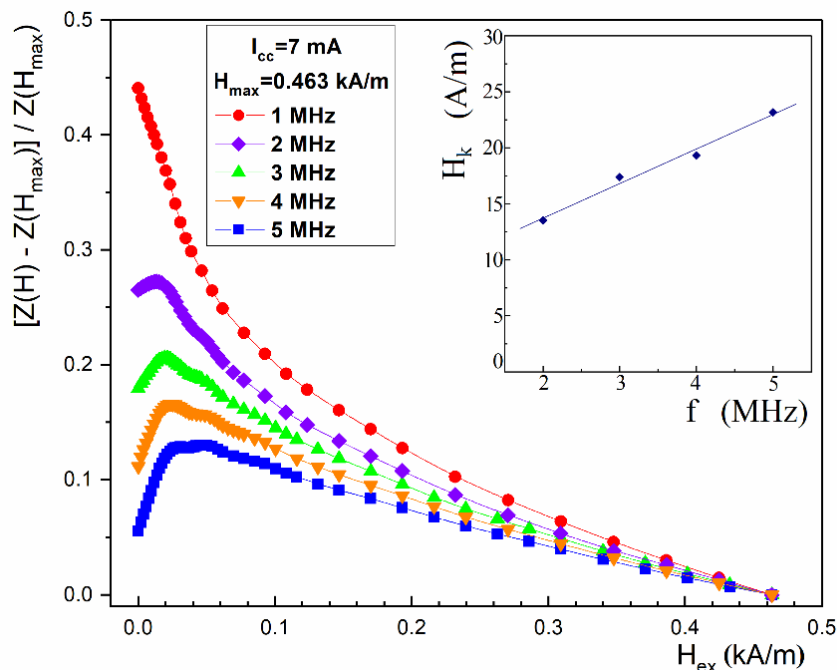
На слици 4-15 је приказана зависност модула магнетоимпедансе од магнетног поља за средње вредности магнетног поља ( $H_{max} = 463 \text{ A/m}$ ) у високофреквентном опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ , на шта генерално утиче расподела магнетне анизотропије.



Слика 4-15. Зависности модула магнетоимпедансе аморфне жице  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  од спољашњег једносмерног магнетног поља са фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ , ( $@H_{max} = 463 \text{ A/m}$ ) [91].

У испитиваном узорку аморфне жице на бази кобалта регистровано је очекивано константно повећање  $Z$  ( $H_{ex}$ ) са порастом фреквенције. На фреквенцији од 1 MHz је уочено монотонно опадање модула импедансе са порастом спољашњег магнетног поља, док је појава пика примећена за све фреквенције веће од 2 MHz. Генеа пика указује на пораст доприноса механизма ротације вектора магнетизације који се појављује изнад фреквенције релаксације зидова магнетних домена. Дакле, за разлику од константног смањења уоченог на нижим радним фреквенцијама, МИ-профили који поседују јасан пик позициониран при вредности поља магнетне анизотропије  $H_k$ , указују на доминантан механизам ротације магнетизације циркуларне пермеабилности.

МИ-однос тестираног CoFeSiB МИ елемента са радном фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$  приказан је на слици 4-16. Највећа вредност  $\Delta Z/Z$  регистрована је на фреквенцији од 1 MHz, док је са даљим повећањем фреквенције забележено константно смањење, као последица смањења циркуларне магнетне пермеабилности. Уочене фреквентне зависности МИ-односа су у складу са теоријским предвиђањима [95-98] као и са експерименталним резултатима добијеним код МИ елемената аморфних легура на бази кобалта [99-101]. Такође, са повећањем фреквенције, следећи „пик“ се јавља после првог, што указује на балансирање између два процеса магнетне анизотропије [101].



Слика 4-16. Зависности МИ-односа аморфне жице  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  од спољашњег једносмерног магнетног поља са фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ , ( $@H_{max} = 463 \text{ A/m}$ ). Инсерт приказује фреквентну зависност поља магнетне анизотропије  $H_k$  [91].

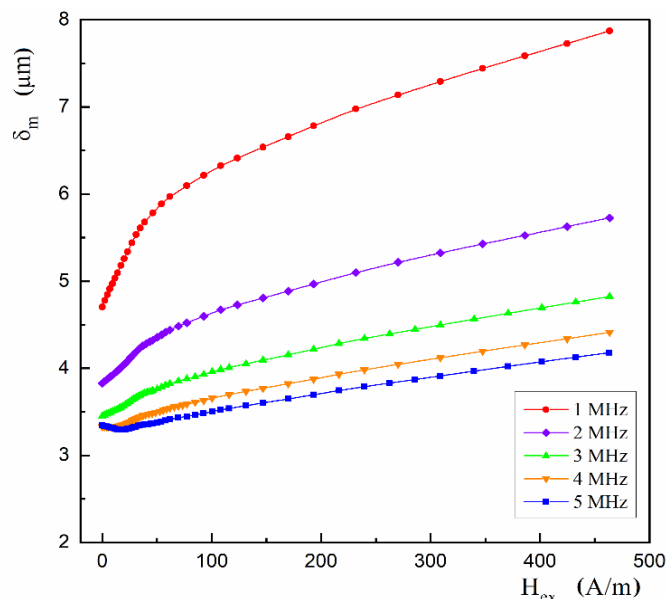
Поред тога, приметно је повећање поља магнетне анизотропије  $H_k$  са повећањем фреквенције (видети инсерт на слици 4-16). Примена МИ елемента за магнетне сензоре је у линеарној области повећања модула импедансе (тј. при  $H_{ex} < H_k$  [102]). Повећање поља магнетне анизотропије  $H_k$  повећава област примене скоро два пута када се радна фреквенција повећа са 2 MHz на 5 MHz.

#### 4.5.2 Зависност магнетне дубине продирања од фреквенције и магнетног поља код аморфне жице легуре $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$

Већ је наглашено да је МИ-ефекат директно повезан са феноменом скин ефекта у узорку феромагнетног материјала. При порасту фреквенције наизменичне струје дубина магнетног продирања се смањује као и површина кроз коју тече наелектрисање. Код узорака у облику цилиндра (жице) ова површина има облик прстена, а магнетна дубина продирања је дата једначином (3), тј. може се израчунати коришћењем мерних података за  $R_{dc}$  и  $MR(H_{ex}, f)$  добијених при променама спољашњег једносмерног магнетног поља и фреквенције.

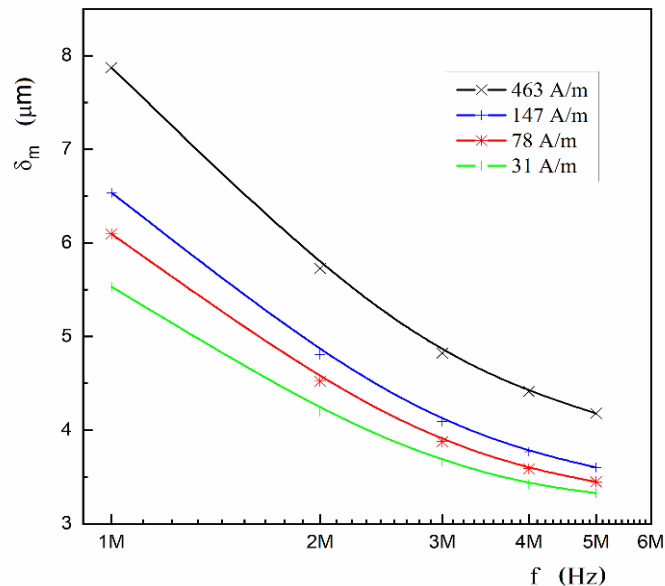
Познато је да аморфне жице легура на бази кобалта поседују високе вредности ефективне магнетне пермеабилности услед циркуларне доменске конфигурације при површини цилиндра (слика 2-17). С обзиром на директну повезаност пермеабилности са магнетном дужином продирања, истраживања спроведена над узорцима аморфних жица састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  су обухватила и прорачуне магнетне дубине продирања  $\delta_m(H_{ex}, f)$ .

Слика 4-17 приказује зависност магнетне дубине продирања  $\delta_m$  од спољашњег магнетног поља при различитим радним фреквенцијама у опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ . На фреквенцији од 1 MHz регистровано је константно повећање дубине продирања (са 4,7  $\mu\text{m}$  при нултим магнетним пољима до 7,9  $\mu\text{m}$  при 463 A/m). Повећање радне фреквенције доводи до значајног смањења магнетне дубине продирања (3,3  $\mu\text{m}$  при нултом магнетном пољу до 4,1  $\mu\text{m}$  при 463 A/m @ 5 MHz). Појава благих максимума магнетоотпорности уочених на 4 MHz и 5 MHz (видети слику 4-14.а), има за последицу и благе минимуме магнетне дубине продирања  $\delta_m$ . На 1 MHz и 2 MHz утицај лонгитудиналног једносмерног спољашњег магнетног поља на магнетну дубину продирања је највећи у опсегу ниских магнетних поља (највећи почетни прираштаји  $d\delta_m/dH_{ex}$  са слике 4-17).



Слика 4-17. Израчунате вредности магнетне дубине продирања код аморфне жице  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  у зависности од једносмерног спољашњег магнетног поља при радним фреквенцијама у опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$  (@ $H_{max} = 463 \text{ A/m}$ ) [91].

Фреквентна зависност израчунате магнетне дубине продирања са магнетним пољем као параметром је приказана на слици 4-18.



Слика 4-18. Фреквентна зависност магнетне дубине продирања код аморфне жице  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  при различитим вредностима спољашњег магнетног поља ( $H_{\text{ex}} \leq 463 \text{ A/m}$ ), фреквенција је у логаритамској размери [91].

Већ уочено смањење магнетне дубине продирања са повећањем фреквенције је најизраженије при већим вредности магнетног поља (@ 463 A/m). Све криве показују очекивани тренд засићења ( $\delta_m \sim [\mu(f) \cdot f]^{-1/2}$ , видети на пример криву при најнижој вредности спољашњег магнетног поља  $H_{\text{ex}} = 31 \text{ A/m}$ ). Даљи тренд ове зависности при знатно вишим фреквенцијама (два реда величине веће фреквенције од око неколико стотина MHz) је појава минималне магнетне дубине продирања  $\delta_{\text{min}}$  [57].

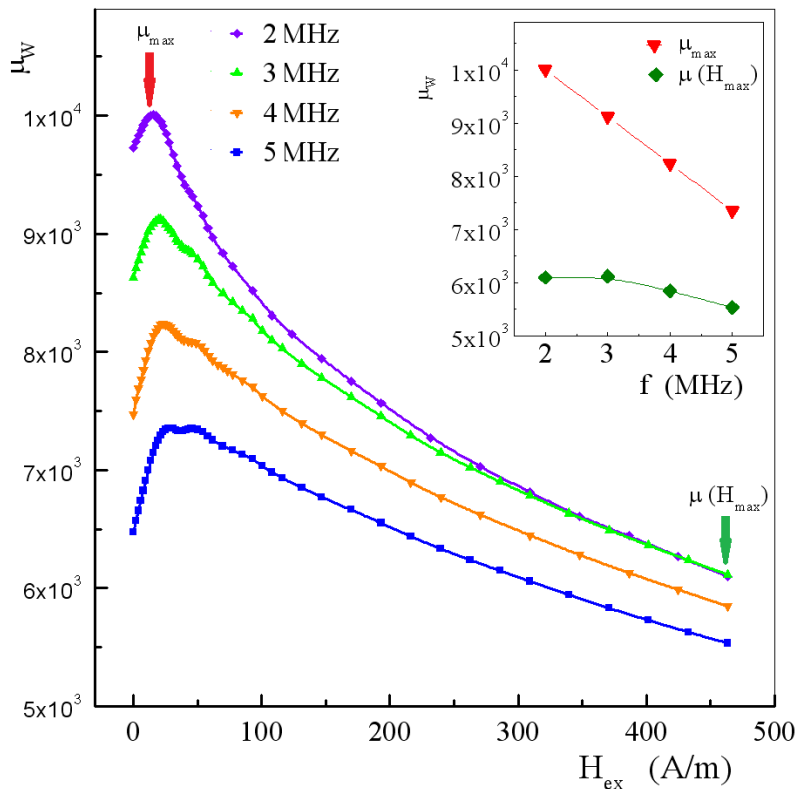
#### 4.5.3 Зависност релативне магнетне пермеабилности од фреквенције и магнетног поља код аморфне жице лејуре $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$

За процену промена магнетне пермеабилности коришћен је модел наизменичне импедансе за цилиндар који су представили Чен и Муњоз (Chen и Munoz [58]). Овај модел полази од дефиниције импедансе једначином  $Z = P / I^2$ , где је P снага по јединици површине (јединичне дужине), а I је ефективна вредност наизменичне струје  $i(t) = I \cdot e^{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t}$  која тече дуж жице. За довољно високе вредности фреквенције важи услов  $2 \cdot (a/\delta_m)^2 > 100$ , а релативна магнетна пермеабилност жице  $\mu_w(H_{\text{ex}}, f)$  може се изразити као:

$$\mu_w(H_{\text{ex}}, f) = \frac{2 \cdot a \cdot M_X(H_{\text{ex}}, f)}{\mu_0 \cdot f \cdot l \cdot \delta_m(H_{\text{ex}}, f)} \quad (8)$$

где је  $\mu_0$  магнетна пермеабилност вакуума. Из приказаног прорачуна магнетне дубине продирања  $\delta_m(H_{ex}, f)$  може се закључити да је однос  $(a/\delta_m) > 10$  задовољен у опсегу фреквенција  $f \in [2 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ , тј. ( $MR \gg R_{dc}$ ). Дакле, ова апроксимација у области високих вредности фреквенција је испуњена за испитивани опсег спољашњег магнетног поља ( $H_{ex} \leq H_{max} = 463 \text{ A/m}$ ).

Добијени резултати магнетне пермеабилности су приказани на слици 4-19. Као што се може приметити, на свим кривама магнетне пермеабилности  $\mu_w$  појава пика је фреквентно зависна. Очекивана смањења  $\mu_{max}$  и  $\mu(H_{max})$  са порастом фреквенције су приказана на инсерту слике 4-19. Максимална вредност пермеабилности  $\mu_{max}$  од око 7400 (при 5 MHz) је нешто нижа од вредности пермеабилности (око 12 000 на истој фреквенцији 5 MHz) микро жице легуре из система CoFeNiMoSiB (пречника металног језгра од 22,4  $\mu\text{m}$  са ултра танким стакленим омотачем од само 0,2  $\mu\text{m}$  [103]). Треба напоменути да магнетна пермеабилност зависи и од циркуларног магнетног поља  $h_{ac}(I_{cc}, f)$  које у нашим експериментима има амплитуду на спољашњем омотачу жице  $I_{cc} / 2 \cdot \pi \cdot a = 22,3 \text{ A/m}$  (ова амплитуда је 14,2 A/m у референци [103]).



Слика 4-19. Зависност релативне магнетне пермеабилности жице  $\mu_w$  код аморфне легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  од лонгитудиналног једносмерног магнетног поља са фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [2 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ .

Инсерт приказује фреквентну зависност максималне вредности пермеабилности  $\mu_{max}$  ( $\blacktriangledown$ ) и вредности пермеабилности регистроване при највећој вредности примењеног магнетног поља  $\mu(H_{max} = 463 \text{ A/m}, \blacklozenge)$  [91].

Критеријум за избор оптималних радних фреквенција дефинише потреба избегавања доминантног утицаја лонгитудиналне анизотропије, тј. динамике



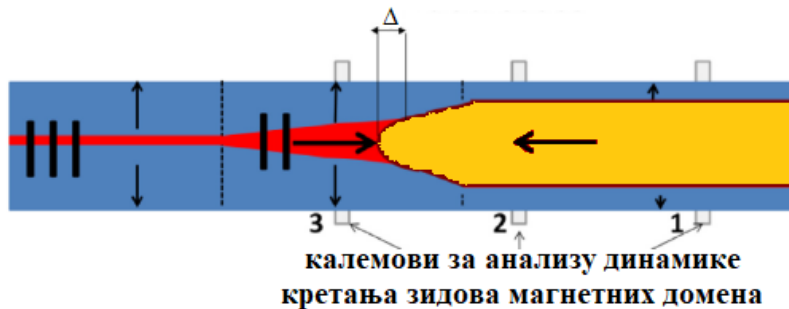
магнећења магнетних домена дуж унутрашњости аморфне жице. Код ових домена се генеришу магнетни шумови услед међусобне интеракције централног лонгитудиналног домена и супротно оријентисаног магнетног домена у облику шиљка на крајевима МИ-елемента (слика 4-20), чиме се значајно смањује осетљивост микромагнетних сензора [104-107].



Слика 4-20. Приказ доменске структуре код аморфне жице на бази кобалта: лонгитудинални домени по оси жице (централни и крајњи домен) и циркуларни домени са наизменично супротно оријентисаним векторима магнетизације (структура „бамбус“ домена) уз површину цилиндра.

Оптималне радне фреквенције МИ-елемента подразумевају доминантан утицај циркуларне магнетне анизотропије, тј. интензиван механизам ротације вектора магнетизације домена по ободу цилиндричног узорка (жице). Тада су вредности магнетне дубине продирања око једне десетине полупречника жице и изражен је утицај спољашњег једносмерног магнетног поља на повећање дубине продирања (тј. на смањење импедансе). Дакле, суштинске интеракције се одигравају при површини феромагнетних жица, када се и достижу највеће вредности осетљивости микромагнетних МИ-сензора неопходних за постизање високих нивоа минијатуризације електронских компоненти у савременој сензорској техници [108].

Овде је потребно напоменути да је тематика динамике магнетних домена у феромагнетним аморфним жицама истраживана у великом броју научних радова [нпр. 106-107, 109-112], при чему се користи експериментална метода Sixtus-Tonks која има неколико подваријанти. На основу резултата ових експеримената је започет инжењеринг кретања зидова магнетних домена са градијентном магнетном анизотропијом (слика 4-21 [112]) с циљем очувања што виших вредности осетљивости микромагнетног сензора.



Слика 4-21. Инжењеринг кретања зидова магнетних домена са градијентном магнетном анизотропијом лонгитудиналних магнетних домена остварен термичким градијентом током термомеханичких третмана [112].

