

Карактеристике MnZn ферита за примене у микроелектроници

Небојша Митровић, Боривоје Недељковић, Сања Алексић

Анстракт—У раду су испитиване магнетне и термичке карактеристике торусних узорака MnZn ферита са димензијама одговарајућим за примене у микроелектроници. Регистроване су незнатне промене максималне вредности релативне магнетне пермеабилности при порасту радне фреквенције ($\mu_r \approx 480$ @ 50 Hz и $\mu_r \approx 450$ @ 10 kHz). Термомагнетним испитивањима је утврђена вредност Киријеве температуре од око $T_C \approx 240$ °C.

Кључне речи— MnZn ферити, магнетна пермеабилност, термичка својства

I. УВОД

ПРЕД савремене магнетне материјале најчешће се постављају захтеви за високим вредностима магнетне индукције засићења, пермеабилности, Киријеве температуре, тврдоће, електричне и корозионе отпорности. Дакле, са становишта синтезе и функционалних својстава материјала потребно је обезбедити што ниже вредности коерцитивности и магнетних губитака, уз истовремено задовољење проеколошких стандарда током и након експлоатације, као и повољне економске билансе. MnZn ферити су један од најчешћих магнетно меких материјала за примене у микроелектроници и користе се за бројне микроталасне компоненте (трансформаторе, претвараче, индукторе, магнетне флуиде, сензоре,...). Ови ферити нарочито привлаче пажњу због широког спектра вредности релативне магнетне пермеабилности μ_r (од 10^3 до 10^4), високе специфичне електричне отпорности ρ (што за последицу има и ниске магнетне губитке P_s), као и због одличне термичке стабилности. Поседују релативно високе вредности магнетне индукције засићења на повишеним температурама ($B_s > 0,4$ T на 100 °C), као и високе вредности Киријеве температуре од око 230 °C, након које исчезавају феромагнетна својства.

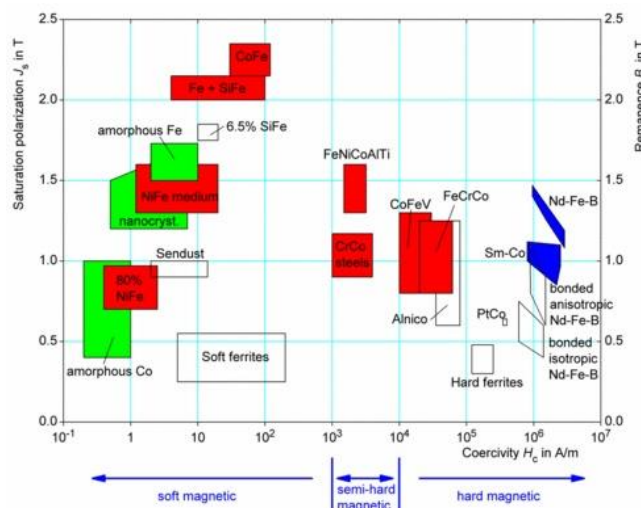
Данас се развијају бројне технологије за производњу MnZn ферита, као што су: технологија бризгања композита праха са растопљеним везивом PIM/ (Powder Injection Molding / Metal Injection Molding) MIM [1, 2], метода хемијске копреципитације [3], применом микроемулзија [4], механохемијска обрада [5] или сол-гел метода [4, 6].

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

Боривоје Недељковић – Факултет техничких наука у Чачку, Универзитета у Крагујевцу, Светог Саве 65, Србија (е-мејл: borivoje.nedeljkovic@ftn.kg.ac.rs)

