

Осетљивост магнетоимпедансног елемента CoFeSiB аморфне жице

Јелена Орељ, Небојша Митровић

Апстракт—У овом раду је представљено испитивање осетљивости магнетоимпедансног (МИ) елемента код жице аморфне легуре CoFeSiB у опсегу фреквенција 2 MHz ÷ 5 MHz (@ $H_{max} \approx 463$ A/m). При 1 MHz, МИ-однос је 45 %, док је при вишим фреквенцијама евидентиран максимум криве $\Delta Z(H)/Z$ који одговара пољу магнетне анизотропије H_k . Повећање радних фреквенција праћено је порастом поља магнетне анизотропије H_k чиме се повећава и мерни опсег магнетног сензора базираног на примени испитиваног МИ елемента. Истовремено је евидентирана и промена осетљивости МИ елемента која при 4 MHz и 5 MHz достиже највеће вредности од око 0,4 % / A/m.

Кључне речи—МИ ефекат, CoFeSiB аморфна жица, МИ елемент, осетљивост МИ елемента

I. УВОД

ПОСТИЗАЊЕ оптималних функционалних карактеристика електричних уређаја израђених од феромагнетних легура је могуће тек након детаљног истраживања електричних и магнетних својстава материјала. Један од најинтересантнијих феномена који се може искористити за магнетне сензоре је магнетоимпедансни (МИ) ефекат уочен код аморфних или нанокристалних магнетно меких трака, жица или танких филмова. Овај ефекат, примењен најпре код аморфних FeCoSiB жица [1], омогућио је интензиван развој сензора на бази МИ-елемента, 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 [2-4]) и планарна (траке, филмови [5-7]). Аморфне жице се могу користити у верзији са заштитним стакленим омотачем [8] или без омотача [9]. 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 формира нанокристална структура дистрибуирана у аморфној матрици).

Релативна промена импедансе $\Delta Z/Z$ у одговарајућем фреквентном опсегу може достићи и више стотина

Јелена Орељ – Факултет техничких наука у Чачку, Универзитета у Крагујевцу, Светог Саве 65, Србија (е-мејл: jelena.orelj@ftn.kg.ac.rs)

Небојша Митровић – Факултет техничких наука у Чачку, Универзитета у Крагујевцу, Светог Саве 65, Србија (е-мејл: nebojsa.mitrovic@ftn.kg.ac.rs)

процената (енг. Giant Magneto Impedance (GMI) effect - велики МИ ефекат): 506 % CoFeNiMoBSi @ 8 kA/m [10], 1200 % CoFeBSi @ 15 kA/m [11], што аморфним жицама ових легура омогућава широке могућности примене [12-13].

МИ ефекат је директно повезан са феноменом скин ефекта код феромагнетних материјала. Наиме, порекло магнетоимпедансног ефекта везано је за промене у динамици процеса магнетизације. Те промене утичу на магнетну пермеабилност, а самим тим и на дубину продирања наизменичне струје кроз магнетни проводник са повећањем фреквенције [14]. Познато је да добри проводници са великом пермеабилношћу показују велики МИ ефекат. Поред тога, за наизменичну побуду високе фреквенције (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, док се примењеним магнетним пољем то потискивање модулише, односно мења се ефективна површина попречног пресека кроз коју протиче наелектрисање – струја, при одређеној константној фреквенцији побуде. Дакле, велика пермеабилност и висока фреквенција смањују дубину продирања, док се примењеним пољем она повећава.