Применом термомеханичких третмана са термичким градијентом успешно се спроводи измена пречника унутрашњег лонгитудиналног магнетног домена по оси аморфне жице, као и брзина кретања и ширина зидова  $\Delta$  овако дизајнираних магнетних домена.

#### 4.5.4 Зависност осетљивости МИ-елемента од фреквенције и магнетног поља код аморфне жице легуре $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$

Осетљивости МИ-елемента у аморфним жицама [113], тракама [114] и вишеслојним филмовима [115] на релативно вишим фреквенцијама ( $f > 1 \text{ MHz}$ ) могу достићи изузетно високе вредности, од чак неколико стотина  $\%/O_e$  ( $1 O_e = 10^3/4\pi \text{ A/m}$ ). Велика осетљивост комплексне импедансе аморфне жице,  $Z$ , на примењено  $dc$  магнетно поље  $H_{ex}$ , кључна је за развој бројних магнетних сензора високих перформанси. Високе вредности осетљивости оваквих сензора се захтевају у многим инжењерским и индустријским применама.

Спољашње лонгитудинално  $dc$  магнетно поље  $H_{ex}$  и циркуларно  $ac$  магнетно поље  $h_{ac}$  (индуковано протоком наизменичне струје  $i_{ac}(t) = I_{cc} \sin(2\pi f t)$ ) утичу на промену магнетне пермабилности  $\mu$ , тако да је импеданса феромагнетног проводника функција три експериментална параметра  $Z = Z(f, H_{ex}, I_{cc})$ .

Ради испитивања осетљивости МИ-елемента веома је битно подсетити се дефиниције МИ-односа (код различитих истраживачких група могу се видети и различите дефиниције), а то је најчешће релативна промена модула импедансе узорка са променом спољашњег  $dc$  магнетног поља ( $H_{ex}$ ):

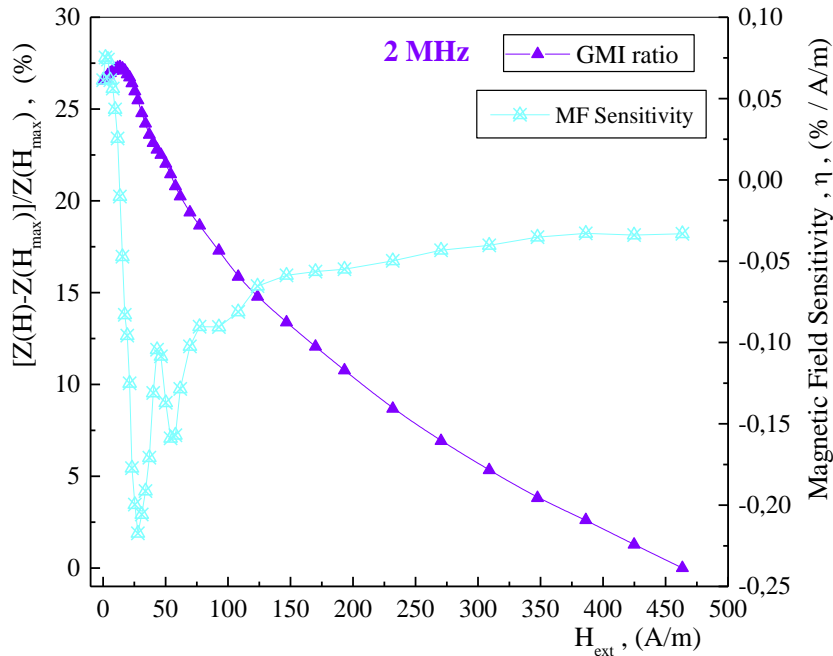
$$\Delta Z / Z = 100\% \times [Z(H_{ex}, f) - Z(H_{max}, f)] / Z(H_{max}, f) \quad (4),$$

где је  $Z(H_{max}, f)$  модул импедансе при максималном спољашњем  $dc$  магнетном пољу и одговарајућој радној фреквенцији. Узорак се најчешће позиционира лонгитудинално (у правцу магнетног поља), тј. у центру система 1Д-Хелмхолцових калемова где је постигнута скоро потпуна хомогеност магнетног поља. Ради анализе могућности примене спроводи се прорачун тзв. сопствене осетљивости МИ-елемента која је дефинисана следећом једначином [52, 53]:

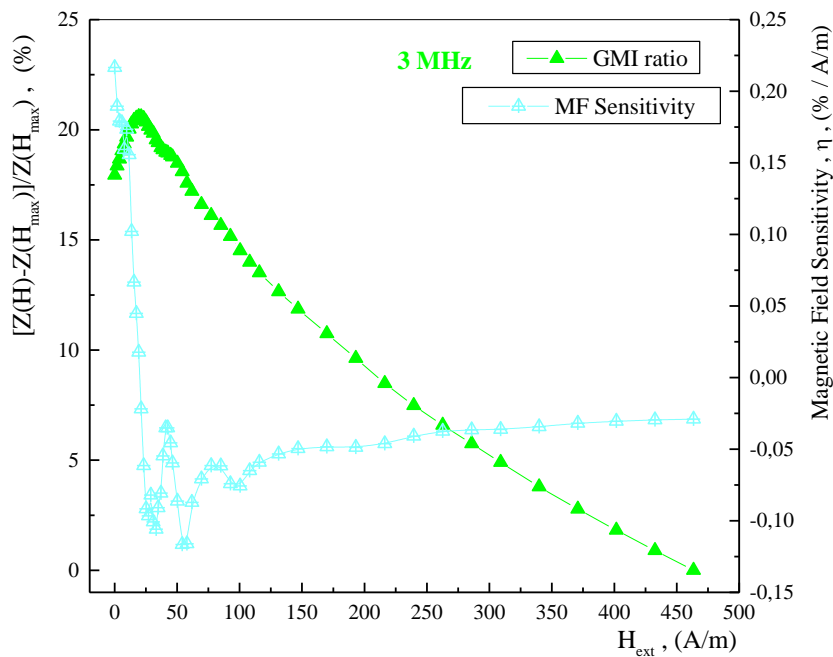
$$\eta = \partial (\Delta Z / Z) / \partial H_{ext} \quad (12).$$

У овом поглављу је презентовано испитивање осетљивости МИ-елемента код жице пречника око  $100 \mu\text{m}$  аморфне легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  у опсегу високих радних фреквенција од  $2 \text{ MHz}$  до  $5 \text{ MHz}$  (@  $H_{max} \approx 463 \text{ A/m}$ ) са циљем процене атрактивности примене жица у сензорици. Мерења импедансе показују константно повећање, да би се при  $5 \text{ MHz}$  достигле вредност од око  $35 \Omega$ . Прорачун МИ-односа показује да се највеће вредности добијају на фреквенцији од  $1 \text{ MHz}$  (@  $H_{max} \approx 463 \text{ A/m}$  је око  $45\%$ ), а затим се МИ-однос смањује. При вишим фреквенцијама је евидентиран и максимум криве  $\Delta Z(H_{ex})/Z$  који одговара пољу магнетне анизотропије  $H_k$  (поглавље 4.5.1 и слика 4-16.) Повећање радних фреквенција праћено је и порастом поља магнетне анизотропије  $H_k$  као резултат доминантног учешћа механизма ротације вектора магнетизације током процеса магнетнења. Овим се повећава и мерни опсег магнетног сензора базираног на примени испитиваног МИ-елемента код кога је евидентирана и промена осетљивости,

тј. пораст фреквенције је праћен и повећањем осетљивости МИ-елемента. На сликама од 4-22 до 4-25 паралелно су приказане зависности МИ-односа  $\Delta Z/Z$  и сопствене осетљивости МИ-елемента  $\eta$  (једначина (12)) код жице аморфне металне легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  од спољашњег магнетног поља (@  $H_{\text{max}} \approx 463 \text{ A/m}$ ) при радним фреквенцијама  $f \in [2 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ .

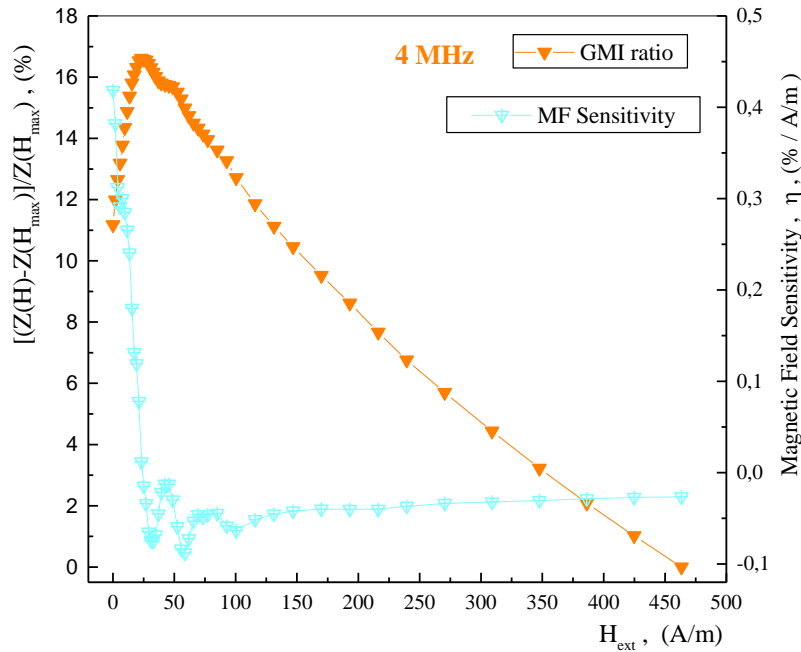


Слика 4-22. Упоредни приказ зависности МИ-односа и осетљивости МИ-елемента од спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{\text{ext}}$  код жице аморфне легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  при фреквенцији  $f = 2 \text{ MHz}$  (@  $H_{\text{max}} \approx 463 \text{ A/m}$ ) [116].

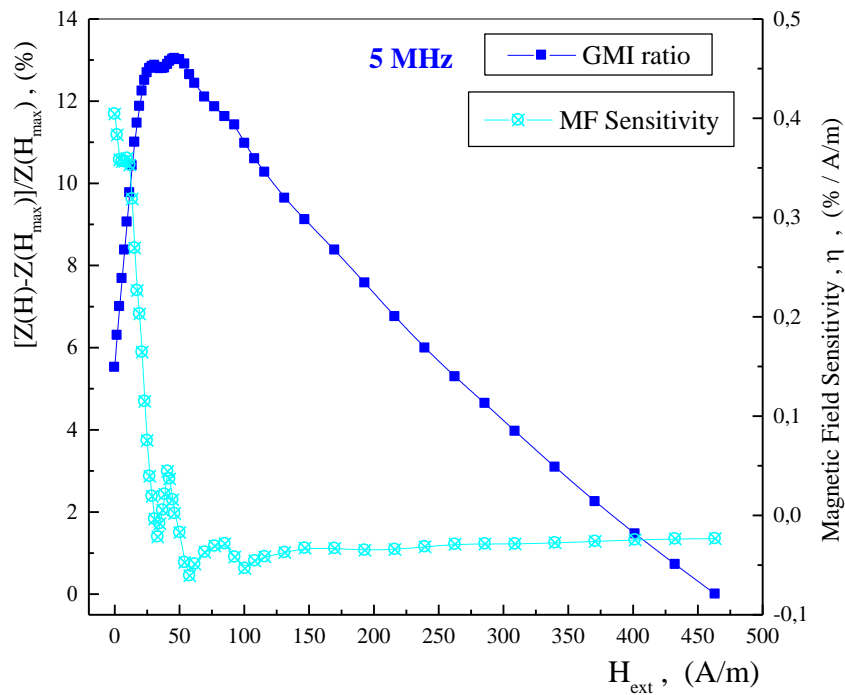


Слика 4-23. Упоредни приказ зависности МИ-односа и осетљивости МИ-елемента од спољашњег  $dc$  магнетног поља  $H_{\text{ext}}$  код жице аморфне легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  при фреквенцији  $f = 3 \text{ MHz}$  (@  $H_{\text{max}} \approx 463 \text{ A/m}$ ) [116].

Евидентирано је константно повећање осетљивости при порасту радне фреквенције. На фреквенцији од 2 MHz осетљивост је најнижа и износи око 0,07% / A/m док при највећим испитиваним фреквенцијама од 4 MHz и 5 MHz осетљивост достиже вредности око 0,4%/A/m [116].



Слика 4-24. Упоредни приказ зависности МИ-односа и осетљивости МИ-елемента од спољашњег dc магнетног поља  $H_{ext}$  код жице аморфне легуре  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  при фреквенцији  $f = 4$  MHz (@  $H_{max} \approx 463$  A/m) [116].



Слика 4-25. Упоредни приказ зависности МИ-односа и осетљивости МИ-елемента од спољашњег dc магнетног поља  $H_{ext}$  код жице аморфне легуре  $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$  при фреквенцији  $f = 5$  MHz (@  $H_{max} \approx 463$  A/m) [116].

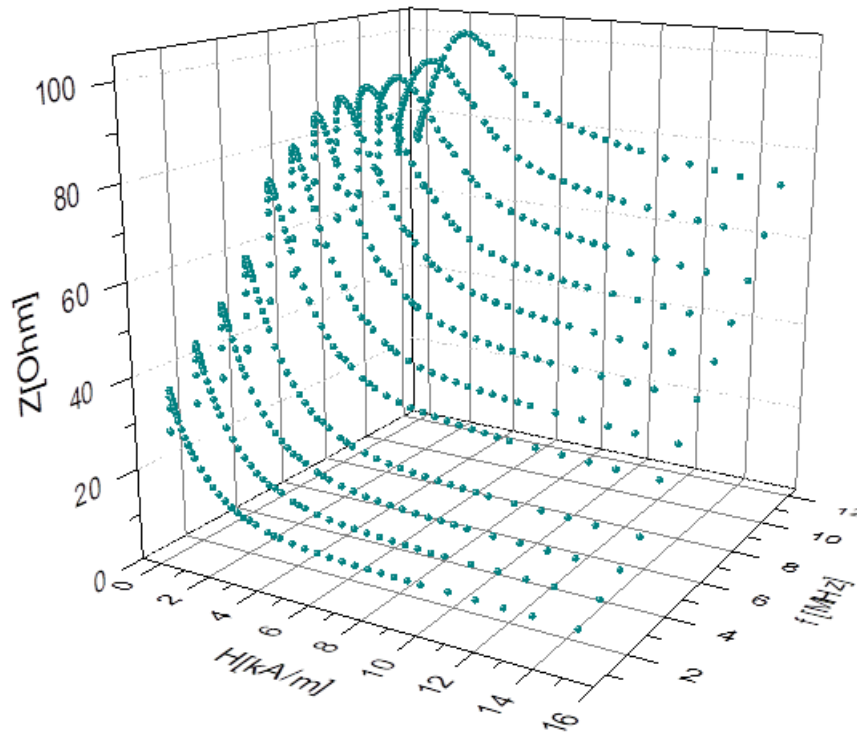
При анализи приказаних резултата потребно је нагласити да су овде приказане осетљивости појединачног сензорског МИ-елемента, док је коначна осетљивост магнетоимпедансног сензора дефинисана одабраним електричним колом при реализацији самог сензора (нпр. Колпицов осцилатор [117] или CMOS IC мултивибратор [118, 119] са високом резолуцијом мерења магнетне индукције од око 1 pT).

#### 4.5.5 Магнетоимпедансни ефекат аморфне жице легуре $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$

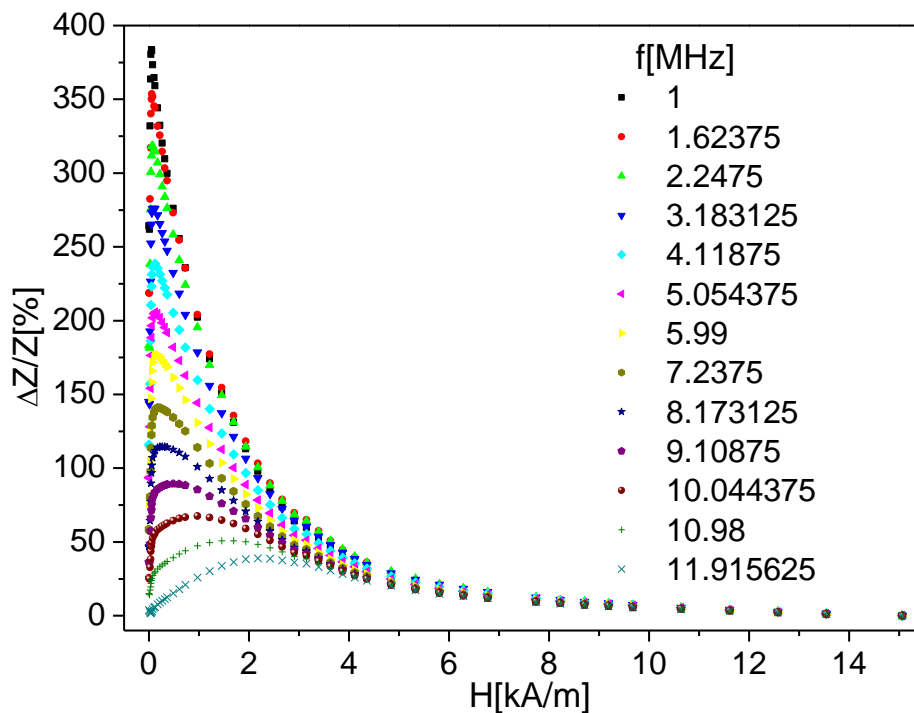
У овом поглављу су приказани резултати испитивања својстава МИ-елемента аморфних жица легуре  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  на почетку средње фреквентног опсега ( $1 \text{ MHz} \leq f \leq 12 \text{ MHz}$ , [56]) и комплементарна су са напред презентованим истраживањима МИ-ефекта код аморфних жица легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ , а имају за циљ поређење МИ-својстава феромагнетних жица са сличним карактеристикама. Фреквентна зависност модула магнетоимпедансе  $Z(H, f)$  узорка жице дужине 10 mm, пречника 110  $\mu\text{m}$  је мерена помоћу векторског анализатора мреже (VNA Agilent 8753ES) у лонгитудиналном једносмерном спољашњем магнетном пољу хомогености од око 99,7% (генерисаном системима 1Д-Хелмхолцових калемова) максималног интензитета од око 15 kA/m [120].