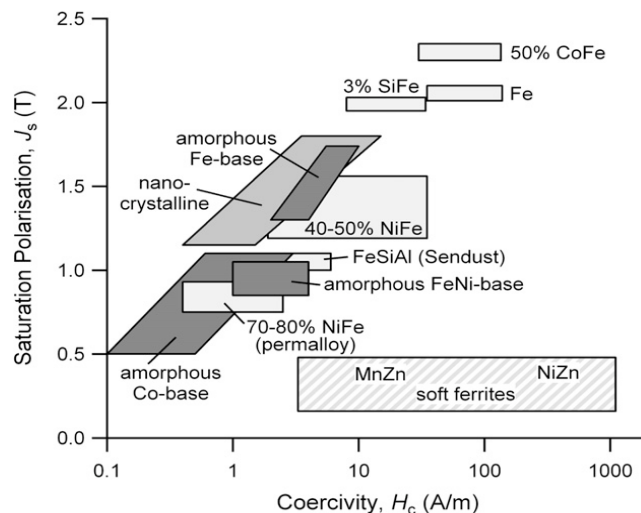
Сања Алексић – Електронски факултет Ниш, Универзитет у Нишу, Александра Медведова 14, Србија (е-мејл: sanja.aleksic@elfak.ni.ac.rs)

На слици 1. је приказана корелација магнетне поларизације засићења J_s и коерцитивног поља H_c свих класа магнетних материјала.



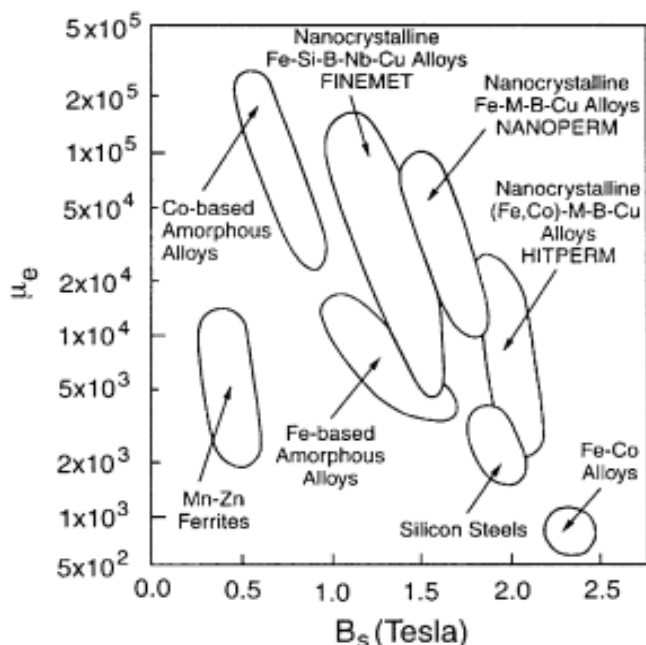
Сл. 1. Корелација магнетне поларизације засићења J_s и коерцитивног поља H_c код свих врста магнетних материјала.

Магнетно меки (MnZn и NiZn) ферити поседују коерцитивно поље H_c између 5 A/m и 1000 A/m, а магнетна индукција засићења B_s им је до око 0,5 T (слика 2.). Развој аморфних и нанокристални металних легира са повољнијим техничким карактеристикама [7, 8] је последњих деценија довео до смањења удела ферита на тржишту магнетно меких материјала, али они и даље задржавају високу другу позицију иза електричних челика.



Сл. 2. Корелација магнетне поларизације засићења J_s и коерцитивног поља H_c код магнетно меких материјала. MnZn ферити поседују повољније карактеристике у односу на NiZn ферите из исте класе.

На слици 3. је приказана веза између релативне магнетне пермеабилности и индукције засићења магнетно-меких материјала при фреквенцији $f = 1$ kHz. Слика показује већ поменуте повољније карактеристике аморфних и нанокристалних легура на бази гвожђа и кобалта, али широки опсег релативне магнетне пермеабилности MnZn ферита $\mu_r \in (10^3, 10^4)$ заједно са нижом ценом и даље утичу на широку потрошњу ферита и интересовање за њима.



Сл. 3. Веза између релативне магнетне пермеабилности и индукције засићења магнетно-меких материјала на 1 kHz [7].