На дубини продирања δ_m

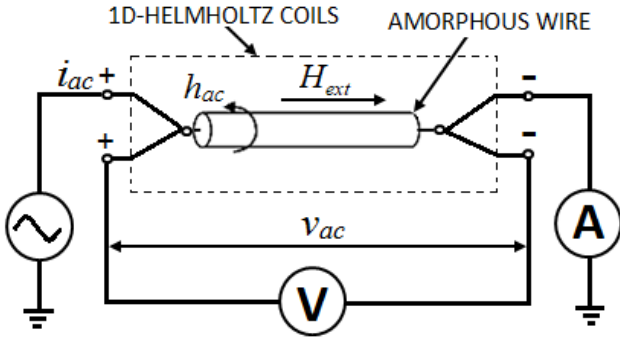
$$\delta_m = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot \mu \cdot f}} \quad (1),$$

код магнетно меких материјала са ниским вредностима специфичне електричне отпорности ρ , високим вредностима магнетне пермеабилности μ а при релативно високим фреквенцијама f , амплитуда вектора густине струје опадне на 1/e своје вредности уз површину узорка [15]. Промене и осталих напред наведених физичких својстава (ρ , μ) ће резултовати у изменама расподеле тока наелектрисања по попречном пресеку жице и утицати на измену импедансе. Фреквенција при којој дубина продирања постаје мања од полупречника жице ($\delta_m < a$) се назива критична фреквенција [16, 17], тако да се при даљем повећању учестаности запажају феномени МИ-ефекта.

Промена импедансе показује временски зависну природу простирања магнетног поља у проводнику одговарајуће магнетне пермеабилности, на чему су засноване могућности детекције магнетног поља ниског интензитета. Осетљивости великог МИ ефекта у аморфним жицама [18], тракама [19] и вишеслојним филмовима [20] на релативно вишим фреквенцијама ($f > 1$ MHz) могу достићи изузетно високе вредности, од чак неколико стотина % / Oe (1 Oe = $10^3/4\pi$ A/m).

Велика осетљивост комплексне импедансе аморфне жице, Z , на примењено dc магнетно поље, H_{ext} , кључна је за развој бројних магнетних сензора високих перформанси. Високе вредности осетљивости оваквих сензора се захтевају у многим инжењерским и индустријским применама.

На слици 1. је приказана принципијелна шема мерења магнетоимпедансе аморфне жице у спољашњем dc магнетном пољу генерисаном системом 1Д-Хелмхолцових калемова.



Сл. 1. Шема експеримента мерења магнетоимпедансе аморфне жице.

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

Импеданса Z је количник тренутних вредности наизменичног напона V_{ac} и наизменичне струје i_{ac} , а код узорка цилиндричног проводника полупречника a [21]:

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

где су R_{dc} електрични отпор; R и X реални и имагинарни део импедансе Z ; J_0 и J_1 Беселове функције нултог и првог реда прве врсте, $k = (1+j)/\delta_m$; $j^2 = -1$.

Магнето–импедансни однос се углавном дефинише као релативна промена импедансе узорка са променом спољашњег dc магнетног поља (H_{ext}):

$$\Delta Z/Z (\%) = 100 \% \times [Z(H) - Z(H_{max})]/Z(H_{max}) \quad (3),$$

где је $Z(H_{max})$ импеданса при максималном магнетном пољу. Узорак се најчешће позиционира лонгитудално (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 η који је дефинисан једначином [22, 23]:

$$\eta = (\partial (\Delta Z/Z) / \partial H_{ext}) \quad (4).$$

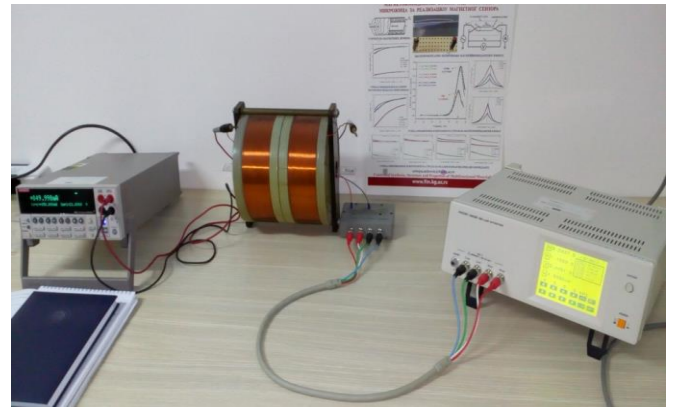
У овом раду су приказана високофреквентна истраживања $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ осетљивости МИ-елемента аморфне жице легуре CoFeSiB пречника око $100 \mu\text{m}$ с циљем процене атрактивности њене примене у сензорици. Ранија истраживања су показала да појава МИ-ефекта започиње на око 5 kHz , а регистровани

МИ-однос износи чак 344% при радној фреквенцији од 950 kHz (@ $H_{max}=7,72 \text{ kA/m}$) [24]).