На слици 4-26.а приказане су зависности модула магнетоимпедансе  $Z(H, f)$  од једносмерног спољашњег магнетног поља за радне фреквенције у опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 12 \text{ MHz}]$  ( $@H_{\text{max}} \approx 15 \text{ kA/m}$ ). На ову зависност генерално утиче дистрибуција магнетне анизотропије с обзиром да аморфне металне легуре на бази кобалта поседују негативни коефицијент магнетострикције. Примећује се очекивано константно повећање импедансе, као и ширење криве  $Z(H)$  са порастом фреквенције. Позиционирање пикова карактерише померање ка вишим вредностима спољашњег једносмерног магнетног поља, што указује на пораст доприноса механизма ротације магнетизације који доминира на радним фреквенцијама већим од фреквенције релаксације доменског зида [56]. Пикови кривих  $Z(H)$  су позиционирани на вредностима магнетног поља анизотропије  $H_k$ , што указује на доминацију механизма ротације магнетизације код циркуларне магнетне пермеабилности. Достигнуте максималне вредности модула импедансе од скоро 100  $\Omega$  регистроване су на радној фреквенцији од око 12 MHz.

На слици 4-26.б су приказане зависности МИ-односа ( $\Delta Z/Z$ ) од спољашњег једносмерног магнетног поља код жице аморфне легуре  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  са фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 12 \text{ MHz}]$ . Утицај фреквенције на максималне вредности модула импедансе  $Z_{\text{max}}$  је највећи у почетном фреквентном опсегу ( $1 \text{ MHz} \leq f \leq 7 \text{ MHz}$ ) где се може уочити највећи нагиб  $dZ_{\text{max}}/df$  (слика 4-27). Овакво понашање је у корелацији са појавом смањења магнетне дубине продирања  $\delta_m$  при повећању фреквенције, које је најизраженије на нижим радним фреквенцијама [91]. Овај закључак је изведен на основу модела импедансе за цилиндричне узорке који су првобитно развили Чен и Муњоз [58].



a

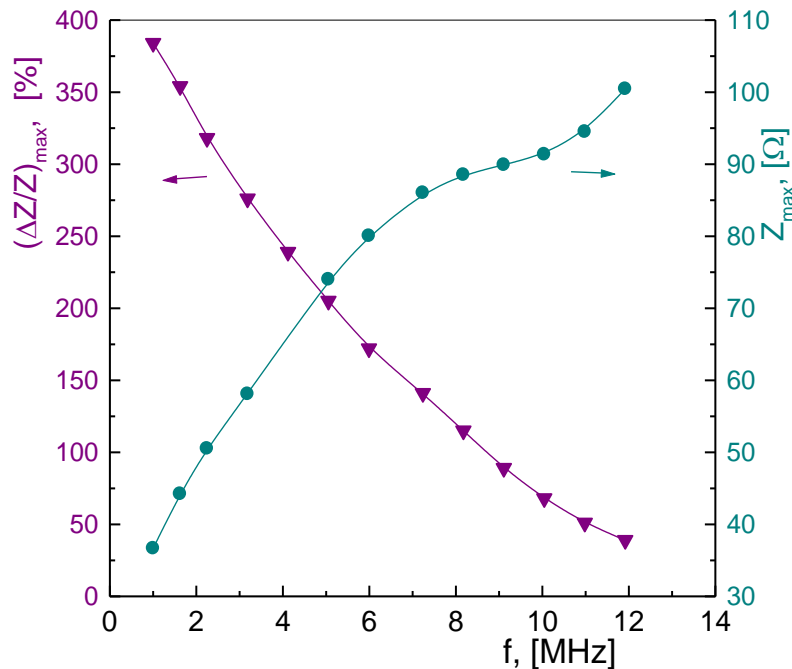


b

Слика 4-26. а) Зависности модула магнетоимпедансе  $Z$  ( $H$ ,  $f$ ) и б) зависност МИ-односа ( $\Delta Z/Z$ ) од спољашњег једносмерног магнетног поља код жице аморфне легуре  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  са фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 12 \text{ MHz}]$ , ( $@H_{\text{max}} \approx 15 \text{ kA/m}$ ), мерено инструментом VNA Agilent 8753ES.

Слика 4-27 показује супротне трендове промена фреквентне зависности максималне импедансе  $Z_{\text{max}}$  и максималног МИ-односа  $(\Delta Z/Z)_{\text{max}}$ . Максималне

вредности импедансе  $Z_{\max}$  се повећавају док се максимални МИ-однос  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  смањује при повећању фреквенције. Као што је већ примећено, крива  $Z_{\max}$  показује два различита нагиба, и то први већи је до 7 MHz, а други нижи је од 8 MHz до 12 MHz.

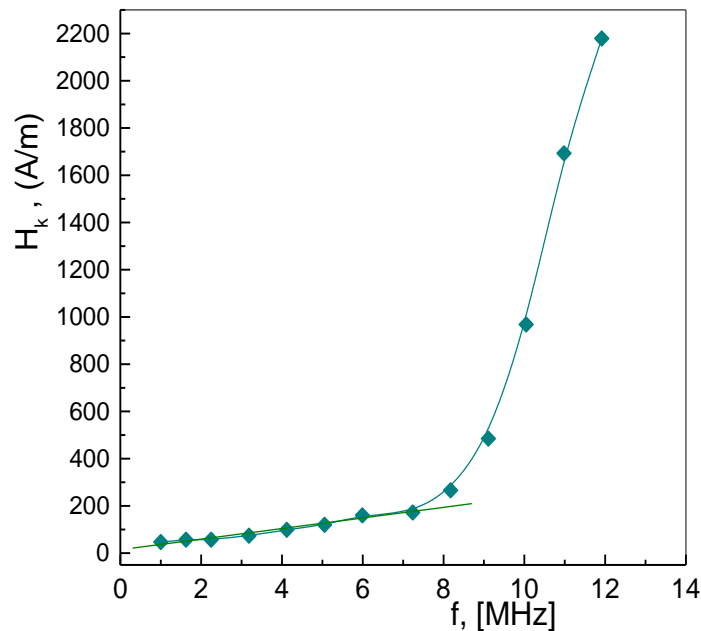


Слика 4-27. Фреквентна зависност максималног МИ-односа  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  и модула максималне магнетоимпедансе  $Z_{\max}$  код жице аморфне легуре  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  (максимални модул импедансе  $Z_{\max}$  је при различитим магнетним пољима  $H_{\text{ex}}$ ).

Профил максималног МИ-односа тестираног узорка аморфне жице  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  са радном фреквенцијом као параметром је такође приказан на слици 4-27. Вредност од 384% за  $(\Delta Z/Z)_{\max}$  је регистрована на фреквенцији од 1 MHz, док се са даљим порастом фреквенције бележи константно смањење као резултат опадања циркуларне пермеабилности. Као поређење, подсетимо да је код аморфних жица састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  максимални МИ-однос од око 330% регистрован у фреквентном опсегу  $f \in [700 \text{ kHz}, 1 \text{ MHz}]$  (слика 4-13). Уочене фреквентне зависности МИ-односа код обе испитиване легуре на бази кобалта се веома добро слажу и са теоријским предвиђањима [58], као и са експерименталним резултатима добијеним код МИ-елемената аморфних легура са великим садржајем кобалта [102].

Слика 4-28 приказује линеаран пораст поља магнетне анизотропије  $H_k$  у фреквентном опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}, 7 \text{ MHz}]$ , који је сличан већ уоченом понашању  $H_k(f)$  код аморфних жица састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  при фреквенцијама ( $1 \text{ MHz} \leq f \leq 5 \text{ MHz}$ , слика 4-16). Ово линеарно (и скоро троструко повећање  $H_k$ ) при вишим фреквенцијама у опсегу 8 MHz - 12 MHz је праћено изузетно великим порастом поља магнетне анизотропије  $H_k$ . Веома слично понашање поља магнетне анизотропије је добијено испитивањем феромагнетних микрожица система  $\text{CoFeSiBNb}$  на бази кобалта (нешто нижег пречника 50  $\mu\text{m}$  и мање дужине 7 mm). Постепено почетно линеарно повећање зависности  $H_k(f)$  је затим праћено огромним повећањем поља магнетне анизотропије  $H_k$  услед великих промена два кључна параметра која

регулишу МИ ефекат: магнетне дубине продирања  $\delta_m$  и ас магнетне пермеабилности  $\mu_{ac}$  [121]).



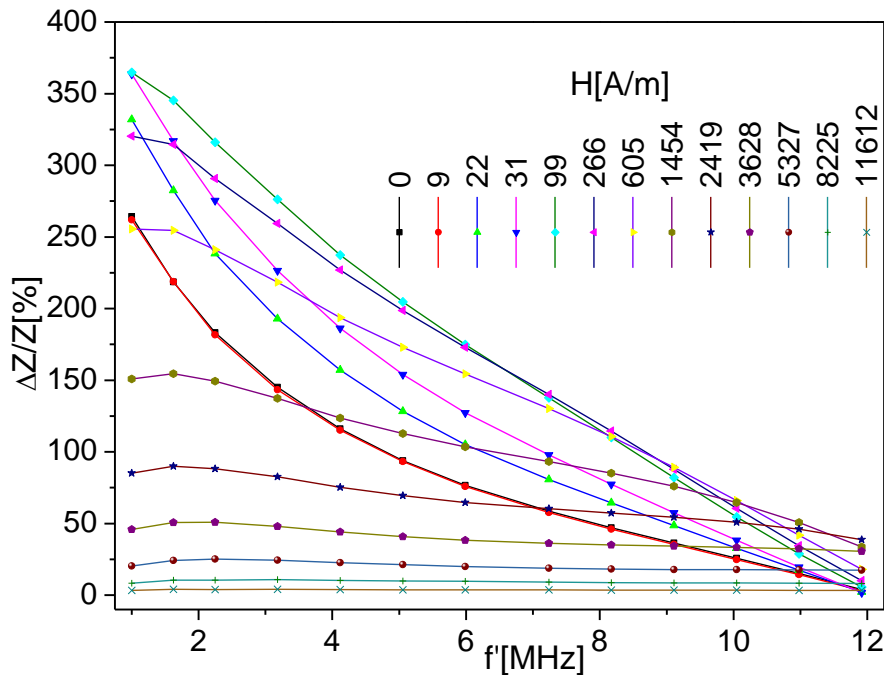
Слика 4-28. Фреквентна зависност поља магнетне анизотропије  $H_k$  код жице аморфне легуре  $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$  (@ $H_{max} \approx 15$  kA/m).

Уочени фреквентни опсежи зависности  $H_k$  ( $f$ ) су веома слични понашању максималне импедансе  $Z_{max}$  и биће у фокусу током следећих експеримената и одговарајућих теоријских објашњења. Примена МИ-елемента за магнетне сензоре је у линеарној области промена комплексног модула импедансе (при  $H < H_k$  [122]), тј. погодни су за детекцију веома ниских вредности једносмерног магнетног поља ( $H_{ex} < 200$  A/m).

Зависности МИ-односа од радне фреквенције при различитим вредностима спољашњег једносмерног магнетног поља у опсегу  $H_{ex} \in [0; 11,6$  kA/m] је приказана на слици 4-29. При нижим вредностима магнетног поља ( $H_{ex} \leq 0,6$  kA/m) криве карактерише константно смањење, да би потом дошло до развоја благо израженог пика на фреквенцији од око 1,6 MHz. Максимална вредност МИ-односа од 365% која је измерена при интензитету магнетног поља од 99 A/m потврдила је закључак о могућностима ефикасне детекције ниских вредности магнетног поља коришћењем МИ-елемената начињених од аморфних жица легура на бази кобалта.

Ради поређења са овде приказаним резултатима може се као пример узети ГМИ-однос од око 320% регистрован код аморфних жица система  $CoFeNiBSiMo$  са стакленим омотачем, који је евидентиран при веома високим радним фреквенцијама (од чак 200 MHz) и при нешто вишим максималним вредностима примењеног спољашњег магнетног поља ( $H_{max} \approx 25$  kA/m) [92].





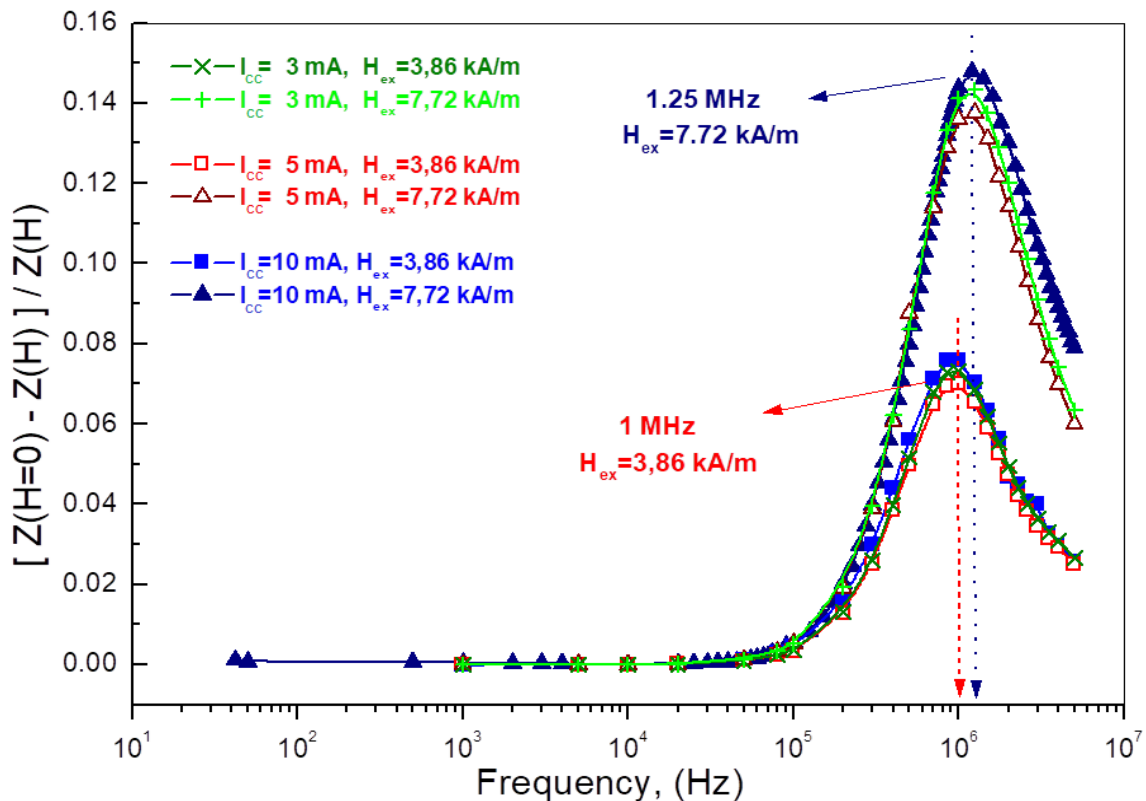
Слика 4-29. Зависности МИ-односа од радне фреквенције код жице аморфне легуре  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  са магнетним пољем као параметром у опсегу  $H_{ex} \in [0; 11,6 \text{ kA/m}]$ .

#### 4.5.6 Магнетоимпедансни ефекат аморфне жице легуре $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$

Поред аморфних феромагнетних легура на бази кобалта, изузетне магнетно меке карактеристике поседују и поједине аморфне и нанокристалне легуре на бази гвожђа [24, 38, 53, 123-125], међу којима се издвајају легуре из система FINEMET Fe-M-Cu-Si-B (M=Nb). Један од често испитиваних је и састав базиран на стандардном систему Fe-Si-B са додатком 3ат.% ниобијума и 1ат.% бакра:  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ . Генерално, аморфне жице легура на бази гвожђа поседују ниже вредности ефективне магнетне пермеабилности услед радијалне доменске конфигурације при површини цилиндра (слика 2-17). С обзиром на директну повезаност пермеабилности са магнетном дубином продирања, истраживања спроведена над узорцима аморфних жица састава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  су финализована прорачунима магнетне дубине продирања  $\delta_m(H_{ex}, f)$ .

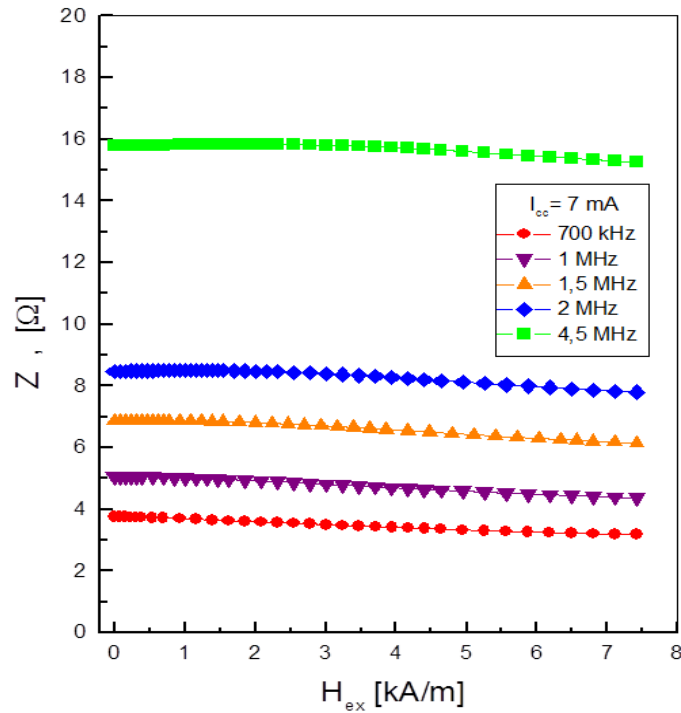
Слика 4-30 приказује фреквентну зависност МИ-односа (рачунатог коришћењем импедансе без  $Z(0)$  и при дејству  $Z(H_{ex})$  спољашњег једносмерног магнетног поља ( $[Z(0) - Z(H_{ex})]/Z(H_{ex})$ ) за две вредности магнетног поља  $H_{ex}$ : 3,86 kA/m и 7,72 kA/m при различитим амплитудама наизменичне струје кроз узорак жице аморфне легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ . Критична фреквенција од око 30 kHz (када је  $\delta_m \approx a = 75 \mu\text{m}$ ) уочена је као вредност када одпочиње МИ ефекат, тј. када почињу промене импедансе при датој (константној) вредности  $H_{ex}$ . Сам МИ-однос најпре расте са фреквенцијом и достиже максимум који је зависан од примењеног спољашњег магнетног поља (пораст фреквенције при којој је

регистрован максимум са повећањем  $H_{ex}$ :  $1\text{ MHz}@3,86\text{ kA/m}$  и  $1,25\text{ MHz}@7,72\text{ kA/m}$ . Максимална вредност од око 15% забележена је на фреквенцији од 1,25 MHz ( $@H_{ex} = 7,72\text{ kA/m}$ ). Приметна је и делимична зависност максимума од амплитуде наизменичне струје  $I_{cc}$  (3mA, 5 mA и 10 mA), тј. од вредности амплитуде циркуларног ас магнетног поља  $h_{ac}$  (чија је вредност на спољашњем омотачу - при површини жице  $I_{cc}/2 \cdot \pi \cdot a$ , и при највећој струји од 10 mA износи  $h_{ac} \approx 21\text{ A/m}$ ), тј. добијене су нешто више вредности МИ-односа у односу на прва два мерења. Са даљим повећањем фреквенције, МИ-однос се смањује услед смањења магнетне пермеабилности (снажно пригушивање кретања зидова магнетних домена услед појаве индукованих вртложних струја).