У овом раду су приказана истраживања магнетних карактеристика MnZn ферита заснована на снимањима кривих магнетног хистерезиса $B-H$ у фреквентном опсегу $f \in (50 \text{ Hz}, 10 \text{ kHz})$, као и на праћењу ових кривих на повишеним температурама све до Киријеве температуре. Добијени резултати су упоређени са литературним подацима за MnZn феритне компоненте намењене примени у микроелектроници.

II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

У овој студији приказани су испитивања торусних узорака MnZn ферита са димензијама одговарајућим за примену у микроелектроници (слика 4., унутрашњи пречник 7 mm, спољашњи пречник 3,5 mm, висина 2 mm). Магнетна својства – криве магнетног хистерезиса су испитивана уређајем Brockhaus Tester MPG 100 D при различитим побудама магнетног поља и на радним фреквенцијама од 50 Hz до 10 kHz.

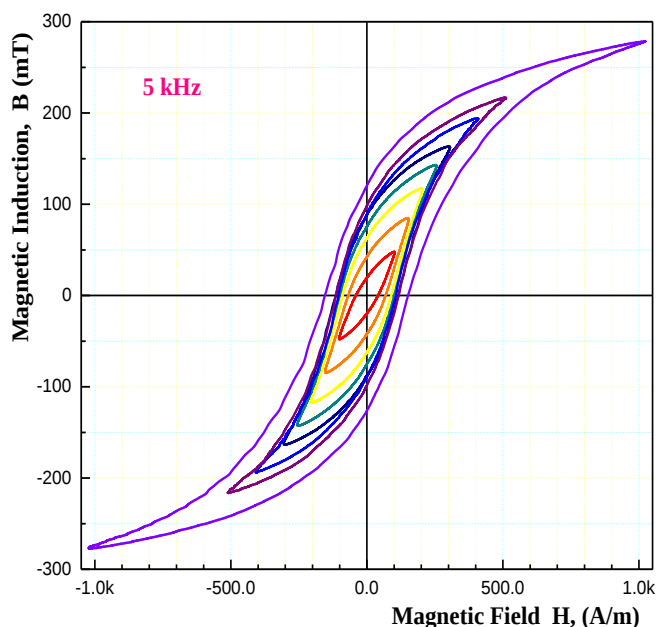
Ради испитивања термичких својстава торусни узорци су смештени у пећ са инертном атмосфером, при чему је пораст температуре од собне до наредних погодних изабраних пролазних температура (све до евидентиране Киријеве температуре) вођен са константном брзином грејања од око 2 K/мин. Током експеримента задржавање на пролазним температурама је трајало око 10 минута.



Сл. 4. Хистерезиограф Brockhaus Tester MPG 100 D за снимање $B-H$ хистерезисних кривих на узорцима MnZn ферита у облика торуса.

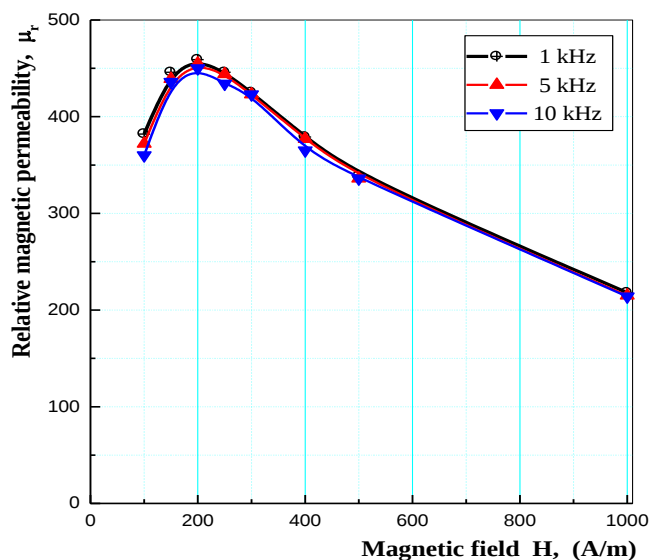
III. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

На слици 5. су приказане фамилије кривих магнетног хистерезиса $B-H$ добијене при константној фреквенцији $f = 5$ MHz и при постепеном повећању побуде магнетног поља H_{max} (највећа побуда од 1 kA/m).



