



بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_xFe_{2-x}O_4$

فرشته اکبری^۱، محمد نیایی^{۲*}، محمد رضا حنطه زاده^۱

۱- گروه فیزیک، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، اهواز، ایران

(دریافت مقاله: ۹۳/۲/۱۰، نسخه نهایی: ۹۳/۴/۱۰)

چکیده: در این پژوهش نانو ذرات فریت نیکل روی جاننشانی شده با مس، با ترکیب $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_xFe_{2-x}O_4$ با $x = (0, 0.05, 0.1, 0.12, 0.15, 0.18, 0.2)$ به روش سل ژل و با استفاده از پلی وینیل الکل (PVA) تهیه شد و خصوصیات ساختاری و مغناطیسی نمونه‌ها به وسیله آنالیزهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از پراش پرتو ایکس (XRD) نشان می‌دهد که پارامتر ثابت شبکه و میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها با افزایش مس در سیستم فریت آمیخته‌ی نیکل روی مس افزایش پیدا می‌کند. افزایش اندازه‌ی ذرات به کاهش دمای سطحی بلور نسبت داده می‌شود. میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها در گستره‌ی ۱۳-۲۶ nm برآورد شد. با توجه به نتایج طیف FT-IR، جابجایی باندها ۷۱ به سمت عددهای موج کمتر ممکن است به دلیل افزایش ابعاد سلول واحد باشد. تأثیر تراکم یون مس بر مغناطش اشباع (M_s) و نیروی وادارندگی (H_c) نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد مغناطش اشباع تا $x \leq 0.1$ کاهش و پس از آن با افزایش جای‌نشانی به صورت خطی افزایش یابد. تغییرات H_c بر اساس جای‌نشانی یون مس در ترکیب، تأثیر سطح و رشد ذرات توضیح داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سل ژل؛ فریت نیکل روی مس؛ مغناطش سنج ارتعاشی؛ میکروسکوپ الکترونی عبوری.

مقدمه

جایگزین کردن آن در ترکیب $NiZnCu$ باعث افزایش نفوذپذیری مغناطیسی، کاهش دمای سنتز و افزایش چگالی نمونه در دمای پخت پایین می‌شود [۳،۲]. فریت نیکل روی مس به دلیل دارا بودن مقاومت ویژه و نفوذپذیری مغناطیسی بالا و همچنین پایداری در بسامدهای بالاتر از ۱MHz، کاربرد گسترده‌ای در تولید تراشه‌های القاگر چند لایه‌ای (MLCI) یافته است؛ همچنین برای کاربرد در بسامدهای بالا، فریت‌ها باید تلفات مغناطیسی اندک داشته باشند. خصوصیات مغناطیسی فریت $NiZnCu$ در بسامدهای بالا، از فریت $MnZn$ بهتر و دمای سنتز آن در مقایسه با فریت $NiZn$ کمتر است [۵،۴]. اثر جای‌نشانی‌های مختلف Cu در فریت $NiZn$ ، در بررسی‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفت.

فریت $NiZnCu$ از نوع فریت‌های اسپینلی نرم است؛ یاخته‌ی یک‌ه‌ی ساختار اسپینلی از هشت یکای فرمولی MFe_2O_4 تشکیل می‌شود و دارای فرمول کلی $M_8Fe_{16}O_{32}$ است. چارچوب اسپینلی را یون‌های اکسیژن می‌سازند. در این ساختار یون‌های اکسیژن یک شبکه‌ی FCC به وجود آورده و کاتیون‌های M و Fe به صورت بین‌نشینی در دو زیرشبکه‌ی چهار وجهی (که آن را جایگاه A می‌نامند) و هشت وجهی (که آن را جایگاه B می‌نامند) قرار می‌گیرند [۲،۱]. یکی از مهمترین خصوصیت فریت‌ها، قابلیت جاننشانی‌های مختلف در آن‌ها است که می‌تواند سبب بهبود خواصشان شود. در فریت $NiZn$ ، امکان جاننشانی‌های مختلف برای بهتر کردن خصوصیات ماده‌ی تولید شده وجود دارد؛ یکی از مواد برگزیده مس است که

*نویسنده مسئول، تلفن: ۸۲-۴۴۸۶۵۱۷۹ (۰۲۱)، نمابر: ۴۴۸۶۷۱۴۱ (۰۲۱)، پست الکترونیکی: md.Niyaiyar@gmail.com

ژل باعث گسترش همگنی کاتیون‌های فلزی در زمینه‌ی آلی خواهد شد [۹]. سل به دست آمده به مدت ۲۴ ساعت در دمای 90°C قرار داده شد تا کاملاً خشک شود. پس از آن فرآیند گرمادهی روی پودر به دست آمده در دمای 600°C با آهنگ دمایی $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ در کوره‌ی الکتریکی و به مدت ۲ ساعت انجام گرفت.

الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Seifert 3003 به دست آمد. الگوهای (FT-IR) نمونه‌ها در گستره‌ی عدد موج $4000-400\text{cm}^{-1}$ در دمای اتاق و با استفاده از Perkin Elmer BXII مدل ۱۸۵۲۵۶ به دست آمد. تصاویر SEM به‌وسیله‌ی یک میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت شرکت KYKY مدل EM3200 تهیه شدند. تصاویر TEM با دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری ساخت شرکت PHILIPS مدل EM208 تهیه شد. منحنی‌های پسماند مغناطیسی نمونه‌ها به وسیله دستگاه VSM در میدان 9kOe ، ساخت شرکت مغناطیس دانش پژوه کاشان مورد بررسی قرار گرفتند.