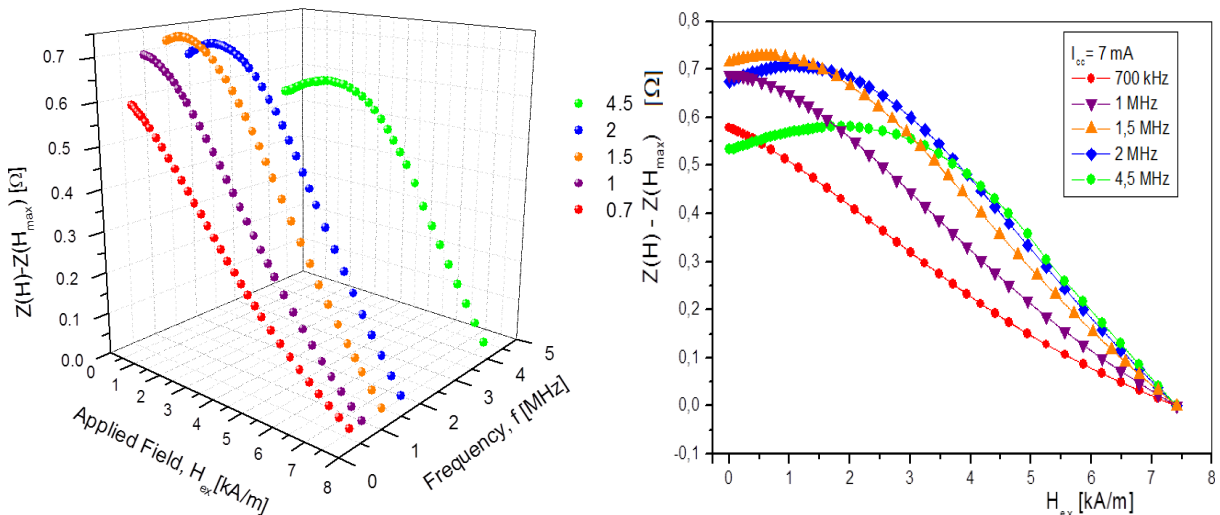
Слика 4-30. Фреквентна зависност МИ-односа ( $[Z(0) - Z(H_{ex})] / Z(H_{ex})$ ) код жице аморфне легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  за  $H_{ex} = 3,86\text{ kA/m}$  и  $H_{ex} = 7,72\text{ kA/m}$  (при амплитудама наизменичне струје  $I_{cc}$  кроз узорак 3mA, 5 mA и 10 mA) [126].

Слика 4-31 приказује зависности модула магнетоимпедансе од спољашњег једносмерног  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$  код жице аморфне легуре састава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  са радном фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [0,7\text{ MHz}; 4,5\text{ MHz}]$  и  $@H_{max} \approx 7,5\text{ kA/m}$ . Очекивани пораст модула импедансе са повећањем фреквенције (са око  $4\ \Omega @ 0,7\text{ MHz}$  до око  $16\ \Omega @ 4,5\text{ MHz}$ ), као и смањење импедансе при повећању интензитета магнетног поља услед пораста дубине продирања карактерише све испитиване фреквенције.



Слика 4-31. Зависности модула магнетоимпедансе од спољашњег једносмерног магнетног поља код жице аморфне легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  са фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [0,7 \text{ MHz}; 4,5 \text{ MHz}]$ , ( $@H_{\text{max}} \approx 7,5 \text{ kA/m}$ ; амплитуда наизменичне струје кроз узорак 7 mA) [126].

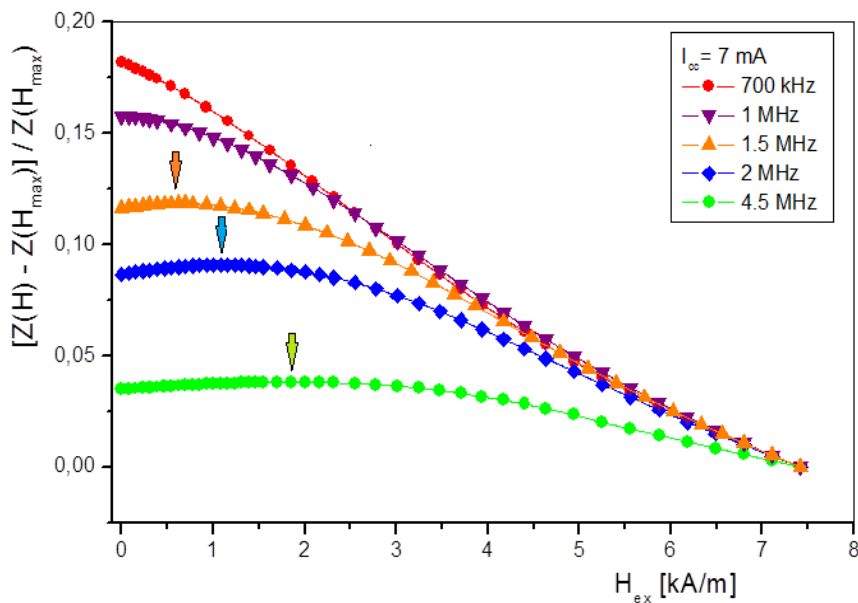
Бољи увид у промене импедансе је могуће сагледати на основу зависности разлике модула магнетоимпедансе  $[Z(H) - Z(H_{\text{max}})]$  од спољашњег једносмерног магнетног поља са фреквенцијом као параметром која је приказана на слици 4-32 ( $@H_{\text{max}} \approx 7,5 \text{ kA/m}$ ).



Слика 4-32. Зависности разлике модула магнетоимпедансе  $[Z(H) - Z(H_{\text{max}})]$  од спољашњег једносмерног магнетног поља код жице аморфне легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  са фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [0,7 \text{ MHz}; 4,5 \text{ MHz}]$ , ( $@H_{\text{max}} \approx 7,5 \text{ kA/m}$ ; амплитуда наизменичне струје кроз узорак 7 mA) [126].

Највећа разлика импеданси од око  $0,75 \Omega$  је регистрована при радној фреквенцији од  $1,5 \text{ MHz}$ . Приметна је и промена облика кривих, која из карактеристичног монотоног опадања (ниже фреквенције  $f \leq 1 \text{ MHz}$ ) постепено еволуира у криве са евидентном генезом благог пика (фреквенције изнад  $1,5 \text{ MHz}$ ).

МИ-однос тестираног FeNbCuSiB МИ-елемента са радном фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [0,7 \text{ MHz}; 4,5 \text{ MHz}]$  приказан је на слици 4-33. Највећа вредност  $\Delta Z/Z$  регистрована је на фреквенцији од  $0,7 \text{ MHz}$ , док је са даљим повећањем фреквенције забележено константно смањење, као последица смањења циркуларне пермеабилности. У средње фреквентном опсегу (који обично почиње око  $1 \text{ MHz}$ ) скин ефекат и механизам ротације вектора магнетизације су доминантни у процесу циркуларног магнећења (кретање зидова магнетних домена је блокирано). Стога се облик зависности МИ-односа од спољашњег једносмерног магнетног поља значајно мења и евидентира се генеза благог пика.

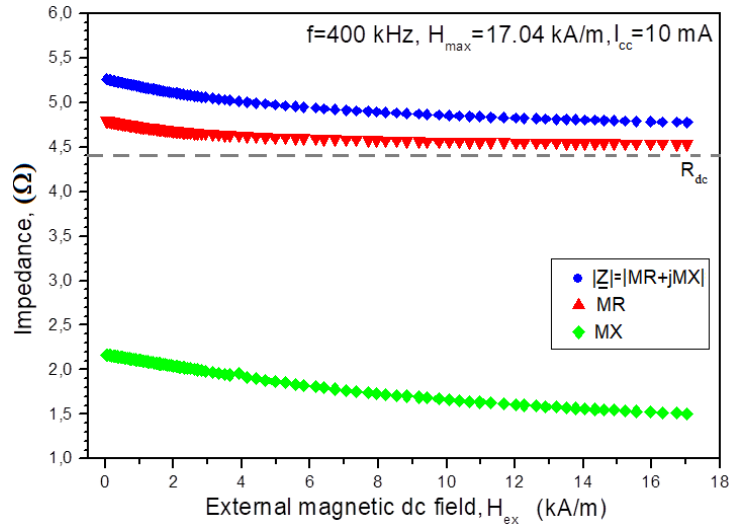


Слика 4-33. Зависности МИ-односа од спољашњег једносмерног магнетног поља код жице аморфне легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  са фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [0,7 \text{ MHz}, 4,5 \text{ MHz}]$  ( $@H_{\text{max}} \approx 7,5 \text{ kA/m}$  амплитуда наизменичне струје  $7 \text{ mA}$ ) стрелицама  $\downarrow$  су обележене вредности поља магнетне анизотропије  $H_k$  [126].

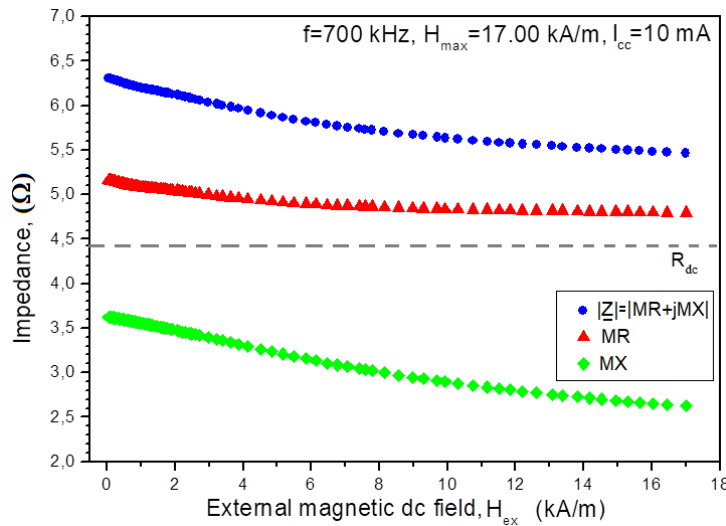
За разлику од монотоног опадања уоченог при  $0,7 \text{ MHz}$ , крива добијена на  $1 \text{ MHz}$  показује благо колено (запажа се почетак развоја пика), док је даље повећање фреквенције ( $1,5 \text{ MHz}$ ) праћено еволуцијом слабог пика чији је пораст надаље све израженији (слика 4-32). Генеза пика указује на пораст доприноса механизма ротације вектора магнетизације који се појављује изнад фреквенције релаксације зидова магнетних домена. МИ-профили који поседују благи пик позициониран при вредности поља магнетне анизотропије  $H_k$ , указују на доминантан механизам ротације магнетизације код циркуларне пермеабилности. Приметно је и двостуко повећање поља магнетне анизотропије  $H_k$  при порасту радне фреквенције са  $2 \text{ MHz}$  на  $4,5 \text{ MHz}$ .

Слика 4-34 приказује зависности магнетоотпорности, магнетореактансе и модула магнетоимпедансе од спољашњег једносмерног магнетног поља код жице аморфне легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  при три радне фреквенције у опсегу  $f \leq 1,2 \text{ MHz}$ ,

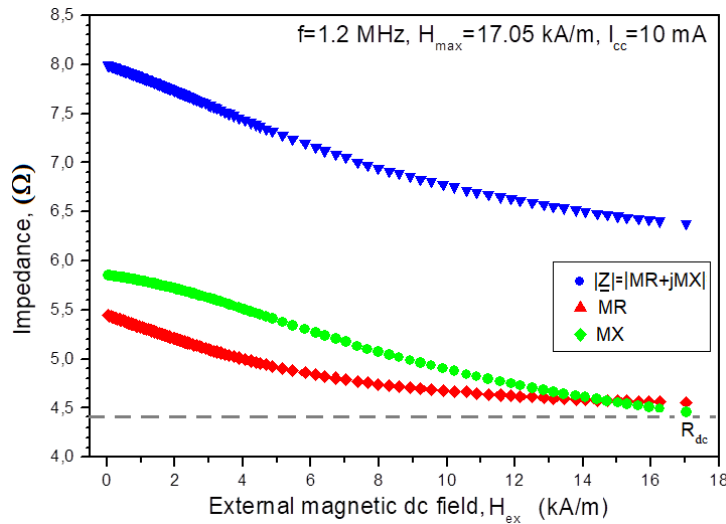
а при увећаним вредностима максималног магнетног поља и амплитуде наизменичне струје кроз узорак (@ $H_{\max} \approx 17 \text{ kA/m}$  и @ $I_{\text{cc}} \approx 10 \text{ mA}$ ).



а



б

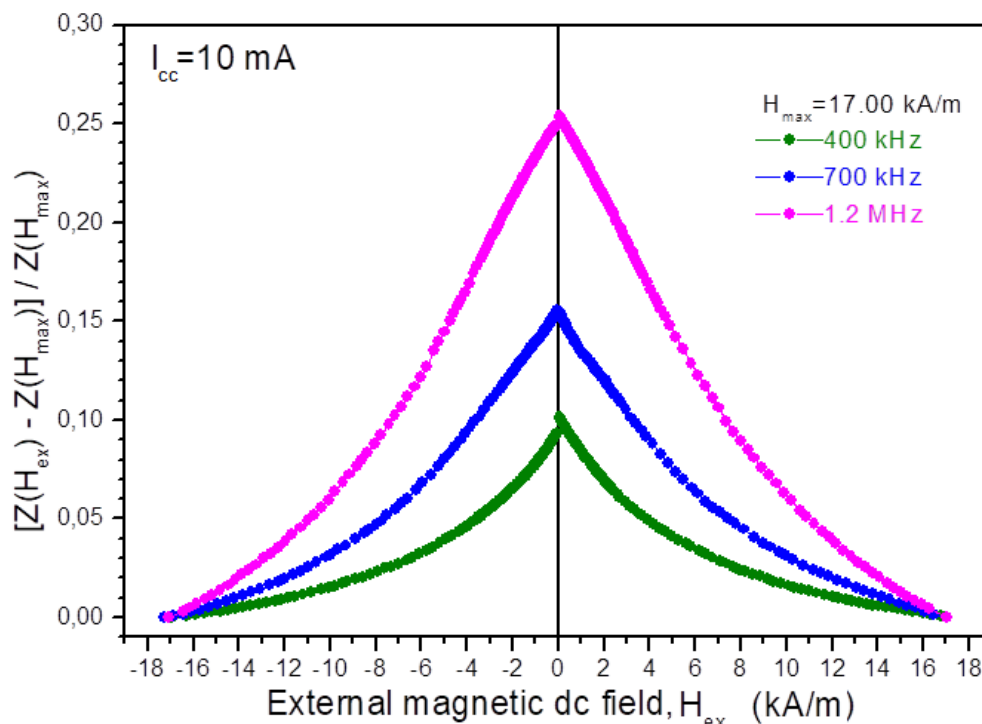


в

Слика 4-34. Зависности магнетоотпорности, магнетореактансе и модула магнетоимпедансе од спољашњег једносмерног магнетног поља код жице аморфне легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  при фреквенцијама а) 0,4 MHz; б) 0,7 MHz и в) 1,2 MHz (@ $H_{\max} \approx 17 \text{ kA/m}$  и @ $I_{\text{cc}} \approx 10 \text{ mA}$ ) [127].

Све три криве карактерише опадање са повећањем спољашњег магнетног поља  $H_{ex}$  и очекивано константно повећање вредности свих компоненти са порастом радне фреквенције. На релативно ниским фреквенцијама, реална компонента импедансе има доминантан утицај на промену модула импедансе [56, 92]. Наиме, при високим вредностима магнетног поља  $H_{max}$  и релативно ниским фреквенцијама (400 kHz), скин ефекат је ниског интензитета па је магнетна дубина продирања велика ( $\delta_m \leq a$ , проток наелектрисања је по целом попречном пресеку жице). Дакле, магнетоотпорност MR је доминантна компонента магнетоимпедансе  $Z$ , и обе зависности од спољашњег магнетног поља MR ( $H_{ex}$ ) и  $Z$  ( $H_{ex}$ ) показују монотонно смањење са тенденцијом ка достизању вредности једносмерног електричног отпора  $Z$  ( $H_{ex}$ )  $\approx$  MR ( $H_{max}$ )  $\approx$   $R_{dc} \approx 4,4 \Omega$ . При даљем повећању фреквенције, пораст магнетореактансе  $MX$  ( $H_{ex}$ ) је инензивнији од пораста магнетоотпорности MR ( $H_{ex}$ ) и при радној фреквенцији од 1,2 MHz при сатурацији МИ-ефекта ( $H_{ex} \approx H_{max}$ ) обе компоненте магнетоимпедансе имају скоро идентичне вредности блиске вредности једносмерног електричног отпора  $R_{dc}$  (слика 4-34.в) [58, 118]. Овакав тренд пораста магнетореактансе у односу на магнетоотпорност се запажа и при знатно вишим радним фреквенцијама МИ-елемента (од око неколико стотина мегахерца [26, 128]).