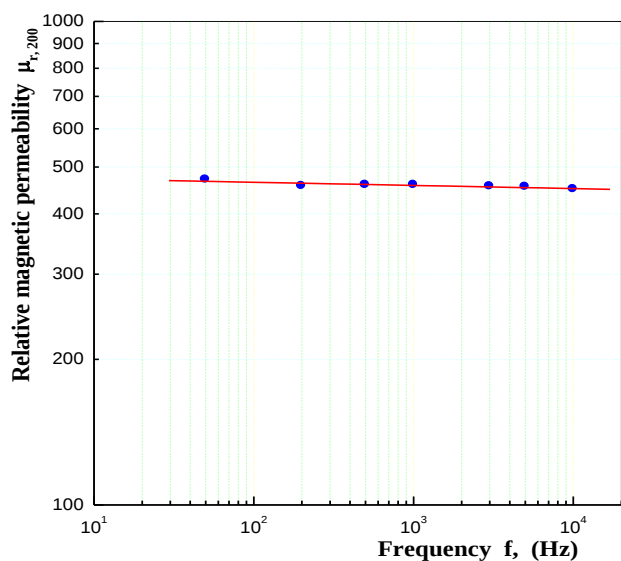
Сл. 5. Фамилије кривих магнетног хистерезиса, при константној фреквенцији $f = 5$ MHz и при постепеном повећању побуде магнетног поља H_{max} до највеће криве добијене при побуди од 1 kA/m.

Све криве магнетног хистерезиса поседују класичан R-облик и омогућавају формирање криве зависности релативне магнетне пермеабилности од магнетног поља H . Ове зависности су приказане на слици 6., при три радне фреквенције 1 kHz, 5 kHz и 10 kHz. При повећању радних фреквенција уочено је веома мало смањење добијених вредности релативне магнетне пермеабилности од магнетног поља.



Сл. 6. Криве зависности релативне магнетне пермеабилности од магнетног поља H при фреквенцијама 1 kHz, 5 kHz и 10 kHz.

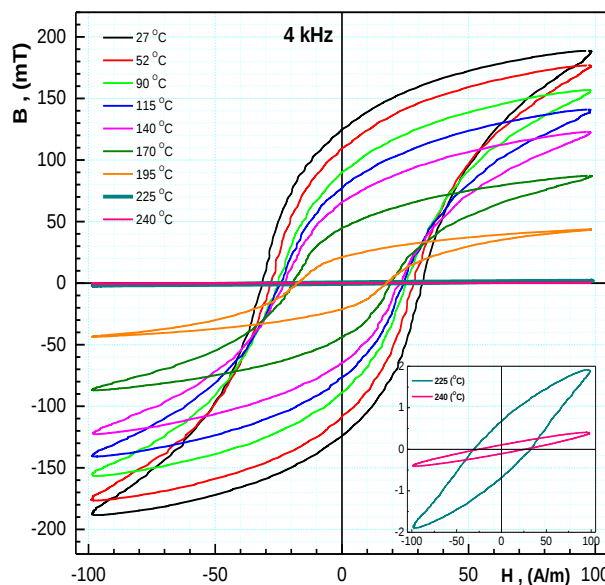
Слични експерименти су спроведени на фреквенцијама од 50 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 5 kHz и 10 kHz, ради процене утицаја радне фреквенције на релативну магнетну пермеабилност у целом испитиваном фреквентном опсегу.



Сл. 7. Зависност релативне магнетне пермеабилности од фреквенције $f \in (50 \text{ Hz}, 10 \text{ kHz})$ ($@ H \approx 200 \text{ A/m}$).