II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

Предмет истраживања је МИ-елемент од CoFeSiB аморфне жице пречника од $100 \mu\text{m}$, добијене технологијом брзог хлађења растопа у ротирајућем слоју воде на унутрашњој површини ротирајућег диска (in rotating water melt-spinning [25, 26]).

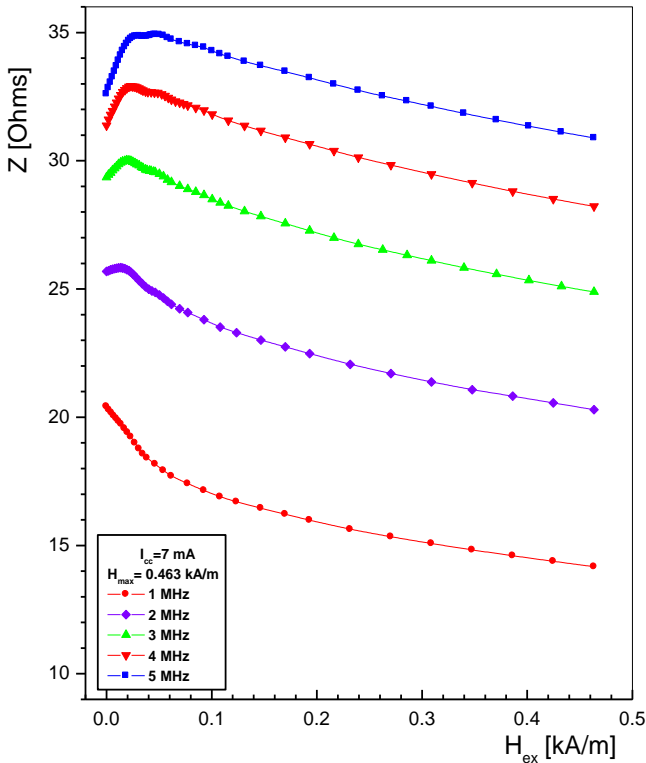
Мерење магнетоимпедансе је изведено у хомогеном магнетом пољу генерисаном помоћу 1Д-Хелмхолцових калемова при лонгитудиналној оријентацији МИ-елемента. Импеданса испитиваних узорка жица дужине 17 mm , мерена је по методи четири тачке помоћу инструмента $\text{LCR Hi-TESTER HIOKI 3532-50}$, у фреквентном опсегу од 1 MHz до 5 MHz . Током наших експеримената амплитуда струје I_{cc} је одржавана константном и износила је 7 mA тако да је интензитет циркуларног ac магнетног поља h_{ac} на површини узорка аморфне CoFeBSi жице пречника $2a = 100 \mu\text{m}$ достигао вредност $H_{ac} = I_{cc}/2\pi a = 22.3 \text{ A/m}$. На слици 2. је приказана експериментална поставка мерења магнетоимпедансе узорка жица у систему 1Д-Хелмхолцових калемова.



Сл. 2. Експериментална поставка мерења магнетоимпедансе по методи четири тачке $\text{LCR Hi-TESTER HIOKI 3532-50}$, $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$.