Слика 4-35 приказује зависности МИ-односа од спољашњег једносмерног лонгитудиналног магнетног поља код жице аморфне легуре  $Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$  са радном фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [0,4 \text{ MHz}; 1,2 \text{ MHz}]$  а при увећаним вредностима максималног магнетног поља и амплитуде наизменичне струје која протиче кроз узорак ( $@H_{max} \approx 17 \text{ kA/m}$  и  $@I_{cc} \approx 10 \text{ mA}$ ).



Слика 4-35. Зависности МИ-односа од спољашњег једносмерног магнетног поља код жице аморфне легуре  $Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$  са радном фреквенцијом као параметром у опсегу  $f \in [0,4 \text{ MHz}, 1,2 \text{ MHz}]$  ( $@H_{max} \approx 17 \text{ kA/m}$ ), амплитуда наизменичне струје кроз узорак  $I_{cc} \approx 10 \text{ mA}$ ) [127].

На свим радним фреквенцијама су евидентиране криве монотоног опадања које су својствене аморфним легурама са позитивном магнетострикцијом (тј. легурама на бази гвожђа). На константно смањење модула импедансе са повећањем једносмерног магнетног поља  $H_{ex}$  (а самим тим и на смањење вредности МИ-односа приказаног на слици 4-35) утиче процес магнећења који се одвија механизмом померања зидова магнетних домена. У случају испитиваног нискофреквентног опсега  $f \in [400 \text{ kHz}, 1,2 \text{ MHz}]$ ) осно-лонгитудинална анизотропија у језгру жице као извор промена магнетне пермеабилности је доминантна над циркуларном анизотропијом на ободној површини аморфне жице.

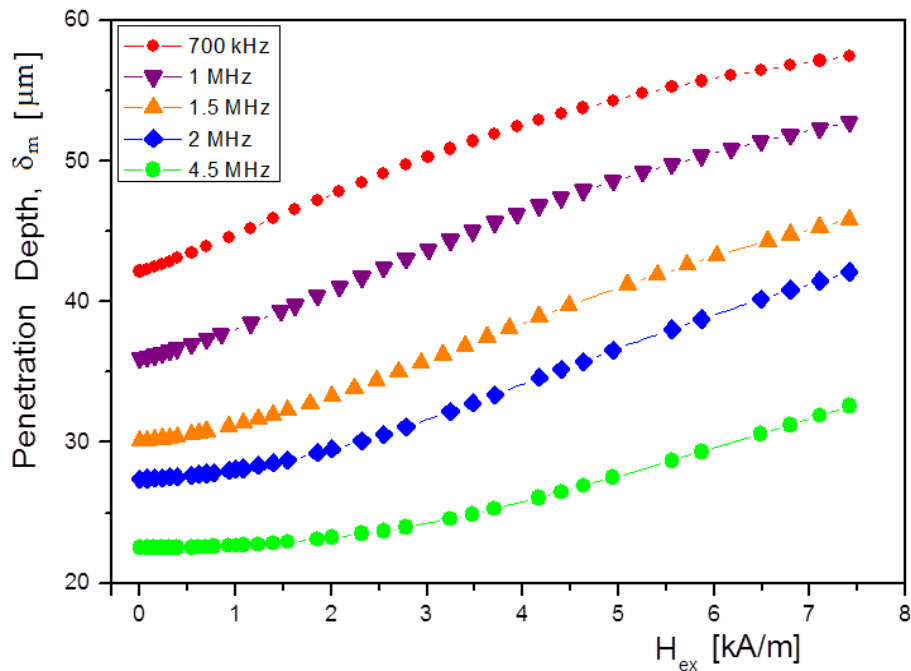
Евидентан је и пораст вредности МИ-односа са порастом радне фреквенције, а примењено максимално магнетно поље од око  $17 \text{ kA/m}$  није довело до магнетног засићења МИ-ефекта. Максимум МИ-односа од око 26% је регистрован при радној фреквенцији од  $1,2 \text{ MHz}$  и са осетљивошћу МИ-елемента од око  $1,862 \text{ \%/kA/m}$  [127]. Достигнуте вредности МИ-односа су у доброј сагласности са литературним подацима за испитивану неодгревану жицу исте легуре нешто мањег пречника од  $133 \text{ \mu m}$  [63].

С обзиром на наставак тренда даље минијатуризације савремене магнетне сензорске технике интересантно је приказати и актуелне податке из референтних научних извора који садрже резултате истраживања микрожица легура на бази гвожђа са стакленим омотачем (комполит метална аморфна легура-борсиликатно стакло). Микрожице аморфне легуре састава  $\text{Fe}_{75}\text{B}_9\text{Si}_{12}\text{C}_4$  са стакленим омотачем укупног пречника од око  $17 \text{ \mu m}$  (метално језгро пречника од око  $15 \text{ \mu m}$ ) након термомеханичких третмана спроведених са циљем иницирања процеса структурне релаксације (истовремено одгревање и механичко напрезање) поседују МИ-однос од око 18% (@ $10 \text{ MHz}$  и  $H_{max} \approx 17 \text{ kA/m}$  [129]).

#### 4.5.7 Зависност магнетне дубине продирања од фреквенције и магнетног поља код аморфне жице легуре $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$

Аналогно са истраживањима спроведених код аморфних жица легуре на бази кобалта састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  обављене су анализе зависности магнетне дубине продирања код аморфне жице легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ . На слици 4-36 приказане су вредности магнетне дубине продирања у зависности од једносмерног спољашњег магнетног поља (@ $H_{max} = 7,5 \text{ kA/m}$  и @ $I_{cc} \approx 7 \text{ mA}$ ). Израчунавања магнетне дубине продирања  $\delta_m(H_{ex}, f)$  су спроведена коришћењем једначине (7) на основу измерних експерименталних података за  $R_{dc}$  и магнетоотпорност  $MR(H_{ex}, f)$  при радним фреквенцијама у опсегу  $f \in [0,7 \text{ MHz}; 4,5 \text{ MHz}]$ .

Све криве приказују очекивани пораст вредности магнетне дубине продирања са порастом интензитета једносмерног спољашњег магнетног поља, а може се рећи да примењено максимално магнетно поље од  $7,5 \text{ kA/m}$  није довело до магнетног засићења МИ-ефекта. На фреквенцији од  $0,7 \text{ MHz}$  регистровано је константно повећање магнетне дубине продирања (са  $42 \text{ \mu m}$  при нултим магнетним пољима до  $57 \text{ \mu m}$  при  $7,5 \text{ kA/m}$ ). Такође, евидентно је и смањење магнетне дубине продирања са порастом радне фреквенције [130].



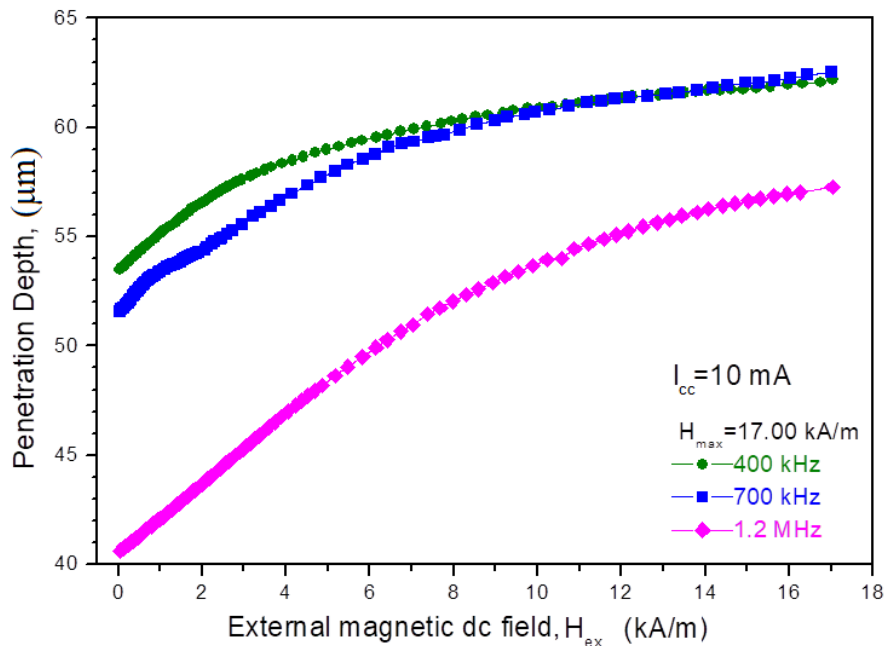
Слика 4-36. Израчунате вредности магнетне дубине продирања код аморфне жице легуре  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  у зависности од једносмерног спољашњег магнетног поља при радним фреквенцијама у опсегу  $f \in [0,7 \text{ MHz}, 4,5 \text{ MHz}]$  ( $@H_{\text{max}}=7,5 \text{ kA/m}$ ,  $@I_{\text{cc}} \approx 7 \text{ mA}$ ) [126].

Повећање фреквенције на 4,5 MHz доводи до значајног смањења магнетне дубине продирања (на 22  $\mu\text{m}$  при нултом магнетном пољу до 32  $\mu\text{m}$  при 7,5 kA/m). Истовремено, приментно је да је при нижим радним фреквенцијама, а при истој промени спољашњег магнетног поља, укупна промена магнетне дубине продирања нешто израженија (око 15  $\mu\text{m}$  при фреквенцији 0,7 MHz у односу на око 10  $\mu\text{m}$  при фреквенцији 4,5 MHz).

Слика 4-37 приказује израчунате вредности магнетне дубине продирања добијене коришћењем једначине (7) код аморфне жице легуре састава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  у зависности од једносмерног спољашњег магнетног поља при радним фреквенцијама у опсегу  $f \in [0,4 \text{ MHz}, 1,2 \text{ MHz}]$  и при увећаним вредностима друга два експериментална параметра ( $@H_{\text{max}} = 17 \text{ kA/m}$  и  $@I_{\text{cc}} \approx 10 \text{ mA}$ ). Све три криве приказују очекивани пораст вредности магнетне дубине продирања са порастом интензитета једносмерног спољашњег магнетног поља  $H_{ex}$ , као и константно смањење вредности са порастом радних фреквенција (евидентан утицај скин-ефекта).

На фреквенцији од 0,4 MHz регистровано је константно повећање магнетне дубине продирања (са 53,5  $\mu\text{m}$  при нултим магнетним пољима до 63  $\mu\text{m}$  у магнетном засићењу МИ-ефекта при 17 kA/m). Евидентно је и очекивано смањење магнетне дубине продирања са порастом радних фреквенција. Повећање фреквенције на 1,2 MHz доводи до значајног смањења магнетне дубине продирања (на 40,5  $\mu\text{m}$  при нултом магнетном пољу до 57  $\mu\text{m}$  при 17 kA/m).





Слика 4-37. Израчунате вредности магнетне дубине продирања код жице аморфне легуре састава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  у зависности од једносмерног спољашњег магнетног поља при фреквенцијама у опсегу  $f \in [0,4 \text{ MHz}, 1,2 \text{ MHz}]$  ( $@H_{\text{max}}=17 \text{ kA/m}$ ,  $@I_{\text{cc}} \approx 10 \text{ mA}$ ) [127].

Приментно је и да је при вишим радним фреквенцијама, а при истој промени магнетног поља, укупна промена магнетне дубине продирања израженија (око  $15 \mu\text{m}$  при фреквенцији  $1,2 \text{ MHz}$  у односу на око  $10 \mu\text{m}$  при фреквенцији  $0,4 \text{ MHz}$ ). Утицај лонгитудиналног једносмерног спољашњег магнетног поља на промене магнетне дубине продирања је највећи у опсегу ниских вредности магнетних поља (највећи почетни прираштаји  $d\delta_m/dH_{\text{ex}}$  су евидентирани у области магнетних поља интензитета до око  $3 \text{ kA/m}$ ).

Поређења добијених зависности магнетне дубине продирања од спољашњег магнетног поља и фреквенције  $\delta_m(H_{\text{ex}}, f)$  код аморфних жица легура  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  показују да се код легуре на бази кобалта достижу за ред величине мање вредности магнетне дубине продирања (неколико микрона код легуре на бази гвожђа – слике 4-36 и 4-37, наспрам неколико микрона код легуре на бази кобалта – слика 4-17). При истој радној фреквенцији, магнетна дубина продирања је дефинисана количником специфичне електричне отпорности- $\rho$  и циркуларне магнетне пермеабилности- $\mu$  (из једначине (2)  $\Rightarrow \delta_m \sim (\rho/\mu)^{1/2}$ ). (Познато је да у неодгреваном стању (енгл. as-cast) и на собној температури аморфне легуре на бази гвожђа поседују нешто више вредности специфичне електричне отпорности- $\rho$  (од око  $150 \mu\Omega\text{cm}$  до  $170 \mu\Omega\text{cm}$ ) у односу на аморфне легуре на бази кобалта (од око  $120 \mu\Omega\text{cm}$  до  $130 \mu\Omega\text{cm}$ ) [131-134]). Овде изведен закључак о знатно израженијем скин-ефекту (који има за резултат ниске вредности магнетне дубине продирања) код аморфне жице легуре на бази кобалта потврђује констатацију о високим вредностима циркуларне магнетне пермеабилности доменске структуре (сличне површини бамбуса – слика 2.17), која постоји на површини феромагнетних аморфних жица са негативним коефицијентом магнетострикције  $\lambda_s \leq 0$  [59, 60, 135]). У прилог овој констатацији

говоре и добијене максималне вредности релативне магнетне пермеабилности  $\mu_w$  код аморфне жице легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  (10000@1MHz и 7400@5MHz - слика 4.19), које карактеришу механизам ротације вектора магнетизације домена по ободу цилиндричног узорка. Вредности релативне магнетне пермеабилности  $\mu_w$  (6500@5MHz @200 A/m) су у врло доброј сагласности са литературним податком (4000@5MHz @200 A/m) за  $\text{CoFeSiB}$  микрожице са стакленим омотачем (укупног пречника 44  $\mu\text{m}$  и са металним језгром 25  $\mu\text{m}$  [136]).

## 5. ЗАКЉУЧАК

У оквиру ове докторске дисертације су истраживани феномени који припадају научној области развоја савремених сензора на бази магнетоимпедансних (МИ) елемената начињених од феромагнетних аморфних металних легура. Испитивањима су обухваћене аморфне жице са магнетно меким својствима и то две легуре на бази кобалта састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ , као и легура на бази гвожђа састава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  из фамилије FINEMET. Централна истраживања у докторској дисертацији се односе на промене импедансе под утицајем спољашњег једносмерног магнетног поља  $H_{\text{ex}}$  при одређеним радним фреквенцијама  $f$  наизменичне струје која протиче кроз узорак, тј. у домену функционалне зависности импедансе  $Z(H_{\text{ex}}, f)$  испитиваних МИ-елемента.

За потребе експерименталног праћења магнетоимпедансог ефекта формирана је лабораторијска поставка за мерење импедансе узорака аморфних феромагнетних жица у систему 1Д-Хелмхолцових калемова. Том приликом је спроведено и поређење вредности јачине магнетног поља по оси Хелмхолцових калемова измерених сензором магнетног поља са вредностима одређеним теоријским прорачуном. У централној зони Хелмхолцових калемова, где су позиционирани испитивани МИ-елементи, неслагање вредности јачина магнетног поља добијених експериментом са вредностима одређеним на основу теоријских прорачуна је свега 0,3%.

Испитивањем површина аморфних жица оптичком микроскопијом уочено је постојање области повећање храпавости настале током поступка добијања жица брзим хлађењем растопа легура у ротирајућем слоју воде. Током процеса магнећења жица, ове области се јављају као центри пининга на зидовима магнетних домена што може довести и до деградације магнетно меких својстава феромагнетних легура (тј. до повећања коерцитивности и смањења магнетне пермеабилности). На површини металног језгра аморфних микрожица са стакленим омотачем нису запажене области са израженом храпавошћу, као што је то уочено код узорака жица без стаклене заштите. Стога, овако припремљени узорци феромагнетних аморфних микрожица могу достићи изузетна магнетно мека својства.

Рендгеноструктурна анализа неодгреваног узорка жице легуре састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  потврдила је потпуно аморфну структуру, коју увек прате и одлична механичка својства веома битна за успешну примену жица у сензорској техници. Код рендгенограма узорка жице ове аморфне легуре загреваног до максималне температуре од  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  регистрован је развој четири кристалне фазе:

$\epsilon$ -CoSi, B<sub>8</sub>C, Co<sub>2</sub>B и  $\alpha$ -FeCo, које при интензивнијој кристализацији могу узроковати и озбиљну деградацију механичких својстава (тј. губитак еластичности МИ-елемената).

DTA термограм легуре састава Co<sub>68.15</sub>Fe<sub>4.35</sub>Si<sub>12.5</sub>B<sub>15</sub> приказује присуство само једног егзотермног – кристализационог процеса са температуром пика од 566 °C, на основу чега се може закључити да је легура термодинамички стабилна до око 400 °C. Термички процеси који се одигравају до ове температуре могу изазвати ефикасну структурну релаксацију заосталих механичких напрезања насталих током брзог хлађења растопа легуре приликом поступка добијања аморфних жица, и то без отпочињања процеса кристализације који доводи до губитка најоптималнијих магнетно меких својстава.

Спроведена SEM/EDS анализа узорака обе испитиване аморфне легуре на бази кобалта и мапирања свих конститутивних хемијских елемената су потврдиле присуство и хомогену расподелу свих саставних елемената (Co-Fe-Si-B у првој легури и Co-Si-B у другој легури).

