

ОБРАЗАЦ 6

27. 06. 2024.

Број одл.	Број	Прилог	Вредност
01	1389		

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ
И
ВЕЋУ ЗА ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКЕ НАУКЕ
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

На седници Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу одржаној 19.6.2024. године (број одлуке: IV-04-471/9) одређени смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом: „Магнетоимпедансни ефекат аморфних жица са магнетно меким својствима”, кандидата **Јелене Орел**, студента докторских академских студија Електротехничко и рачунарско инжењерство, за коју је именован ментор др **Небојша Митровић**, редовни професор.

На основу података којима располажемо достављамо следећи:

ИЗВЕШТАЈ
О ОЦЕНИ УРАЂЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

1. Подаци о докторској дисертацији
1.1.Наслов докторске дисертације:
Магнетоимпедансни ефекат аморфних жица са магнетно меким својствима
1.2.Опис докторске дисертације (навести кратак садржај са назнаком броја страница, поглавља, слика, шема, графикона, једначина и референци) (до 500 карактера):
Докторска дисертација „Магнетоимпедансни ефекат аморфних жица са магнетно меким својствима“ је написана на 99 страна и садржи 74 слике, 4 табеле, 12 једначина и 136 релевантних библиографских јединица које су цитиране у тексту докторске дисертације. Након резимеа на српском и енглеском језику докторска дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Теоријске основе истраживања, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак, Литература и Биографија са библиографијом аутора.
1.3.Опис предмета истраживања (до 500 карактера):
Предмет истраживања 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 $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ и $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ као и легура на бази гвожђа из система FINEMET Fe-M-Cu-Si-B (M=Nb) састава $Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$. У дисертацији су истраживани феномени у научној области развоја савремене сензорске технике на бази магнетоимпедансних елемената начињених од наведених аморфних жица.

1.4. Анализа испуњености полазних хипотеза:

Анализе приказане у теоријском делу дисертације предвиђају да је импеданса \underline{Z} испитиваних феромагнетних аморфних жица функција следећих параметра: радне фреквенције f , интензитета и оријентације спољашњег једносмерног магнетног поља H_{ex} и амплитуде наизменичне струје I_{cc} која протиче кроз узорак. Експериментални резултати добијени током израде докторске дисертације јасно потврђују хипотезу утицаја спољашњег лонгитудиналног dc магнетног поља H_{ex} и циркуларног ac магнетног поља $h_{ac}(f)$ (индукованог протоком наизменичне струје $i_{ac}(f)$) на промену магнетне дубине продирања $\delta_m(H_{ex}, f)$ и магнетне пермеабилности $\mu(H_{ex}, f)$, а самим тим и на магнетоимпедансни ефекат.

Магнетоимпедансни (МИ) ефекат је резултат интеракција спољашњег једносмерног магнетног поља са магнетним доменима чија је структура зависна од унутрашњих напрезања насталих током поступка брзог хлађења растопа легуре којим се добијају аморфне жице. Код аморфних феромагнетних жица са негативним коефицијентом магнетострикције (легура на бази кобалта $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ и $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$) доменска структура се састоји од унутрашњих магнетних домена, окружених циркуларним доменима наизменично распоређеним дуж правца жице, док се код аморфних феромагнетних жица са позитивним коефицијентом магнетострикције (легура на бази гвожђа $Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$) доменска структура састоји од лонгитудинално намагнетисаног језгра (по оси жице) и радијалног спољашњег омотача са магнетним доменима у конфигурацији лавиринта и цик-цак зидовима.

Са циљем потврде утицаја радних фреквенција на МИ-ефекат у дисертацији су детаљно испитана два фреквентна подопсега:

- (а) опсег ниских фреквенција (од око 10 kHz до око 1 MHz) у којем је доминантан ефекат померања доменских зидова; и
- (б) почетак средњих фреквенција (од 1 MHz до 12 MHz) у којем су главни утицаји скин-ефекта и ротација вектора магнетизације као механизам процеса циркуларног магнећења (померање доменских зидова је блокирано).