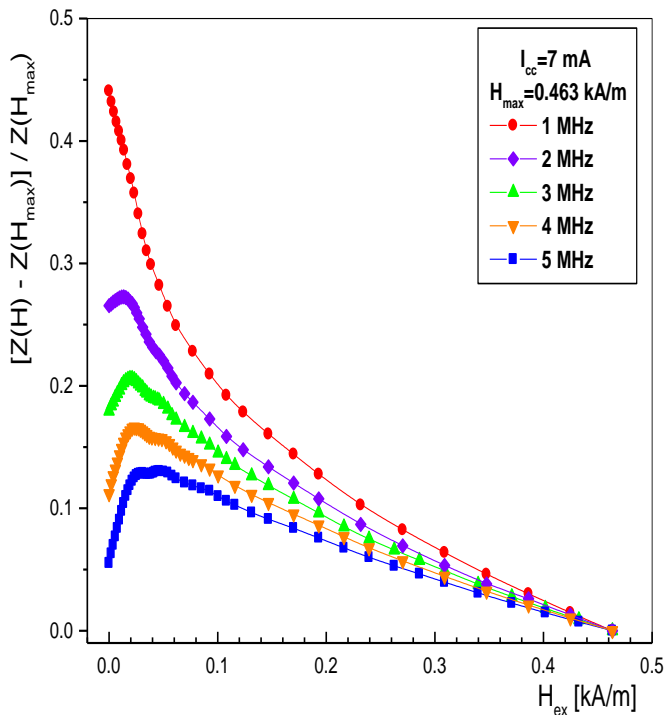
III. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

На слици 3. је приказана промена импедансе Z услед примене спољашњег магнетног поља (@ $H_{max} \approx 463 \text{ A/m}$) при различитим вредностима фреквенције $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$. Облик зависности импедансе од спољашњег једносмерног магнетног поља $Z(H_{ex})$ се значајно мења, па се из облика криве са константним смањењем импедансе на 1 MHz , при даљем повећању фреквенције региструје максимум који одговара пољу магнетне анизотропије H_k . Уочљив је и померај позиције максималне вредности импедансе при повећању фреквенције, тј. повећање поља магнетне анизотропије H_k . Ово померање максимума импедансе при повећању фреквенције ка вишим вредностима магнетног поља је резултат доминантног учешћа механизма ротације вектора магнетизације током процеса циркуларног магнетнења жице (кретање зидова магнетних домена је блокирано) [27]. Порастом поља магнетне анизотропије H_k се повећава и мерни опсег магнетног сензора базираног на примени испитиваног МИ елемента.



Сл. 3 Промене импедансе Z од спољашњег dc магнетног поља H_{ex} при повећању фреквенције $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ ($@ H_{max} \approx 463 \text{ A/m}$).

На слици 4. је приказана зависност МИ-односа услед примене спољашњег магнетног поља ($@ H_{max} \approx 463 \text{ A/m}$) при различитим вредностима радне фреквенције $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$.

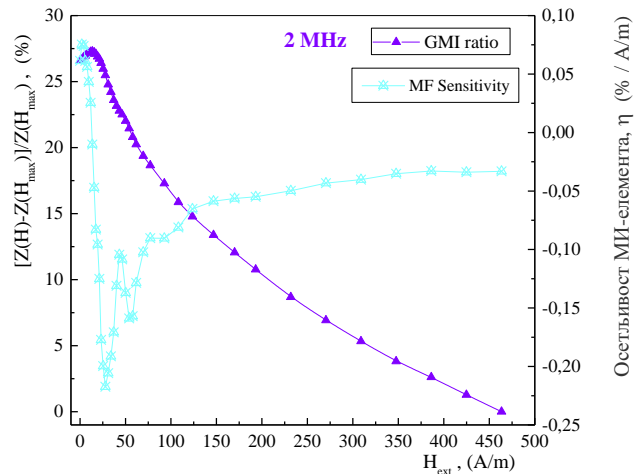


Сл. 4. Зависност МИ-односа од спољашњег dc магнетног поља H_{ex} при фреквенцијама $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ ($@ H_{max} \approx 463 \text{ A/m}$).