Приликом испитивања магнетоимпедансе аморфне жице легуре састава Co<sub>68.15</sub>Fe<sub>4.35</sub>Si<sub>12.5</sub>B<sub>15</sub> спроведен је термички третман на бази Џуловог ефекта (амплитуда ас струје одгревања 100 mA на 50 Hz током 60 s у ваздуху - узорци су потом постепено хлађени смањењем струје одгревања брзином од 5 mA/s). Константна вредност специфичне електричне отпорности од 133  $\mu\Omega$  cm пре и после овог термичког третмана је потврдила аморфно стање са оствареном структурном релаксацијом.

На основу фреквентне зависност МИ-односа ( $[|Z(0)| - |Z(H_{ex})|]/|Z(H_{ex})|$ ) одређена је критична фреквенција од око 5 kHz - 7 kHz када одпочињу промене импедансе при датој (константној) вредности спољашњег магнетног поља, тј. када магнетна дубина продирања постаје мања од полупречника жице  $\delta_m \leq a = 50 \mu m$ . МИ-однос достиже максимум од 334% на радној фреквенцији од 0.95 MHz при магнетном пољу интензитета 7,72 kA/m.

При релативно ниским радним фреквенцијама (мањим од 300 kHz), скин ефекат је слабог интензитета па је магнетна дубина продирања и даље релативно велика (проток наелектрисања је практично дуж целог попречног пресека жице,  $\delta_m \approx a$ ). Реална компонента импедансе (магнетоотпор MR) има доминантан утицај на промену модула импедансе Z, а обе зависности од спољашњег магнетног поља MR ( $H_{ex}$ ) и  $|Z(H_{ex})|$  показују монотонно смањење са тенденцијом ка вредности једносмерног електричног отпора  $|Z(H_{ex})| \approx MR(H_{max}) \approx R_{dc} \approx 3 \Omega$ . Константно смањење модула импедансе је узроковано процесом магнетнења који се одвија механизмом померања зидова магнетних домена.

У опсегу ниских радних фреквенција (испод 1 MHz) осно-лонгитудинална анизотропија магнетних домена у језгру жице је доминантан извор промена пермеабилности у односу на утицај циркуларне анизотропије по ободу аморфне жице. При даљем повећању фреквенција магнетна дубина продирања значајно опада ( $\delta_m \ll a = 50 \mu m$ ) и циркуларна пермеабилност (тј. магнетни домени распоређени дуж површине цилиндричног феромагнетног узорка) преузима доминантну улогу при магнетнењу.

У средње фреквентном опсегу (који обично почиње око 1 MHz) скин ефекат и механизам ротације вектора магнетизације су доминантни у процесу циркуларног

магнећења (кретање зидова магнетних домена је блокирано). Облик зависности МИ-односа од спољашњег једносмерног магнетног поља се значајно мења и евидентира се појава пика. Генеза пика указује на пораст доприноса механизма ротације вектора магнетизације који се појављује при радним фреквенцијама вишим од фреквенције релаксације зидова магнетних домена.

За потпуну анализу МИ-ефекта поред модула импедансе детаљно су анализирани и зависности реалног дела импедансе  $MR(H_{ex}, f)$  и имагинарног дела импедансе  $MX(H_{ex}, f)$ . За разлику од монотоног опадања магнетоотпорности при  $f \leq 3$  MHz, крива добијена на 4 MHz показује почетак развоја пика који даље еволуира на 5 MHz. Зависност магнетореактансе од спољашњег магнетног поља показује профил са појавом пика за све радне фреквенције у испитиваном мегахерцном подручју  $1 \text{ MHz} \leq f \leq 5 \text{ MHz}$ . Коначно, при  $f \geq 2$  MHz, МИ-профили модула импедансе показују јасан пик позициониран при вредности поља магнетне анизотропије  $H_k$ , указујући на доминацију механизма ротације магнетизације код циркуларне пермеабилности. Уочено повећање поља магнетне анизотропије (од око два пута при порасту радне фреквенције са 2 MHz на 5 MHz) је изузетно значајно с обзиром на очекивану примену МИ-елемента за магнетне сензоре у линеарној области пораста модула магнетоимпедансе са  $dc$  магнетним пољем (тј. при  $H_{ex} < H_k$ ).

При порасту фреквенције дубина магнетног продирања се смањује као и површина кроз коју постоји проток наелектрисања (код цилиндричних узорака површина је облика прстена). Вредности магнетне дубине продирања су рачунате коришћењем мерених података реалног дела магнетоимпедансе и  $dc$  електричне отпорности. Повећање магнетне дубине продирања је изазвано дејством спољашњег  $dc$  магнетног поља и при највећој фреквенцији од 5 MHz расте од 3,3  $\mu\text{m}$  при нултом магнетном пољу до 4,2  $\mu\text{m}$  при пољу интензитета 463 A/m. На нешто нижим радним фреквенцијама (1 MHz и 2 MHz) утицај лонгитудиналног једносмерног спољашњег магнетног поља на дубину продирања је највећи у опсегу ниских интензитета магнетних поља када су и регистровани највећи почетни прираштаји  $d\delta_m/dH_{ex}$ .

С обзиром на директну повезаност пермеабилности са магнетном дубином продирања, истраживања су обухватила и прорачуне пермеабилности уз коришћење мерених података магнетореактансе. Коришћен је модел комплексне импедансе за цилиндар представљен од истраживача Чена и Муноза при услову  $2 \cdot (a/\delta_m)^2 > 100$ , који је задовољен у фреквентном опсегу мерења спроведених приликом овде презентованих истраживања. Уз очекивано смањење релативне магнетне пермеабилности са порастом радне фреквенције, криве зависности релативне магнетне пермеабилност жице од лонгитудиналног спољашњег магнетног поља показују и фреквентно зависне максимуме (10000@1 MHz и 7400@5 MHz).

С циљем процене атрактивности примена у сензорици код жице аморфне легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  је спроведено и испитивање осетљивости МИ-елемента у опсегу високих радних фреквенција (од 2 MHz до 5 MHz, при  $H_{max} \approx 463$  A/m). Евидентирано је константно повећање осетљивости при порасту радних фреквенција. На фреквенцији од 2 MHz осетљивост је најнижа и износи око 0,07%/A/m док при највећим фреквенцијама од 4 MHz и 5 MHz достиже вредности од око 0,4 %/A/m.

Мерење модула магнетоимпедансе  $Z(H, f)$  аморфне жице легуре  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  је спроведено у фреквентном опсегу од 1 MHz до 12 MHz и при  $H_{\text{max}} \approx 15 \text{ kA/m}$ . Очекивано константно повећање модула импедансе са порастом фреквенције прати и ширење кривих функционалних зависности  $Z(H)$ . Позиционирање пикова је ка све вишим вредностима магнетног поља анизотропије  $H_k$ , што указује на доминацију механизма ротације магнетизације код циркуларне пермеабилности. Максималне вредности модула импедансе  $Z_{\text{max}}$  од скоро 100  $\Omega$  регистроване су на радној фреквенцији од 12 MHz. Утицај фреквенције на максималне вредности модула импедансе је највећи у почетном фреквентном опсегу ( $1 \text{ MHz} \leq f \leq 7 \text{ MHz}$ ). Овакво понашање је у корелацији са појавом смањења магнетне дубине продирања  $\delta_m$  при повећању фреквенције, које је најизраженије на нижим фреквенцијама. Вредност од 384% за  $(\Delta Z/Z)_{\text{max}}$  је регистрована на 1 MHz, док се са даљим порастом фреквенције бележи константно смањење као резултат опадања циркуларне пермеабилности.

Поље магнетне анизотропије у фреквентном опсегу  $f \in [1 \text{ MHz}; 7 \text{ MHz}]$ , приказује линеаран пораст веома сличан понашању  $H_k(f)$  код аморфних жица састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  при фреквенцијама  $f \in [1 \text{ MHz}; 5 \text{ MHz}]$ . Постепено почетно линеарно повећање је праћено накнадним огромним повећањем поља магнетне анизотропије, што је значајна информација с обзиром да је примена МИ-елемента за магнетне сензоре у линеарној области промена комплексног модула импедансе, тј. у области  $H < H_k$ . Максимална вредност МИ-односа од 365% (измерена при интензитету поља од 99 A/m) је потврдила закључак о могућностима ефикасне детекције магнетног поља веома ниског интензитета.

Истраживања спроведена над неодгретим узорцима аморфних жица легуре FINEMET на бази гвожђа састава  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  су започела одређивањем критичне фреквенције чија је вредност око 30 kHz (кад је  $\delta_m \approx a = 75 \mu\text{m}$ ). МИ-однос најпре расте са фреквенцијом и достиже максимум који је зависан од примењеног спољашњег магнетног поља (1 MHz при 3,86 kA/m и 1,25 MHz при 7,72 kA/m). Максимална вредност МИ-односа од око 15% забележена је управо на радној фреквенцији од 1,25 MHz. Приметна је и зависност максимума МИ-односа и од амплитуде наизменичне струје која протиче кроз узорак, тј. од вредности амплитуде циркуларног ас магнетног поља  $h_{ac}$  (при највећој струји од 10 mA је  $h_{ac} \approx 21 \text{ A/m}$ ).

Највећа разлика модула магнетоимпеданси од око 0,75  $\Omega$  је регистрована при радној фреквенцији од 1,5 MHz. Приметна је и промена облика кривих МИ-односа, које из карактеристичног монотоног опадања (при ниским фреквенцијама  $f < 1 \text{ MHz}$ ) постепено еволуирају у криве са слабо израженим максимумима (при фреквенцијама изнад 1,5 MHz). МИ-профили поседују благи пик позициониран при пољу магнетне анизотропије  $H_k$ , чије двостуко повећање је евидентирано при порасту фреквенције са 2 MHz на 4,5 MHz.

Криве зависности магнетне дубине продирања од спољашњег магнетног поља приказују очекивани раст (нпр. на 0,7 MHz је регистровано константно повећање са 42  $\mu\text{m}$  при нултом магнетном пољу до 57  $\mu\text{m}$  при 7,5 kA/m). Такође, евидентно је и смањење магнетне дубине продирања са порастом радне фреквенције (нпр. при 4,5 MHz добијене су вредности од 22  $\mu\text{m}$  при нултом магнетном пољу и 32  $\mu\text{m}$  при 7,5 kA/m). Повећање амплитуде циркуларног ас магнетног поља  $h_{ac}$  резултује и

нешто већим вредностима магнетне дубине продирања, нпр. 51  $\mu\text{m}$  при нултом магнетном пољу и 59  $\mu\text{m}$  при 7,5 kA/m.

Поређења зависности магнетне дубине продирања од фреквенције и магнетног поља код аморфних жица легура  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Fe}_{73.5}\text{Nb}_3\text{Cu}_1\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  су показала да се код легуре на бази кобалта достижу за ред величине ниже вредности магнетне дубине продирања и за ред величине више вредности МИ-односа (неколико стотина процената код легуре на бази кобалта наспрам неколико десетина процената код легуре на бази гвожђа).

Након спроведених детаљних анализа резултата истраживања сва три типа феромагнетних аморфних жица може се генерализовати закључак да су оптималне радне фреквенције МИ-елемената дефинисане потребом избегавања доминантног утицаја лонгитудиналне анизотропије, тј. динамике магнећења магнетних домена у унутрашњости аморфних жица која значајно смањује осетљивост микромагнетног сензора. Дакле, потребно је остварити доминантан утицај циркуларне магнетне анизотропије, тј. механизам ротације вектора магнетизације у доменима распоређеним по ободу цилиндра (жице). Тада су вредности магнетне дубине продирања око једне десетине полупречника жице и изражен је утицај спољашњег магнетног поља на повећање дубине продирања (тј. на смањење магнетоимпедансе). Највеће вредности осетљивости МИ-елемента су евидентирани код аморфних жица легуре  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  при радним фреквенцијама 4-5 MHz, а достигнуте вредности су око 0,4% / A/m. Дакле, суштинске интеракције се одигравају при површини феромагнетних жица, када се и достижу највеће вредности осетљивости микромагнетних МИ-сензора неопходних за постизање високих нивоа минијатуризације компоненти у савременој сензорској техници.

Промене магнетне пермабилности  $\mu$  су под утицајем и спољашњег лонгитудиналног  $dc$  магнетног поља  $H_{ex}$  и циркуларног  $ac$  магнетног поља  $h_{ac}$ , тако да је импеданса феромагнетних аморфних жица функција три експериментална параметра  $\underline{Z} = \underline{Z}(H_{ex}, f, I_{cc})$ . У дисертацији су презентовани утицаји прва два параметра, тако да један од праваца нових истраживања може бити и детаљније испитивање утицаја циркуларног  $ac$  магнетног поља  $h_{ac}$  (тј. амплитуде наизменичне струје  $I_{cc}$  која протиче кроз узорак жице) на својства магнетоимпедансног елемента. И проширење опсега радних фреквенција може донети интересантне резултате истраживања, за шта је потребан предуслов инжењеринг адекватних и поузданих контаката за експерименте који би се спроводили до фреквенција од око неколико стотина мегахерца. Свакако је да зависност магнетног поља анизотропије  $H_k$  од три експериментална МИ-параметра  $(H_{ex}, f, I_{cc})$  може бити детаљније анализирана јер представља тему која је релативно мало изучавана чак и од стране водећих истраживачких група и то нешто интензивније у последњих десетак година.

Планирани наставак истраживања магнетоимпедансног ефекта код феромагнетних аморфних металних легура би био усмерен и ка микрожицама легура састава  $\text{Co}_{68.15}\text{Fe}_{4.35}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  са стакленим омотачем и поређење нових резултата истраживања са резултатима представљеним у овој докторској дисертацији. Конфигурација две цилиндричне форме композита (метална аморфна легура - борсиликатно стакло) поседује специфичну расподелу магнетне анизотропије у односу на аморфне металне жице без стакленог омотача, што

узрокује измењену структуру магнетних домена на површини микрожица, а самим тим и измењена МИ-својства на овакав начин конципираних магнетоимпедансних елемената, чиме се омогућава још један ред величине у минијатуризацији савремене магнетне сензорске технике.



## ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. F. Kiss, V. Franco, M. Csontos, L. Peter, C. F. Conde, A. Conde, T. Kemeny, L. K. Varga and I. Bakonyi, "Analysis of the magnetoresistance contributions in a nanocrystallized Cr-doped FINEMET alloy", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 323, pp. 699-707, 2011.
- [2] N. Mitrović, "Magnetoresistance of the Fe<sub>72</sub>Cu<sub>1</sub>V<sub>3</sub>Si<sub>16</sub>B<sub>8</sub> amorphous alloys annealed by direct current Joule heating", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 262, pp. 302-307, 2003.
- [3] P. Gazda and R. Szewczyk, "Influence of Joule-annealing on double-peak GMI effect in Co-based amorphous ribbons", *Acta Physica Polonica, A*, vol. 137, pp. 818-820, 2020.
- [4] D. Garcia, V. Raposo, O. Montero and J. I. Iniguez, "Influence of magnetostriction constant on magnetoimpedance–frequency dependence", *Sensors and Actuators A*, vol. 129, pp. 227-230, 2006.
- [5] H. Yoshinobu, "Development of amorphous wire type MI sensors for automobile use", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 249, pp. 375-381, 2002.
- [6] H. Yoshinobu, M. Yamamoto, N. Hamada and A. Shimode, "Magneto-sensitive wire, magneto-impedance element and magneto-impedance sensor", US8610427 B2, PATENT, 2013.
- [7] M. H. Phan and H. X. Peng, "Giant magnetoimpedance materials: fundamentals and applications", *Progress in Materials Science*, vol. 53, pp. 323-420, 2008.
- [8] T. Masumoto, I. Ohnaka, A. Inoue and M. Hagiwara, "Production of Pd-Cu-Si amorphous wires by melt spinning method using rotating water", *Scripta Metallurgica*, vol. 15, pp. 293-296, 1981.
- [9] J. D. Bernal, "A geometrical approach to the structure of liquids", *Nature*, vol. 183, pp. 141-147, 1959.
- [10] J. L. Finney, "Random packings and the structure of simple liquids", *Proceedings of the Royal Society London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 319, pp. 479-493, 1970.
- [11] X. Yue, A. Inoue, C-T. Liu and C. Fan, "The development of the structure model in metallic glasses", *Materials Research*, vol. 20, pp. 326-338, 2017.

- [12] A. L. Greer, „Metallic glasses... on the threshold“, *Materials Today*, vol. 12, pp. 14- 22, 2009.
- [13] F. Faupel, W. Frank, M-P. Macht, H. Mehrer, V. Naundorf, K. Ratzke, H. R. Schober, S. K. Sarma and H. Teichler, “Diffusion in metallic glasses and supercooled melts”, *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, pp. 237-280, 2003.
- [14] E. D. Zotto, “Do cathedral glasses flow?”, *American Journal of Physics*, vol. 66, pp. 392-395, 1998.
- [15] V. I. Motorin, „Vitrification Kinetics of Pure Metals“, *Physica Status Solidi A*, vol. 80, pp. 447–455, 1983.
- [16] M. Kamal and U. S. Mohammad, „Chill-block melt spin technique“ in *A Review: Chill-block Melt Spin Technique, Theories & Applications*, Bentham Science Publishers, e Books, pp. 42-69, 2012.
- [17] F. R. Boer and D. G. Pettifor, *Cohesion in Metals*, Elsevier Science Publishers B. V., 1988.
- [18] A. Inoue, "Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys", *Acta Materialia*, vol. 48, pp. 279-306, 2000.
- [19] A. Takeuchi and A. Inoue, "Calculations of mixing enthalpy and mismatch entropy for ternary amorphous alloys", *Materials Transaction JIM*, vol. 41, pp. 1372-1378, 2000.
- [20] A. Takeuchi and A. Inoue, „Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element“, *Materials Transactions JIM*, vol. 46, pp. 2817-2829, 2005.
- [21] C. A. Angell, „Formation of glasses from liquids and biopolymers“, *Science*, vol. 267, pp. 1924-1935, 1995.
- [22] S. A. Kube, S. Sohn, R. Ojeda-Mota, T. Evers, W. Polsky, N. Liu, J. Schroers, K. Ryan, S. Rinehart and Y. Sun, „Compositional dependence of the fragility in metallic glass forming liquids“, *Nature Communications*, vol. 13, 3708, 2022.
- [23] N. Mitrović, S. Roth and M. Stoica, „Magnetic softening of bulk amorphous FeCrMoGaPCB rods by current annealing technique“, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 434–435, pp. 618-622, 2007.
- [24] S. Corodeanu, C. Hlenschi, H. Chiriac, T-A. Óvári and N. Lupu, “Comparative study of the magnetic behavior of FINEMET thin magnetic wires: glass-coated, glass-removed, and cold-drawn“, *Materials*, vol. 16, Article ID 1340, 2023.
- [25] M. L. Sánchez, V. M. Prida, J. D. Santos, J. Olivera, T. Sánchez, J. García, M. J. Pérez and B. Hernando, „Magnetoimpedance in soft magnetic amorphous and nanostructured wires“, *Applied Physics A*, vol. 104, pp. 433–445, 2011.
- [26] O. Thiabgoh, „*Novel Magneto-LC Resonance Sensors for Industrial and Bioengineering Applications*“, Doctoral Dissertation, University of South Florida - USA, 2018.