У опсегу ниских радних фреквенција магнетна пермеабилност μ 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 $|\underline{Z}(H_{ex})|$. Експерименти показују да криве $|\underline{Z}(H_{ex})|$ карактерише константно смањење са повећањем магнетног поља, као и константно повећање модула импедансе са повећањем радне фреквенције. На релативно ниским фреквенцијама реална компонента импедансе има доминантан утицај на промену модула импедансе. При нижим фреквенцијама (150 kHz и 300 kHz), код аморфних жица састава $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ скин ефекат је слабије изражен, па је магнетна дубина продирања и даље велика (проток наелектрисања је практично дуж целог попречног пресека, $\delta_m \leq a$). Магнетоотпорност MR је доминантна компонента магнетоимпедансе \underline{Z} испитиваног узорка жице, а зависности $MR(H_{ex})$ и $|\underline{Z}(H_{ex})|$ показују монотонно смањење са тенденцијом ка вредности једносмерног електричног отпора $|\underline{Z}(H_{ex})| \approx MR(H_{max}) \approx R_{dc} \approx 3 \Omega$. У овом случају, осно-лонгитудинална анизотропија у језгру жице, као извор промена магнетне пермеабилности, је доминантна над циркуларном анизотропијом по ободној површини аморфне жице.

При повећању радне фреквенције у опсегу средњих фреквенција (реда MHz) дубина продирања значајно опада (δ_m је значајно мања од полупречника жице, $\delta_m \ll a$) 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 циркуларне магнетизације (кретање зидова магнетних домена је блокирано) што значајно мења зависност МИ-односа од dc магнетног поља H_{ex} . Експерименти показују да се облик зависности МИ-односа од спољашњег једносмерног магнетног поља значајно мења и евидентира се појава пика. Овим је потврђена хипотеза да је за потпуну анализу МИ-ефекта поред модула импедансе $|Z(H_{ex})|$ неопходно детаљно анализирати и зависности реалног дела импедансе $MR(H_{ex}, f)$ и имагинарног дела импедансе $MX(H_{ex}, f)$. Зависности магнетоотпорности од спољашњег магнетног поља $MR(H_{ex})$ карактерише монотono опадање при $f \leq 3$ MHz, док се на кривама добијеним при 4 MHz и 5 MHz запажа почетак развоја пика. Различито од магнетоотпорности, зависност магнетореактансе од спољашњег dc магнетног поља $MX(H_{ex})$ показује профил са појавом пика за све фреквенције у испитиваном опсегу $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$. Обе компоненте импедансе карактерише константан пораст вредности са повећањем фреквенције. Профили МИ-односа поседују јасан пик позициониран при вредности поља магнетне анизотропије H_k , чиме се потврђује хипотеза да је механизам ротације магнетизације доминантан код циркуларне пермеабилности.

Следеће хипотезе се односе на могућност анализе дубине магнетног продирања $\delta_m(H_{ex}, f)$ 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 чему се трећи параметар одржава константним (амплитуда наизменичне струје I_{cc} која протиче кроз узорак). Докторандови експериментални резултати и пратеће анализе недвосмислено потврђују обе ове хипотезе. Код аморфних жица састава $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ на фреквенцији од 1 MHz регистровано је константно повећање дубине продирања δ_m (са 4,7 μm при нултом магнетном пољу до 7,9 μm при 463 A/m). При повећању радне фреквенције на 5 MHz долази до смањења магнетне дубине продирања (3,3 μm при нултом магнетном пољу до 4,1 μm при 463 A/m). Код аморфних жица састава $Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$ при 0,7 MHz регистровано је повећање δ_m са 42 μm при нултом магнетном пољу до 57 μm при 7,5 kA/m. Повећање фреквенције на 4,5 MHz доводи до значајног смањења магнетне дубине продирања (на 22 μm при нултом магнетном пољу до 32 μm при 7,5 kA/m). Све криве магнетне пермеабилности код аморфних жица састава $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ карактерише појава фреквентно зависног максимума (уз смањења μ_{max} и $\mu(H_{max})$ са порастом фреквенције; максимална вредност пермеабилности μ_{max} је око 10 000 при 2 MHz).