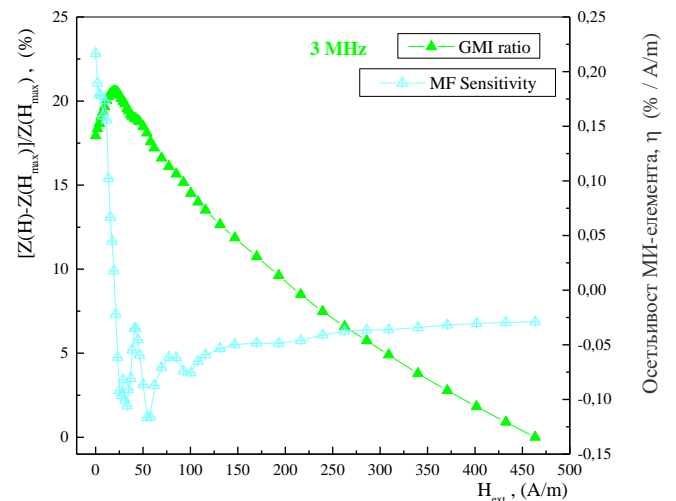
Највеће вредности МИ-односа су регистроване на фреквенцији од 1 MHz (око 45 % при $H_{ex} = 0$), док се при даљем повећању фреквенције уочава константно смањење МИ-односа.

На сликама 5-8. паралелно су приказане зависности МИ-односа $\Delta Z/Z$ и сопствене осетљивости МИ-елемента η (једначина (4)) од спољашњег dc магнетног поља H_{ext} ($@ H_{max} \approx 463 \text{ A/m}$) при радним фреквенцијама $f \in [2 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$. Евидентирано је константно повећање осетљивости при расту 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 достиже вредности од око 0,4 % / A/m.

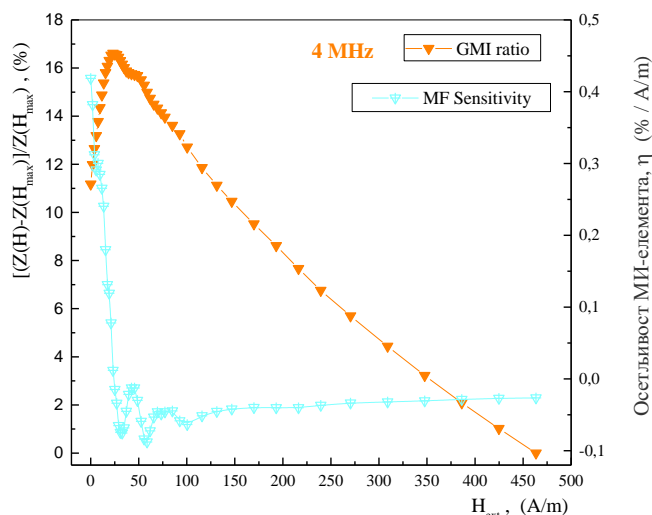
При анализи приказаних резултата потребно је нагласити да су овде приказане осетљивости појединачног сензорског МИ-елемента, док је коначна осетљивост самог МИ-сензора дефинисана одабраним електричним колом при изради магнетног сензора (Колпицов осцилатор [28], CMOS IC мултивибратор [29, 30] са резолуцијом мерења магнетне индукције од око 1 pT).



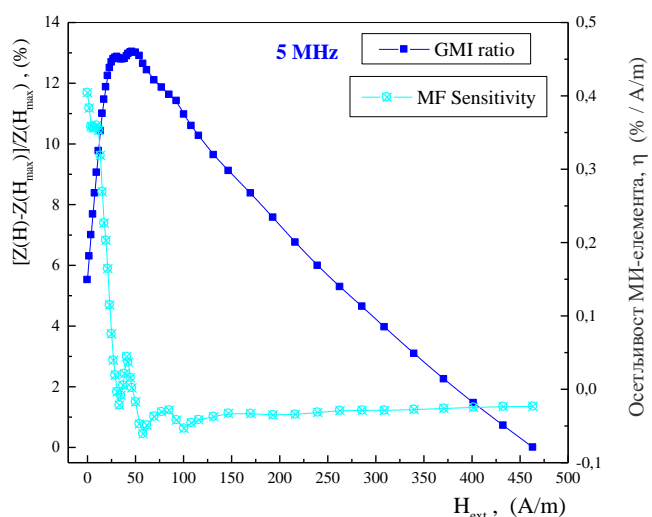
Сл. 5. Упоредни приказ зависности МИ-односа и осетљивости МИ-елемента од спољашњег dc магнетног поља H_{ext} при фреквенцији $f = 2 \text{ MHz}$ ($@ H_{max} \approx 463 \text{ A/m}$).