[27] H. Chiriac, M. Lostun and T-A. Ovari, „Magnetization process and domain structure in the near-surface region of conventional amorphous wires“, Journal of Applied Physics, vol. 109, 07B504, 2011.

[28] K. Mohri and Y. Honkura, “Amorphous wire and CMOS IC based magneto-impedance sensors—origin, topics, and future”, Sensor Letters, vol. 5, pp. 267-270, 2007.

[29] L. V. Panina, “Magnetoimpedance (MI) in amorphous wires; new materials and applications”, Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science, vol. 206, pp. 656-662, 2009.

[30] T. Uchiyama, K. Mohri, Y. Honkura and L. V. Panina, “Recent advances of pico-Tesla resolution magneto-impedance sensor based on amorphous wire CMOS IC MI sensor”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, pp. 3833-3839, 2012.

[31] J. Salach, L. Hasse, R. Szewczyk, J. Smulko, A. Bienkowski, P. Frydrych and A. Kolano-Burian, “Low current transformer utilizing Co-based amorphous alloys”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, pp. 1493-1496, 2012.

[32] B. Dufay, S. Saez, C. P. Dolabdjian, A. Yelon and D. Menard, “Characterization of an optimized off-diagonal GMI-based magnetometer”, IEEE Sensors Journal, vol. 13, pp. 379-388, 2013.

[33] L. Gonzalez-Legarreta, P. Corte-Leon, V. Zhukova, M. Ipatov, J. M. Blanco, J. Gonzalez and A. Zhukov, “Optimization of magnetic properties and GMI effect of thin Co-rich microwires for GMI microsensors”, Sensors, vol. 20, Article ID 1558, 2020.

[34] M. Vazquez, J. M. Garcia-Beneytez, J. M. Garcia, J. P. Sinnecker and A. P. Zhukov, „Giant magneto-impedance in heterogeneous microwires“, Journal of Applied Physics, vol. 88, pp. 6501–6505, 2000.

[35] M. H. Phan, S. C. Yu, C. G. Kim and M. Vazquez, “Origin of asymmetrical magnetoimpedance in a Co-based amorphous microwire due to dc bias current”, Applied Physics Letters, vol.83, pp. 2871–2873, 2003.

[36] C. Moron and A. Garcia, “Giant magneto-impedance in nanocrystalline glass-covered microwires”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials vol. 290–291, pp.1085–1088, 2005.

[37] M. H. Phan, H. X. Peng, S. C. Yu and M. Vazquez, “Optimized giant magnetoimpedance effect in amorphous and nanocrystalline materials”, Journal of Applied Physics, vol.99, 08C505, 2006.

[38] H. B. Lee, K. J. Kim, T. K. Kim, C. O. Kim and S. C. Yu, „Magneto impedance effect in the nanocrystalline Fe–Zr–Cu–B–Al alloy system“, Journal of Applied Physics, vol. 87, pp. 5269–5291, 2000.

[39] M. H. Phan, H. X. Peng, M. R. Wisnom and N. H. Nghi, “Large enhancement of GMI effect in polymer composites containing Co-based ferromagnetic microwires”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 316. e253-e256, 2007.

[40] L. V. Panina and K. Mohri, “Magneto-impedance effect in amorphous wires”, Applied Physics Letters, vol. 65, pp. 1189–1191, 1994.

[41] R. S. Beach and A. E. Berkowitz, "Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire", *Applied Physics Letters*, vol. 64, pp. 3652-3654, 1994.

[42] J. Devkota, A. Ruiz, P. Mukherjee, H. Srikanth, M. H. Phan, A. Zhukov and V. S. Larin, "Magneto-resistance, magneto-reactance, and magneto-impedance effects in single and multi-wire systems", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 549, pp. 295-302, 2013.

[43] J. Liu, H. Shen, D. Xing and J. Sun, "Optimization of GMI properties by AC Joule annealing in melt extracted Co-rich amorphous wires for sensor applications", *Phys. Status Solidi A*, vol. 211, pp. 1577-1582, 2014.

[44] A. Dzhumazoda, L. V. Panina, M. G. Nematov, A. A. Ukhasov, N. A. Yudanov, A. T. Morchenko and F. X. Qin, "Temperature-stable magnetoimpedance (MI) of current-annealed Co-based amorphous microwires", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 474, pp. 374-380, 2019.

[45] L. Kraus, "Theory of giant magneto-impedance in the planar conductor with uniaxial magnetic anisotropy", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 195, pp. 764-778, 1999.

[46] M. A. Willard and M. Daniil, "Nanocrystalline soft magnetic alloys two decades of progress", in *Handbook of Magnetic Materials*, vol. 21, Elsevier, 2013, pp. 173-342.

[47] N. A. Buznikov and A. S. Antonov, "A model for asymmetric magnetoimpedance effect in multilayered bimagnetic films", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 420, pp. 51-55, 2016.

[48] V. Zhukova, J. M. Blanco, M. Ipatov and A. Zhukov, "Effect of transverse magnetic field on domain wall propagation in magnetically bistable glass-coated amorphous microwires", *Journal of Applied Physics*, vol. 106, p. 113914, 2009.

[49] J. Sun, J. Liu, D. Xing and X. Xue, "Experimental study on the effect of alternating-current amplitude on GMI output stability of Co-based amorphous wires", *Physica Status Solidi*, vol. 208, pp. 910-914, 2011.

[50] N. Mitrović, S. Djukić and S. Djurić, "Crystallization of the Fe-Cu-M-Si-B (M = Nb, V) amorphous alloys by direct-current Joule heating", *IEEE Transaction on Magnetics*, MAG vol. 36, pp. 3858-3862, 2000.

[51] H. X. Peng, F. Qin and M. H. Phan, "Influence of measurement parameters on giant magnetoimpedance", in *Ferromagnetic Microwire Composites from Sensor to Microwave Application*, 1<sup>st</sup> ed., Switzerland: Springer, 2016, pp. 57-64.

[52] A. Mendoza, H. Montiel, G. Alvarez and B. Valera, "Micromagnetic field sensor of soft magnetic alloys based on the magnetoimpedance effect", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Congress on Instrumentation and Applied Sciences*, Puebla, Mexico, pp. 1-8, October 2011.

[53] M. Knobel, M. L. Sanchez, C. Gomez-Polo, P. Marin, M. Vazquez and A. Hernando, "Giant magnetoimpedance effect in nanostructured magnetic wires", *Journal of Applied Physics*, vol. 79, pp. 1646-1654, 1996.

[54] Б. Поповић, *Електромагнетика*, Грађевинска књига, Београд 1980, стр. 265.

[55] N. S. Mitrović, S. N. Kane, P. V. Tyagi and S. Roth, "Effect of dc-Joule-heating thermal processing on magnetoimpedance of  $\text{Fe}_{72}\text{Al}_5\text{Ga}_2\text{P}_{11}\text{C}_6\text{B}_4$  amorphous alloy", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, pp. e792-e796, 2008.

[56] M. Knobel, M. Vázquez and L. Kraus, "Giant magnetoimpedance", in *Handbook of Magnetic Materials*, vol. 15, 1<sup>st</sup> ed. K. H. J. Buschow, Ed., Amsterdam, The Netherlands, Elsevier, 2003, pp. 497-563.

[57] A. Zhukov, A. Talaat, M. Ipatov, A. Granovsky and V. Zhukova, "Estimation of the frequency and magnetic field dependence of the skin depth in Co-rich magnetic microwires from GMI experiments", *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, vol. 1, pp. 388-392, 2016.

[58] D. X. Chen and J. L. Munoz, "AC impedance and circular permeability of slab and cylinder", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. MAG-35, pp. 1906-1923, 1999.

[59] J. Liu, F. Qin, D. Chen, H. Shen, H. Wang, D. Xing, M. H. Phan and J. Sun, "Combined current-modulation annealing induced enhancement of giant magnetoimpedance effect of Co-rich amorphous microwires", *Journal of Applied Physics*, vol. 115. pp. 17A326, 2014.

[60] S. Jiang, H. Wang, D. Estevez, Y. Huang, L. Zhang, H. Shen, Z. Ning, F. Qin and J. Sun, "Surface microstructural design to improve mechanical and giant magnetoimpedance properties of melt-extracted CoFe-based amorphous wires", *Materials & Design*, vol. 204, 109642, 2021.

[61] K. Mohri, "Application of amorphous magnetic wires to computer peripherals," *Materials Science and Engineering A*, vol. 185, pp. 141-145, 1994.

[62] N. Mitrović, S. Roth, J. Eckert and C. Mickel, "Microstructure evolution and soft magnetic properties of  $\text{Fe}_{72-x}\text{Nb}_x\text{Al}_5\text{Ga}_2\text{P}_{11}\text{C}_6\text{B}_4$  ( $x = 0, 2$ ) metallic glasses," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 35, pp. 2247-2253, 2002.

[63] B. Hernando, J. Olivera, J. D. Santos, M. L. Sanchez, P. Gorria, C. Garcia, J. M. Blanco, A. Zhukov and J. L. Sanchez Li, "High-frequency magnetoimpedance in amorphous and nanostructured  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$  wires," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 300, pp. 24-28, 2006.

[64] R. Surla, M. M. Vasić, N. Mitrović, Lj. Radović and D. M. Minić, "Magnetic properties of  $\text{Fe}_{72}\text{V}_4\text{Cu}_1\text{Si}_{15}\text{B}_8$  alloy with a composite amorphous/nanocrystalline structure," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 564, 170141, 2022.

[65] P. Gazda and R. Szewczyk, "Novel giant magnetoimpedance magnetic field sensor," *Sensors*, vol. 20, Article ID 691, 2020.

[66] A. García-Arribas, E. Fernández, A. Svalov, G. V. Kurlyandskaya and J. M. Barandiaran, "Thin-film magneto-impedance structures with very large sensitivity," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 400, pp. 321-326, 2016.

[67] P. T. Squire, D. Atkinson, MR. J. Gibbs and S. J. Atalay, "Amorphous wires and their applications", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 132, pp. 10-21, 1994.

[68] T-A. Óvári, N. Lupu and H. Chiriac, "Rapidly solidified magnetic nanowires and submicron wires", in *Advanced Magnetic Materials*, Ed. L. Malkinski, pp. 1-32, InTech, 2012.

- [69] <https://www.phys-iasi.ro/en/equipment-conventional-wires-preparation> приступ 26. 02. 2024. год
- [70] H. X. Peng, F. Qin and M. H. Phan, "Fabrication of ferromagnetic wires", in *Ferromagnetic Microwire Composites from Sensor to Microwave Application*, 1<sup>st</sup> ed., Switzerland: Springer, pp. 9-20, 2016.
- [71] H. Wang, F. X. Qin, H. X. Peng and J. F. Su, „Melt extracted microwires“, in *High Performance Soft Magnetic Materials*, pp. 53-90, ed. A. Zhukov, Springer Series in Materials Science, Springer Cham, 2017.
- [72] W. L. Bragg, "The diffraction of short electromagnetic waves by a crystal", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 17, pp. 43–57, 1912.
- [73] B. D. Cullity, *Elements of X-Ray Diffraction*, Addison-Wesley, Menlo Park, 1978.
- [74] TA Instruments SDT 2960 Simultaneous DTA-TGA Manuals, Datasheets, [SDT 2960 TA Instruments \(Simultaneous DTA-TGA\) | ArtisanTG™](#) , приступ 07. 02. 2024. године.
- [75] J. Goldstein, D. Newbury, D. Joy, C. Lyman and P. Echlin, *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, 3<sup>rd</sup> ed., Springer, New York, 2007.
- [76] Б. Поповић, *Електромагнетика*, Грађевинска књига, Београд 1980, стр. 209-210
- [77] <https://store.data-harvest.co.uk/easysense#res> приступ 07. 02. 2024. године.
- [78] В. Петровић, Д. Тошић, А. Ђорђевић, *Микроталасна пасивна кола*, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, 2010.
- [79] Impedance Measurements Evaluating EMC Components with DC Bias Superimposed, Agilent Technologies, Inc., 5989-9887EN, USA, 2009.
- [80] K. H. J. Buschow and F. R. de Boer, *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*, Kluwer Academic/Plenum Publishers New York, 2003.; S. Chikazumi, *Physics of Ferromagnetism*, New York : Wiley, 1964.
- [81] L. González-Legarreta, V. M. Prida, B. Hernando, A. Talaat, M. Ipatov, V. Zhukova, J. González and A. Zhukov, „Tailoring of soft magnetic properties and high frequency giant magnetoimpedance in amorphous ribbons“, in *High Performance Soft Magnetic Materials*, pp. 33-52, ed. A. Zhukov, Springer Series in Materials Science, Springer Cham, 2017.
- [82] A. Chaturvedi, T. Dhakal, A-T. Le, M.H. Phan and H. Srikanth, "Correlation between magnetic softness, sample surface and magneto-impedance in Co<sub>69</sub>Fe<sub>4.5</sub>X<sub>1.5</sub>Si<sub>10</sub>B<sub>15</sub> (X = Ni, Al, Cr) amorphous ribbons". *Physica B* vol. 405, pp. 2836–2839, 2010.
- [83] B. Nedeljković, J. Orelj, V. Pavlović and N. Mitrović, "Morphological and structural characterization of Co-rich ferromagnetic amorphous wires and glass-covered microwires", Conference »Advanced Ceramics and Application«, New Frontiers in Multifunctional Material Science and Processing, ACA XI, September 18-20, 2023, Belgrade, Book of Abstracts pp. 88.

[84] R. Singh, J. Alonso, J. Devkota and M-H. Phan, „Soft ferromagnetic microwires with excellent inductive heating properties for clinical hyperthermia applications“, in *High Performance Soft Magnetic Materials*, pp. 151-168, ed. A. Zhukov, Springer Series in Materials Science, Springer Cham, 2017.

[85] K. Mohri, M. Yamamoto and T. Uchiyama, “Application topics of amorphous wire CMOS IC magneto-impedance micromagnetic sensors for IoT smart society”, *Journal of Sensors*, vol. 2019, p. 8285240, 2019.

[86] J. Liu, Z. Du, S. Jiang, H. Shen, Z. Li, D. Xing, W. Ma and J. Sun, “Tailoring giant magnetoimpedance effect of Co-based microwires for optimum efficiency by self-designed square-wave pulse current annealing”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 385, pp. 145-150, 2015.

[87] P. Corte-León, V. Zhukova, M. Ipatov, J. M. Blanco, J. Gonzalez and A. Zhukov, “Engineering of magnetic properties of Co-rich microwires by Joule heating”, *Intermetallics*, vol. 105. pp. 92-98, 2019.

[88] O. Thiabgoh, T. Eggers, C. Albrecht, V. O. Jimenez, H. Shen, S. D. Jiang, J. F. Sun, D. S. Lam, V. D. Lam and M. H. Phan, “Optimization of the high-frequency magnetoimpedance response in melt-extracted Co-rich microwires through novel multiple-step Joule heating”, *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, vol. 6, pp. 364-371, 2021.

[89] K. D. Sossmeier, F. Bohn, H. Chiriac and M. Carara, “Comparison between ac and dc current annealing in CoFeSiB glass-covered amorphous microwires”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, pp. 3233-3238, 2007.

[90] J. Orelj, N. Mitrović and V. Pavlović, “Frequency behaviour of Co-based amorphous wire MI-element”, YUCOMAT 2021 Conference Materials Research Society of Serbia Herceg Novi, August 30 - September 3, 2021, Book of Abstracts, pp. 98.

[91] J. M. Orelj, N. S. Mitrović and V. B. Pavlović, “MI-sensor element features and estimation of penetration depth and magnetic permeability by magneto-resistance and magnetoreactance of CoFeSiB amorphous wires”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, pp. 14017-14024, 2023.

[92] B. Hernando, V. Prida, M. L. Sánchez, P. Gorria, G. V. Kurlyandskaya, M. Tejedor, and M. Vázquez, “Magnetoimpedance effect in Co-rich metallic glasses”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 258-259, pp. 183-188, 2003.

[93] N. A. Usov, A. S. Antonov, A. N. Lagarkov and A. B. Granovsky, “GMI spectra of amorphous wires with different types of magnetic anisotropy in the core and the shell regions”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 203, pp. 108-110, 1999.

[94] V. Zhukova, A. Zhukov, K. L. Garcia, V. Kraposhin, A. Prokoshin, J. Gonzalez and M. Vázquez, “Magnetic properties and GMI of soft melt-extracted magnetic amorphous fibers”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 106, pp. 225-229, 2003.

[95] L. V. Panina, K. Mohri, T. Uchiyama, M. Noda and K. Bushida, “Giant magneto-impedance in Co-rich amorphous wires and films”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. MAG-31, pp. 1249-1260, 1995.

[96] I. Betancourt, R. Valenzuela and M. Vazquez, "Domain model for the magnetoimpedance of metallic ferromagnetic wires", *Journal of Applied Physics*, vol. 93, pp. 8110-8112, 2003.

[97] L. Kraus, "GMI modeling and material optimization", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 106, pp. 187-194, 2003.

[98] D. Menard, M. Britel, P. Ciureanu and A. Yelon, "Giant magnetoimpedance in a cylindrical magnetic conductor", *Journal of Applied Physics*, vol. 84, pp. 2805-2814, 1988.