На основу свега наведеног, Комисија сматра да су у докторској дисертацији полазне хипотезе правилно постављене и спроведеним експерименталним истраживањима са адекватним анализама и потврђене.

1.5. Анализа примењених метода истраживања:

Кандидат је на основу свеобухватне и систематске анализе спроведене при планирању рада на докторској дисертацији, изабрао адекватне и поуздане експерименталне и аналитичке методе за истраживање својстава жица феромагнетних аморфних металних легура као сензорског елемента.

За стандардне полазне анализе аморфних легура користе се методе дифракције X-зрака **XRD** (за проверу аморфне структуре) и диференцијалне термијске анализе **DTA** (за одређивање температурског опсега термичке стабилности метастабилног стања легуре). Структурна и хемијска карактеризација материјала је анализирана скенирајућом електронском микроскопијом са енергетском дисперзивном спектроскопијом X-зрака, **SEM/EDS**, док је морфологија површина аморфних жица испитивана оптичком микроскопијом **OM**.

У сврху провере интензитета магнетног поља на оси Хелмхолцових калемова (у чијој централној зони су позиционирани МИ-елементи аморфних феромагнетних жица током истраживања) изведен је експеримент коришћењем сензора магнетног поља (резулације 10^{-5} T) и дата логера. Мерењима је утврђено да је у централној зони калемова одступање вредности јачина магнетног поља добијених мерењем од вредности одређених на основу теоријских прорачуна само 0,3%.

Испитивање електричних карактеристика аморфних жица је спроведено мерењем модула, реалног и имагинарног дела импедансе (у зависности од фреквенције и спољашњег магнетног поља) помоћу LCR-метра (методом четири тачке) и мерењем модула импедансе помоћу векторског анализатора мреже VNA (методом одређивања параметара расејања). Сензорске карактеристике МИ-елемената су испитиване одређивањем критичне фреквенције (при којој почињу да се опажају феномени МИ-ефекта), као и праћењем фреквентне зависности осетљивости и магнетног поља анизотропије.

Напред наведене методе су општеприхваћене при истраживањима аморфних феромагнетних металних легура чији се резултати публикују у најеминентнијим међународним научним часописима са тематиком савремене сензорске технике.

1.6. Анализа испуњености циља истраживања:

Интензиван развој сензорике уз коришћење аморфних и нанокристалних феромагнетних легура за израду МИ-елемената омогућио је њихове бројне примене: као сензора магнетног поља, ротације, притиска, струјне сензоре, за електронске компасе, навигације/GPS, биомагнетна мерења, магнетне меморије, системе безбедности, контролу саобраћаја и индустријских процеса, космичка истраживања,... За успешно функционисање наведених сензора неопходно је оптимизовати радне параметре (интензитета магнетног поља и фреквенцију). Стога се централна истраживања у докторској дисертацији односе на промене импедансе под утицајем спољашњег једносмерног магнетног поља H_{ex} при одређеним радним фреквенцијама f наизменичне струје која протиче кроз узорке аморфних жица са магнетно меким својствима, тј. у домену функционалне зависности импедансе $Z(H_{ex}, f)$ испитиваних МИ-елемента.

Истраживања су спроведена код две аморфне легуре на бази кобалта (системи CoFeSiB и CoSiB) и легуре на бази гвожђа (систем FINEMET Fe-M-Cu-Si-B, M=Nb), с циљем одређивања упоредних својстава између два система легура на бази кобалта, као и њихове компарације са одговарајућим својствима легуре на бази гвожђа. МИ-однос код система CoFeSiB достиже максимум од 334% (при 0.95 MHz и 7720 A/m), док је нешто виша максимална вредност МИ-односа од 365% (на 1 MHz али при само 99 A/m) потврдила закључак о могућностима ефикасне детекције веома ниских вредности магнетних поља применом МИ-елемента система CoSiB.