Сл. 6. Упоредни приказ зависности МИ-односа и осетљивости МИ-елемента од спољашњег dc магнетног поља H_{ext} при фреквенцији $f = 3 \text{ MHz}$ ($@ H_{max} \approx 463 \text{ A/m}$).



Сл. 7. Упоредни приказ зависности МИ-односа и осетљивости МИ-елемента од спољашњег dc магнетног поља H_{ext} при фреквенцији $f=4$ MHz (@ $H_{max} \approx 463$ A/m).



Сл. 8. Упоредни приказ зависности МИ-односа и осетљивости МИ-елемента од спољашњег dc магнетног поља H_{ext} при фреквенцији $f=5$ MHz (@ $H_{max} \approx 463$ A/m).

IV. ЗАКЉУЧАК

Испитивања МИ-ефекта код аморфне жице легуре CoFeSiB у фреквентном опсегу $f \in [1 \text{ MHz}, 5 \text{ MHz}]$ показују константно повећање импедансе узорка жице. Прорачун МИ-односа је показао да се највеће вредности добијају при фреквенцији од 1 MHz (@ $H_{max} \approx 463$ A/m је око 45 %), а затим се МИ-однос смањује. При фреквенцијама изнад 1 MHz је регистрован максимум импедансе који одговара пољу магнетне анизотропије H_k . Повећање поља магнетне анизотропије H_k при повећању фреквенције је резултат доминантног учешћа механизма ротације вектора магнетизације током процеса магнећења. Пораст фреквенције праћен је и повећањем осетљивости МИ-елемента, које при фреквенцијама од 4 MHz и 5 MHz достижу вредности од око 0,4 % / A/m.

ЗАХВАЛНИЦА

Рад је делимично финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (евиденциони број пројекта 451-03-68/2022-14/200132 Факултета техничких наука у Чачку, Универзитета у Крагујевцу).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] L. V. Panina, K. Mohri, "Magneto-impedance effect in amorphous wires", *Applied Physics Letters*, Vol. 65, pp. 1189–1191, 1994.
- [2] J. Devkota, A. Ruiz, P. Mukherjee, H. Srikanth, M.H. Phan, A. Zhukov, 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.
- [3] J. Liu, H. Shen, D. Xing, J. Sun., "Optimization of GMI properties by AC Joule annealing in melt-extracted Co-rich amorphous wires for sensor applications", *Physica Status Solidi*, Vol. 211, pp. 1577-1582, 2014.
- [4] A. Dzhumazoda, L.V. Panina, M.G. Nematov, A.A. Ukhassov, N.A. Yudanov, A.T. Morchenko, 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.
- [5] 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.
- [6] M.A., Willard, M. Daniil, „Nanocrystalline soft magnetic alloys two decades of progress“, *Handbook of Magnetic Materials*, 21, Elsevier, pp. 173-342, 2013.
- [7] N. A. Buznikov, 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.
- [8] V. Zhukova, J. M. Blanco, M. Ipatov, A. Zhukov, "Effect of transverse magnetic field on domain wall propagation in magnetically bistable glass-coated amorphous microwires", *Journal of Applied Physics*, Vol. 106, 113914, 2009.
- [9] J. Sun, J. Liu, D. Xing, 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.
- [10] P. Gazda, 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.
- [11] D. Garcia, V. Raposo, O. Montero, J. I. Iniguez "Influence of magnetostriction constant on magnetoimpedance–frequency dependence", *Sensors and Actuators A*, Vol. 129, pp. 227–230, 2006.
- [12] H. Yoshinobu, "Development of amorphous wire type MI sensors for automobile use", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 249, pp. 375–381, 2002.
- [13] H. Yoshinobu, M. Yamamoto, N. Hamada, A. Shimode, "Magneto-sensitive wire, magneto-impedance element and magneto-impedance sensor", US8610427B2, PATENT, 2013.
- [14] G. S. Alvarez, „Micromagnetic field sensor of soft magnetic alloys based on the magnetoimpedance effect“, Proceedings of the 2nd International Congress on Instrumentation and Applied Sciences, Puebla, Mexico, pp. 1-8, October 2011.
- [15] Б. Поповић, Електромагнетика, Грађевинска књига, Београд 1980, стр. 265.
- [16] 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.