[99] T. K. Das, A. Mitra, S. K. Mandal, R. K. Roy, P. Banerji and A. K. Panda, "Parametric controls on giant magnetoimpedance (GMI) behaviour of CoFeSiBCr amorphous wires for prospective sensor applications", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 220, pp. 382-387, 2014.

[100] S. Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*, 1<sup>st</sup> ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011, pp. 207-213.

[101] S. Sun, S. Zhang, B. Zhang and W. Ding, "Magnetization and giant magnetoimpedance effect of Co-rich microwires under different driven currents", *Journal of Sensors*, vol. 2016, p. 6465235, 2016.

[102] J. Nabias, A. Asfour and J. P. Yonnet, "Temperature dependence of giant magnetoimpedance in amorphous microwires for sensor application", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, p. 4001005, 2017.

[103] H. K. Lachowicz, K. L. Garcia, M. Kuzminski, A. Zhukov and M. Vazquez, "Skin-effect and circumferential permeability in micro-wires utilized in GMI-sensors", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 119, pp. 384-389, 2005.

[104] R. Varga, A. Zhukov, J. M. Blanco, M. Ipatov, V. Zhukova, J. Gonzalez and P. Vojtaník, "Fast magnetic domain wall in magnetic microwires", *Physical Review B*, vol. 74, p. 212405, 2006.

[105] K. Mohri, F. B. Humphrey, L. V. Panina, Y. Honkura, J. Yamasaki, T. Uchiyama, and M. Hirami, "Advances of amorphous wire magnetism over 27 years," *Physica Status Solidi A*, vol. 206, pp. 601-607, 2009.

[106] P. Corte-León, J. M. Blanco, V. Zhukova, M. Ipatov, J. Gonzalez, M. Churyukanova, S. Taskaev and A. Zhukov, "Engineering of magnetic softness and domain wall dynamics of Fe-rich amorphous microwires by stress-induced magnetic anisotropy", *Scientific Reports*, vol. 9, Article ID 12427, 2019.

[107] V. Zhukova, P. Corte-Leon, L. González-Legarreta, A. Talaat, J. M. Blanco, M. Ipatov, J. Olivera and A. Zhukov, "Review of domain wall dynamics engineering in magnetic microwires", *Nanomaterials*, vol.10, Article ID 2407, 2020.

[108] <https://www.aichi-steel.co.jp/smart/mi/assets/images/products/type-dj/MI-CB-1DJ.pdf> прикуп 3. 03. 2024. године

[109] P. Gawronski, V. Zhukova, A. Zhukov and J. Gonzalez, "Manipulation of domain propagation dynamics with the magnetostatic interaction in a pair of Fe-rich amorphous microwires", *Journal of Applied Physics*, vol. 114, p. 043903, 2013.



[110] S. Corodeanu, H. Chiriac and T. A. Óvári, „Accurate measurement of domain wall velocity in amorphous microwires, submicron wires and nanowires“, Review of Scientific Instruments, vol. 82, p. 094701, 2011.

[111] A. Zhukov, J. M. Blanco, A. Chizhik, M. Ipatov, V. Rodionova and V. Zhukova, „Manipulation of domain wall dynamics in amorphous microwires through domain wall collision“, Journal of Applied Physics, vol. 114, p. 043910, 2013.

[112] P. Corte-Leóna, V. Zhukova, J. M. Blanco, A. Chizhik, M. Ipatov, J. Gonzalez, A. Fert, A. Alonso and A. Zhukova, „Engineering of domain wall propagation in magnetic microwires with graded magnetic anisotropy“, Applied Materials Today, vol. 26, p. 101263, 2022.

[113] M. Vázquez, „Giant magneto-impedance in soft magnetic wires“, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 226-230, pp. 693-699, 2001.

[114] M. H. Phan, H. X. Peng, S. C. Yu and M. Vázquez, “Optimized giant magnetoimpedance effect in amorphous and nanocrystalline materials”, Journal of Applied Physics, vol. 99, pp. 08C505: 1-4, 2006.

[115] T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonomura, M. Takeuchi, J. Sakata and Y. Taga, “Enhancement of giant magneto-impedance in layered film by insulator separation”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, pp. 4965-496, 1996.

[116] J. Орель, Н. Митровић, ”Осетљивост магнетоимпедансног елемента CoFeSiB аморфне жице”, LXVI Конференција ЕТРАН, Нови Пазар, 6 - 9. јуна 2022, Зборник радова, рад НМ.1.4, стр. 1-5.

[117] T. Uchiyama, K. Mohri, L.V. Panina and K. Furuno, “Magneto-impedance in sputtered amorphous films for micro magnetic sensor”, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31, pp. 3182-3184, 1995.

[118] K. Mohri, T. Uchiyama, L. V. Panina, M. Yamamoto and K. Bushida, “Recent advances of amorphous wire CMOS IC magneto-impedance sensors: innovative high-performance micromagnetic sensor chip”, Journal of Sensors, vol. 2015, Article ID 718069, 2015.

[119] K. Mohri, Y. Honkura, L. V. Panina and T. Uchiyama, “Super MI sensor: recent advances of amorphous wire and CMOS IC magneto-impedance sensor“, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, vol. 12, pp. 7491–7495, 2012.

[120] Радослав Сурла, *Утицај одгревања на структурне трансформације и магнетна својства легуре  $Fe_{72}Cu_1V_4Si_{15}B_8$* , докторска дисертација, Факултет техничких наука у Чачку, Универзитета у Крагујевцу, 2021.

[121] O. Thiabgoh, T. Eggers, V. O. Jimenez, S. D. Jiang, J. F. Sun and M. H. Phan, “Real-time monitoring of position and motion of a non-stationary object with a highly sensitive magnetic impedance sensor“, Journal of Science: Advanced Materials and Devices, vol. 3, pp. 122–128, 2018.

[122] J. Liu, F. Qin, D. Chen, H. Shen, H. Wang, D. Xing, M. H. Phan and J. Sun, “Combined current-modulation annealing induced enhancement of giant magnetoimpedance effect of Co-rich amorphous microwires,” Journal of Applied Physics, vol. 115, Article ID 17A326, 2014.

[123] S. S. Yoon, S. C. Yu, G. H. Ryu and C. G. Kim, "Effect of annealing on anisotropy field in Fe<sub>84</sub>Zr<sub>7</sub>B<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub> amorphous ribbons evaluated by giant magnetoimpedance", *Journal of Applied Physics*, vol. 85, pp. 5432-5434, 1999.

[124] K. Csach, J. Miškuf, A. Juríková and V. Ocelík, "Creep of FINEMET ribbons during crystallization", *Czechoslovak Journal of Physics*, vol. 54, pp. 97-100, 2004.

[125] A. Lovas, L. Huba and L. Novák, "Pulse heat treatment of FINEMET alloys under tension", *Acta Physica Polonica A*, vol. 126, pp. 100-101, 2014.

[126] J. Orej and N. Mitrović, "High frequency magnetoimpedance characterization of Fe-based amorphous wires", Conference »Advanced Ceramics and Application«, *New Frontiers in Multifunctional Material Science and Processing*, Belgrade, ACA VIII, September 23-25, 2019, Book of Abstracts, pp. 70.

[127] N. Mitrović, J. Orej and A. Milovanović, "Magnetoimpedance effect in FINEMET microwires for sensors applications", Conference »Advanced Ceramics and Application«, *New Frontiers in Multifunctional Material Science and Processing*, ACA V, September 21-23, 2016, Belgrade, Book of Abstracts, pp. 69-70.

[128] O. Thiabgoh, H. Shen, T. Eggers, A. Galati, S. Jiang, J. S. Liu, Z. Li, J. F. Sun, H. Srikanth and M. H. Phan, "Enhanced high-frequency magneto-impedance response of melt-extracted Co<sub>69.25</sub>Fe<sub>4.25</sub>Si<sub>13</sub>B<sub>13.5</sub> microwires subject to Joule annealing", *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, vol. 1, pp. 69-74, 2016.

[129] V. Zhukova, P. Corte-León, A. Talaat, M. Ipatov, A. Garcia-Gomez, A. Gonzalez, J. M. Blanco and A. Zhukov, "Optimization of giant magnetoimpedance effect of amorphous microwires by postprocessing", *Processes*, vol. 12, Article ID 556, 2024.

[130] P. Corte-León, J. M. Blanco, V. Zhukova, M. Ipatov, J. Gonzalez, M. Churyukanova, S. Taskaev and A. Zhukov, "High frequency giant magnetoimpedance effect of a stress-annealed Fe-rich glass-coated microwire", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 802, pp. 112-117, 2019.

[131] J. M. Barandiarán, L. Fernández Barquín, J. C. Gómez Sal, P. Gorriá and A. Hernando, "Resistivity changes of some amorphous alloys undergoing nanocrystallization", *Solid State Communications*, vol. 88, pp. 75-80, 1993.

[132] M. Cuneyt Hacıismailoglu, K. Sarlar, A. Tekgul and I. Kucuk, "Thermally evaporated FeMGaMnSi (M = Co, Ni) high entropy alloy thin films: magnetic and magnetoresistance properties", *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 539, p. 120063, 2020.

[133] G. Herzer "Nanocrystalline soft magnetic alloys", in *Handbook of Magnetic Materials*, vol. 10, 1<sup>st</sup> ed. K. H. J. Buschow, Ed., Amsterdam, The Netherlands, Elsevier, 1997, pp. 415-462.

[134] M. Zhu, C. Zhang, T. Xu, L. Yao, Y. Liu, M. Cai and Z. Jian, "Glass formation, magnetic properties, and electrical resistivity of the multi-component FeNbBCuNiCo amorphous alloys", *International Journal of Materials Research*, vol. 112, pp. 137-142, 2021.

[135] C. Hlenschi, S. Corodeanu, N. Lupu and H. Chiriac, „Flexible force sensors based on permeability change in ultra-soft amorphous wires“, IEEE Sensors Journal, vol. 19, pp. 6644-6649, 2019.

[136] K. D. Sossmeier, G. L. Callegari, L. S. Dorneles and M. Carara, “Wide-range frequency method to obtain the transverse permeability from impedance measurements”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 320, pp. e1-e3, 2008.

## БИОГРАФИЈА

Јелена М. Орељ је рођена 27. фебруара 1985. године у Босанској Крупи, а основну школу и средњу електротехничку школу је завршила у Братунцу. Академске студије на Електротехничком факултету у Бањој Луци завршила је 2011. год. на студијском програму Електроника и телекомуникације (240 ЕСПБ), са просечном оценом 8,32 и стекла звање дипломирани инжењер електротехнике. На Факултету техничких наука у Чачку, на студијском програму Мехатроника, уписала мастер академске студије школске 2014/2015 године. Студије је завршила 2015. год. са просечном оценом 9,86 одбравивши мастер рад под називом ИСПИТИВАЊЕ ЕЛЕКТРОМАГНЕТНЕ КОЧНИЦЕ ПРИМЈЕНОМ ТЕРМОВИЗИЈЕ са оценом 10 и стекла звање мастер инжењер мехатронике.

Од августа 2017. године је запослена на Факултету техничких наука у Чачку Универзитета у Крагујевцу на радном месту асистент за ужу научну област Сензорика. Изводи наставу на рачунским и лабораторијским вежбама на свим предметима из уже научне области Сензорика. Активно је учествовала у формирању и опремању Лабораторије за сензорику на ФТН Чачак од њеног оснивања 2018. године до данас.

Као студент докторских студија на модулу Савремени материјали и технологије у електротехници, од 2018. године је укључена у реализацију пројекта Усмерена синтеза, структура и својства мултифункционалних материјала (ев. бр. 172057) ресорног Министарства науке. Тренутно је ангажована као истраживач на основу Уговора о реализацији и финансирању научноистраживачког рада НИО ФТН Чачак, према којем спроводи планирана пројектна истраживања у области примене савремених магнетних материјала у сензорској техници.

Рад "Магнетоимпедансни ефекат  $\text{CoFeSiB}$  аморфне жице" из области докторске дисертације је проглашен за најбољи рад младог аутора на секцији Нови материјали 64. Конференције ЕТРАНа 2020. године.

До сада је публиковала 11 научних радова из области примена савремених електротехничких материјала, од чега је 8 радова (\*\*\*) резултат научних истраживања у сензорској техници из тематике докторске дисертације.

## БИБЛИОГРАФИЈА АУТОРА

### а) Међународни научни часописи са SCI листе

#### **M21- *Раг у врхунском међународном часопису:***

1. **\*\*J. M. Orelj, N. S. Mitrović, V. B. Pavlović,** "MI-sensor Element Features and Estimation of Penetration Depth and Magnetic Permeability by Magnetoresistance and Magnetoreactance of CoFeSiB Amorphous Wires", IEEE Sensors Journal, Vol. 23, pp. 14017-14024, 2023, ISSN:1558-1748, DOI: 10.1109/JSEN.2023.3274598

#### **M22- *Раг у исцјакнућом међународном часопису:***

1. *B. Nedeljković, N. Mitrović, J. Orelj, N. Obradović, V. Pavlović,* "Characterization of FeCoV Alloy Processed by PIM/MIM Route", Science of Sintering, Vol. 49, pp. 299-309, 2017, ISSN: 0350-820X.

### б) Међународни научни скупови

#### **M33- *Саопштење са међународног скупа штампано у целини:***

1. **\*\* R. Surla, N. Mitrović, J. Orelj, V. Joksimović,** "The Magnetoimpedance Effect and Principles of Measuring", 7<sup>th</sup> International Scientific Conference Technics and Informatics in Education, Čačak, Serbia, May 25-27, 2018, ISBN: 978-86-7776-226-1, Proceedings, pp. 328-333.

#### **M34- *Саопштења са међународних скупова штампана у изводу:***

1. **\*\* B. Nedeljković, J. Orelj, V. Pavlović, N. Mitrović,** "Morphological and structural characterisation of Co-rich ferromagnetic amorphous wires and glass-covered microwires", The Eleventh Serbian Ceramic Society Conference »Advanced Ceramics and Application«, New Frontiers in Multifunctional Material Science and Processing, Belgrade, September 18-20, 2023, ISBN: 978-86-905714-0-6, Book of Abstracts, pp. 88.

2. **\*\* J. Orelj, N. Mitrović, V. Pavlović,** "Frequency Behaviour of Co-based Amorphous Wire MI-element", YUCOMAT 2021 Conference Materials Research Society of Serbia Herceg Novi, August 30 - September 3, 2021, ISBN: 978-86-919111-6-4, Book of Abstracts, pp. 98.

3. **\*\* J. Orelj, N. Mitrović,** "High Frequency Magnetoimpedance Characterization of Fe-based Amorphous Wires", The Eight Serbian Ceramic Society Conference »Advanced Ceramics and Application«, New Frontiers in Multifunctional Material Science and

Processing, Belgrade, September 23-25, 2019, ISBN: 978-86-915627-7-9, Book of Abstracts, pp. 70.

4. *N. Mitrović, J. Orej, M. Bjekić, M. Božić, M. Šućurović*, "Thermal Imaging of the Electromagnetic Brake", The 8<sup>th</sup> International Conference & Workshop, REMOO Energy-2018, Venice, Italy, May 29-31, 2018, ISBN: 978-3-9818275-6-9, Book of Abstracts, pp. T07-083.

5. *J. Orej, N. Mitrović*, "Analytical Method for Hysteresis Modelling of Magnetic Materials Applying Labview Software Package", The Sixth Serbian Ceramic Society Conference »Advanced Ceramics and Application«, New Frontiers in Multifunctional Material Science and Processing, Belgrade, September 18-20, 2017, ISBN: 978-86-915627-5-5, Book of Abstracts, pp. 80

6.\*\* *N. Mitrović, J. Orej, A. Milovanović*, "Magnetoimpedance Effect in FINEMET Microwires for Sensors Applications", The Fifth Serbian Ceramic Society Conference »Advanced Ceramics and Application«, New Frontiers in Multifunctional Material Science and Processing, September 21-23, 2016, Belgrade, ISBN: 978-86-915627-4-8, Book of Abstracts pp. 69-70.

#### **в) Национални научни скупови**

##### **М63- Саопштења са скупа националног значаја штампана у целини:**

1. \*\* *J. Orej, H. Mitrović*, "Осетљивост магнетоимпедансног елемента CoFeSiB аморфне жице", LXVI Конференција ЕТРАН, Нови Пазар, 6 - 9. јуна 2022, ISBN 978-86-7466-930-3, Зборник радова, рад НМ.1.4, стр. 1-5.

2. \*\* *J. Orej, H. Mitrović, B. Pavlović*, "Магнетоимпедансни ефекат CoFeSiB аморфне жице", LXIV Конференција ЕТРАН, Београд, Чачак, Ниш, Нови Сад, 28-29 септембра 2020, ISBN: 978-86-7466-852-8, Зборник радова, стр. 513-517.

**ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:

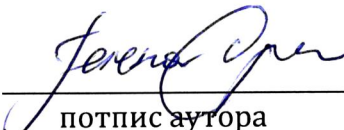
**МАГНЕТОИМПЕДАНСНИ ЕФЕКАТ АМОРФНИХ ЖИЦА  
СА МАГНЕТНО МЕКИМ СВОЈСТВИМА**

представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

У Чачку, 22. 04. 2024. године,

  
потпис аутора

**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ  
ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под  
насловом:

**МАГНЕТОИМПЕДАНСНИ ЕФЕКАТ АМОРФНИХ ЖИЦА  
СА МАГНЕТНО МЕКИМ СВОЈСТВИМА**

истоветне.

У Чачку, 22. 04. 2024. године,

  
потпис аутора



**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ја, Јелена М. Орелъ,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

**МАГНЕТОИМПЕДАНСНИ ЕФЕКАТ АМОРФНИХ ЖИЦА  
СА МАГНЕТНО МЕКИМ СВОЈСТВИМА**

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем преузимања.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам<sup>1</sup>

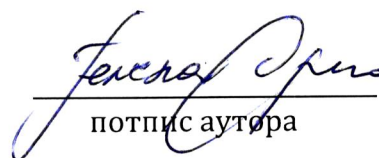
---

<sup>1</sup> Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима**
- 3) Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада<sup>2</sup>

У Чачку, 22. 04. 2024. године,

  
потпис аутора

---

<sup>2</sup> Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>