Критична фреквенција када одпочињу промене магнетоимпедансе (при константној вредности спољашњег магнетног поља H_{ex}) код МИ-елемента система CoFeSiB је од 5 kHz до 7 kHz, док је код система FeNbCuSiB око 30 kHz. Упоредна истраживања зависности магнетне дубине продирања од фреквенције и магнетног поља

$\delta_m(H_{ex}, f)$ код аморфних жица система CoFeSiB и FeNbCuSiB 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).

Један од циљева спроведених експеримената су детаљне анализе зависности реалног и имагинарног дела импедансе $MR(H_{ex}, f)$ и $MX(H_{ex}, f)$, респективно. Магнетоотпорност MR је омогућила комплетну процену промене дубине магнетног продирања $\delta_m(H_{ex}, f)$, док је познавање магнетореактансе MX омогућило анализу магнетне пермеабилности $\mu(H_{ex}, f)$.

Комисија је мишљења да су успешно задовољени постављени циљеви истраживања.

1.7. Анализа добијених резултата истраживања и списак објављених научних радова кандидата из докторске дисертације (аутори, наслов рада, назив часописа, волумен, година објављивања, странице од-до, DOI број¹, категорија):

Један део резултата истраживања кандидата из докторске дисертације је презентован међународном научном аудиторijуму публиковањем рада у врхунском међународном часопису категорије M21

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, 2023, pp. 14017-14024, ISSN:1558-1748, DOI: 10.1109/JSEN.2023.3274598 <https://ieeexplore.ieee.org/document/10124180> M21 .

Током припрема пријаве докторске дисертације део научних резултата је презентован и на националним и међународним научним скуповима:

2. 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, ISBN: 978-86-905714-0-6, M34

3. **J. Орељ**, 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, ISBN: 978-86-7466-930-3, M63

4. **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, Book of Abstracts, pp. 98, ISBN: 978-86-919111-6-4, M34

5. **J. Орељ**, Н. Митровић, В. Павловић, "Магнетоимпедансни ефекат CoFeSiB аморфне жице", LXIV Конференција ЕТРАН, Београд, Чачак, Ниш, Нови Сад, 28-29 септембра 2020, Зборник радова, стр. 513-517, ISBN: 978-86-7466-852-8, M63

6. **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, Book of Abstracts, pp. 70, ISBN: 978-86-915627-7-9, M34

Део веома актуелних научних резултата до којих се дошло током израде докторске дисертације се припрема за презентовање на међународним научним скуповима и часописима, где се очекује размена искустава и идеја са иностраним истраживачима о још

¹ Уколико публикација нема DOI број уписати ISSN и ISBN

увек отвореним питањима феномена магнетоимпедансног ефекта (нпр. моделовање фреквентне зависности магнетног поља анизотропије H_k код аморфних жица са и без стакленог омотача).

1.8. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области и анализа извештаја о провери докторске дисертације на плагијаризам (до 1000 карактера):

Комисија сматра да докторска дисертација „Магнетоимпедансни ефекат аморфних жица са магнетно меким својствима“ представља резултат оригиналног научног рада кандидата.

Према предвиђеној процедури Универзитета у Крагујевцу спроведен је поступак детекције плагијаризма ове докторске дисертације. У Извештају о провери оригиналности докторске дисертације бр. IV-04-353/2 од 10. 05. 2024. год., евидентирана су три извора подударања текста. Први и највећи део подударања представљају елементи текста пријаве саме докторске дисертације. Други део подударања су публиковани резултати докторандових истраживања проистекли током рада на докторској дисертацији (саопштење на Конференцији ЕТРАНа и рад публикован у међународном научној часопису IEEE Sensors Journal). Трећи део подударања текста представља навођење библиографских података коришћене литературе. Дакле, Извештај о провери оригиналности докторске дисертације (провера на плагијаризам) и Оцена ментора о извештају о провери оригиналности докторске дисертације „Магнетоимпедансни ефекат аморфних жица са магнетно меким својствима“ кандидата Јелене М. Орелј недвосмислено указују на оригиналност докторске дисертације.