- [17] M. H. Phan, H. X. Peng, "Giant magnetoimpedance materials: fundamentals and applications", *Progress in Materials Science*, Vol. 53, pp.323–420, 2008.
- [18] M. Vázquez, „Giant magneto-impedance in soft magnetic wires”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 226-230, pp. 693-699, 2001.
- [19] M. H. Phan, H. X. Peng, S. C. Yu, M. Vázquez, "Optimized giant magnetoimpedance effect in amorphous and nanocrystalline materials", *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, No. 8, pp. 08C505: 1-4, 2006.
- [20] T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonomura, M. Takeuchi, J. Sakata, Y. Taga, "Enhancement of giant magneto-impedance in layered film by insulator separation", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, pp. 4965-496, 1996.
- [21] D. X. Chen, J. L. Munoz, "Ac impedance and circular permeability of slab and cylinder", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, pp. 1906-1923, 1999.
- [22] N. S. Mitrović, S. N. Kane, P. V. Tyagi, 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, e792-e796, 2008.
- [23] M. Knobel, M. Vázquez, L. Kraus, "Giant magnetoimpedance", in *Handbook of Magnetic Materials*, Editor K. H. J. Buschow, Elsevier, 2003.
- [24] J. Орель, Н. Митровић, В. Павловић, „Магнетоимпедансни ефекат CoFeSiB аморфне жице“, Зборник радова 64. Конференције ЕТРАН 2020, стр. 513-517.
- [25] T. Masumoto, I. Ohnaka, A. Inoue, M. Hagiwara, "Production of Pd-Cu-Si amorphous wires by melt spinning method using rotating water", *Scripta Metallurgica*, Vol. 15, pp. 293-296, 1981.
- [26] <http://www.phys-iasi.ro/en/equipment-conventional-wires-preparation> .
- [27] J. Liu, F. Qin, D. Chen, H. Shen, H. Wang, D. Xing, M. H. Phan, J. Sun, "Combined current-modulation annealing induced enhancement of giant magnetoimpedance effect of Co-rich amorphous microwires", *Journal of Applied Physics*, Vol. 115, 17A326, 2014.
- [28] T. Uchiyama, K. Mohri, L.V. Panina, K. Furuno, "Magneto-impedance in sputtered amorphous films for micro magnetic sensor", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, pp. 3182-3184, 1995.
- [29] K. Mohri, T. Uchiyama, L. V. Panina, M. Yamamoto, 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.
- [30] 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.

ABSTRACT

This paper presents an examination of magnetoimpedance MI-effect sensitivity of CoFeSiB wires in the frequency range of 2 MHz ÷ 5 MHz. An MI-ratio with a maximum of about 45 % was obtained at 1 MHz @ $H_{\text{max}} \approx 463$ A/m. The increase in operating frequencies is followed by an increase of magnetic anisotropy field H_k . The highest sensitivity values of the MI-element of about 0.4 % / A/m were attained at frequencies of 4 MHz and 5 MHz. Consequently, the investigated CoFeSiB wires are perspective as magnetic field sensing MI-elements.

Sensitivity of CoFeSiB amorphous wire magnetoimpedance element
Jelena Oreļ, Nebojša Mitrović