Веома стабилне вредности максималне магнетне пермеабилности су добијене при вредностима магнетног поља од 200 A/m, и то при 50 Hz ($\mu_r \approx 480$) док је на 10 kHz ($\mu_r \approx 450$), што је укупно смањење од око свега 6% (слика 7.).

На слици 8. су приказане фамилије кривих магнетног хистерезиса $B-H$ добијене при константној фреквенцији $f = 4 \text{ MHz}$ ($@ H_{\text{max}} \approx 100 \text{ A/m}$) и при постепеном повећању радне температуре све до достизања Киријеве температуре $T_C \approx 240 \text{ }^\circ\text{C}$.



Сл. 8. Фамилије кривих магнетног хистерезиса, при константној фреквенцији $f = 4 \text{ MHz}$ и при постепеном повећању радне температуре све до достизања Киријеве температуре $T_C \approx 240 \text{ }^\circ\text{C}$.

ЗАХВАЛНИЦА

Рад је делимично финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије (евиденциони број пројекта 451-03-47/2023-14/200132 Факултета техничких наука у Чачку, Универзитета у Крагујевцу).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] P. Setasuwon, A. Bunchavimonchet, S. Danchaivijit, "The effects of binder components in wax/oil systems for metal injection molding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, pp. 94–100, 2008.
- [2] B. Zlatkov, N. Mitrović, M-V. Nikolić, A. Maričić, H. Danninger, O. Aleksić, E. Halwax, "Properties of MnZn ferrites prepared by powder injection molding technology", *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-state Materials*, Vol. 175, pp. 217-222, 2010.
- [3] P. Thakur, R. Sharma, M. Kumar, S.C. Katyal, P.B. Barman, V. Sharma, P. Sharma, "Structural, morphological, magnetic and optical study of co-precipitated Nd 3+ doped Mn-Zn ferrite nanoparticles", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 479, pp. 317–325, 2019.
- [4] P. Thakur, D. Chahar, S. Taneja, N. Bhalla, A. Thakur, "A review on MnZn ferrites: Synthesis, characterization and applications", *Ceramics International*, Vol. 46, pp. 15740-15763, 2020.
- [5] M. Arana, P. G. Bercoff, S. E. Jacobo, P. M. Zélis, G. A. Pasquevich, "Mechanochemical synthesis of MnZn ferrite nanoparticles suitable for biocompatible ferrofluids", *Ceramics International*, Vol. 42, pp. 1545-1551, 2016.
- [6] J. Azadmanjiri, "Preparation of Mn-Zn ferrite nanoparticles from chemical sol-gel combustion method and the magnetic properties after sintering", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 353, pp. 4170-4173, 2007.
- [7] M. E. McHenry, M. A. Willard, D. E. Laughlin, "Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets", *Progress in Materials Science*, Vol. 44 pp. 291-433, 1999.

- [8] 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.

ABSTRACT

This paper presents the examination of MnZn ferrites, one of the most common soft magnetic materials for application in microelectronics microwave components (transformers, transducers, inductors, magnetic fluids, sensors). MnZn ferrites attracted attention due to a wide range of relative magnetic permeability values, high resistivity (consequently low magnetic losses) as well as high thermal stability. In this study toroidal samples of MnZn ferrites were investigated by hysteresis graphs (B-H curve at level of magnetic excitation up to 1 kA/m and at different frequencies from 5 Hz to 10 kHz).

Very stable maximum relative magnetic permeability was observed for a magnetic field of 200 A/m in the frequency range from 50 Hz ($\mu_r \approx 480$) to 10 kHz ($\mu_r \approx 450$). Thermomagnetic measurements of magnetic hysteresis curves exhibit a relatively high Curie temperature of about $T_C \approx 240$ °C. The results obtained were compared with the catalogue data for other MnZn ferrite components for applications in microelectronics.

Characterisation of MnZn ferrite for microelectronics applications

Nebojša Mitrović, Borivoje Nedeljković, Sanja Aleksić