1.9. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области:

У оквиру докторске дисертације су истраживани феномени у научној области развоја савремених сензора на бази магнетоимпедансних елемената код аморфних жица са магнетно меким својствима легура састава $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$, $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ и $Fe_{73.5}Nb_3Cu_1Si_{13.5}B_9$. Истраживањима магнетоимпедансе $Z(H_{ex}, f)$ при фреквенцијама реда мегагерца је генерализован закључак да су оптималне радне фреквенције дефинисане потребом избегавања доминантног утицаја лонгитудиналне анизотропије, тј. динамике магнећења домена у унутрашњости жица, која значајно смањује осетљивост микромагнетног сензора. Доминантним утицајем циркуларне магнетне анизотропије кроз механизам ротације вектора магнетизације у доменима распоређеним по ободу цилиндра-жице достижу се вредности магнетне дубине продирања $\delta_m(H_{ex}, f)$ од око једне десетине полупречника жице и омогућава изражен утицај dc магнетног поља на повећање δ_m (тј. смањење Z). На овај начин је остварена висока осетљивост МИ-елемента аморфних жица легуре $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$, која при фреквенцијама 4-5 MHz достиже вредност од око 0,4 %/A/m. Показано је да се суштинске интеракције одигравају при површини феромагнетних жица које се успешно користе за израду микро МИ-сензора, чиме се омогућавају високи нивои минијатуризације компоненти у савременој сензорици.

Свеобухватним теоријским и експериментално - аналитичким радом заснованом на мултидисциплинарном приступу, кандидат је успешно систематизовао истраживања физичких појава анализираних у оквиру докторске дисертације. Постигнути научни резултати омогућавају перспективна истраживања МИ-ефекта код најновије генерације феромагнетних аморфних металних микрожица са стакленим омотачем.

1.10. Оцена испуњености услова за одбрану докторске дисертације у складу са студијским програмом, општим актом факултета и општим актом Универзитета (до 1000 карактера):

Докторска дисертација кандидата Јелене Орел „Магнетоимпедансни ефекат аморфних жица са магнетно меким својствима“ је написана према упутствима Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу и по садржају одговара прихваћеној теми од стране Наставно-научног већа ФТН Чачак и Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу. Студент је у складу са Правилником о докторским студијама и стицању звања доктора наука на ФТН Чачак испунио све услове за одбрану докторске дисертације предвиђене студијским програмом докторских академских студија Електротехничко и рачунарско инжењерство. Кандидат је показао потпуно разумевање појмова и теорија релевантних у области развоја савремених сензора на бази магнетоимпедансних елемената, о чему најбоље говори податак да је део научних резултата до којих се дошло током израде докторске дисертације публикован у врхунском међународном часопису IEEE Sensors Journal (M21), једном од најпрестижнијих светских часописа из области савремене сензорске технике. Имајући у виду напред наведене чињенице, сматрамо да су задовољени постављени циљеви истраживања и да су испуњени сви научни, стручни и административни услови за одбрану докторске дисертације.

2. ЗАКЉУЧАК

На основу анализе докторске дисертације и приложене документације Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом „Магнетоимпедансни ефекат аморфних жица са магнетно меким својствима“, кандидата Јелене Орел, предлаже надлежним стручним органима да се докторска дисертација прихвати и да се одобри њена одбрана.

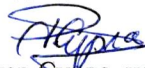
Чланови комисије:


Др Владимир Павловић, редовни професор

Пољопривредни факултет
Универзитета у Београду

Ужа научна област Физика

Председник комисије


Др Радослав Сурда, научни сарадник

Војнотехнички институт Београд

Научна област техничко-технолошке науке
Електроника

Члан комисије


Др Боривоје Недељковић, доцент

Факултет техничких наука у Чачку
Универзитета у Крагујевцу

Ужа научна област Материјали

Члан комисије