بحث و بررسی

الگوهای پراش پرتو ایکس نانو ذرات فریت نیکل روی مس $\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Cu}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ با مقادیر جاننشانی یاد شده، در شکل ۱ آورده شد که نشان دهنده‌ی تشکیل ساختار مکعبی اسپینلی همخوانی با کارت استاندارد شماره‌ی (۰۰۴۸-۰۴۸۹) (JCPDS) است. میانگین اندازه‌ی بلورکها با استفاده از رابطه‌ی شرر $D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}$ محاسبه شد. در این رابطه D میانگین اندازه‌ی بلورکها بر حسب نانومتر، λ طول موج پرتو ایکس (برابر با 0.15406 نانومتر)، θ زاویه براگ، k ثابتی است که به ریخت شناسی بلورک وابسته است (از 0.89 تا 1.39 متغیر است) که در اینجا 0.9 قرار داده شد، β پهنای قله در نیم شدت بیشینه (بر حسب رادیان) است [۴۱]. تغییرات ثابت شبکه و میانگین اندازه‌ی بلورکها در جدول ۱ آورده شده‌اند. چنانکه مشاهده می‌شود با جاننشانی یون مس در ترکیب، به دلیل بزرگتر بودن شعاع یونی مس (0.87 \AA) در مقایسه با شعاع یونی آهن (0.67 \AA) [۶] ثابت شبکه افزایش می‌یابد. با افزایش میزان آرایش یون مس، میانگین اندازه‌ی بلورکها از 13 nm تا 26 nm افزایش یافته است. از آنجا که تشکیل فاز فریت مس با آنتالپی $(\Delta H_0 = +5.05)$ نسبت به فریت‌های نیکل، روی و آهن به ترتیب با آنتالپی‌های

نانو ذرات فریت $\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Cu}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ توسط Kim و همکارانش [۶] تهیه شد و تأثیر جاننشانی یون مس در فریت نیکل روی به روش بیناب‌سنجی موسبائر مورد بررسی گرفت؛ Shifing و همکارانش [۷] بررسی‌هایی در مورد تجزیه‌ی گرمایی نانو ذرات فریت $\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_{1.9}\text{O}_4$ انجام دادند و تأثیر دمای پخت بر اندازه‌ی ذرات و خصوصیات مغناطیسی نانو ذرات را مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌های Tawfik و همکارش بر روی ترکیب $\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Cu}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ نشان داد، از آنجا که ظرفیت یون مس کمتر از یون آهن است تهی‌جای‌های آنیونی در ساختار شبکه به وجود می‌آیند [۸] که خصوصیات ساختاری و مغناطیسی ترکیب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این ترکیب یون‌های Cu^{2+} ، با توجه به تمایل شدید برای قرار گرفتن در جایگاه هشت وجهی، جاننشینی یون‌های Fe^{3+} در این جایگاه می‌شوند؛ وقتی یک یون با ظرفیت متفاوت وارد ساختار شبکه شد احتمال به وجود آمدن تهی‌جا، به منظور خنثی ماندن ماده از نظر بار الکتریکی وجود دارد [۸]. به منظور بررسی خصوصیات ساختاری و مغناطیسی نانو ذرات فریت $\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Cu}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ ، نمونه‌هایی با مقادیر مختلف یون مس به روش سل-ژل تهیه شدند.

روش کار

نانو ذرات فریت نیکل روی مس با ترکیب $\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Cu}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$ و با مقادیر جاننشانی $x = (0, 0.05, 0.1, 0.12, 0.15, 0.18, 0.2)$ به روش سل ژل تهیه شدند. برای تهیه‌ی محلول نیم مولار مواد اولیه شامل نیتترات آهن $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ، نیتترات نیکل $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، نیتترات مس $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ، روی $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ و پلی وینیل الکل (PVA) با فرمول شیمیایی $(\text{C}_n\text{H}_4\text{O})_n$ بنابر روابط عنصرسنجی به دقت وزن و در 70 ml آب یون زدایی شده حل شدند. همه‌ی مواد محصول شرکت مرک با خلوص 99.99% درصد بودند. در کلیه‌ی نمونه‌ها نسبت مولی واحد مونومر پلی وینیل الکل نسبت به مجموع مولی نیتترات فلزات به نسبت $1:2$ انتخاب شدند. محلول با یک همزن مغناطیسی در دمای 70°C همزده شد تا مواد حل شوند و واکنش‌های لازم انجام گیرد. نیتترات‌ها باعث آزاد شدن یون‌ها در محلول می‌شوند؛ لیگاند‌های قطبی هیدروکسیل در زنجیره‌ی پلی وینیل الکل می‌توانند یون‌های فلزی موجود در محلول را جذب و از کنار هم قرار گرفتن آن‌ها و در نتیجه رشد ذرات جلوگیری کنند. از طرفی افزایش هم زدن در مرحله‌ی تشکیل

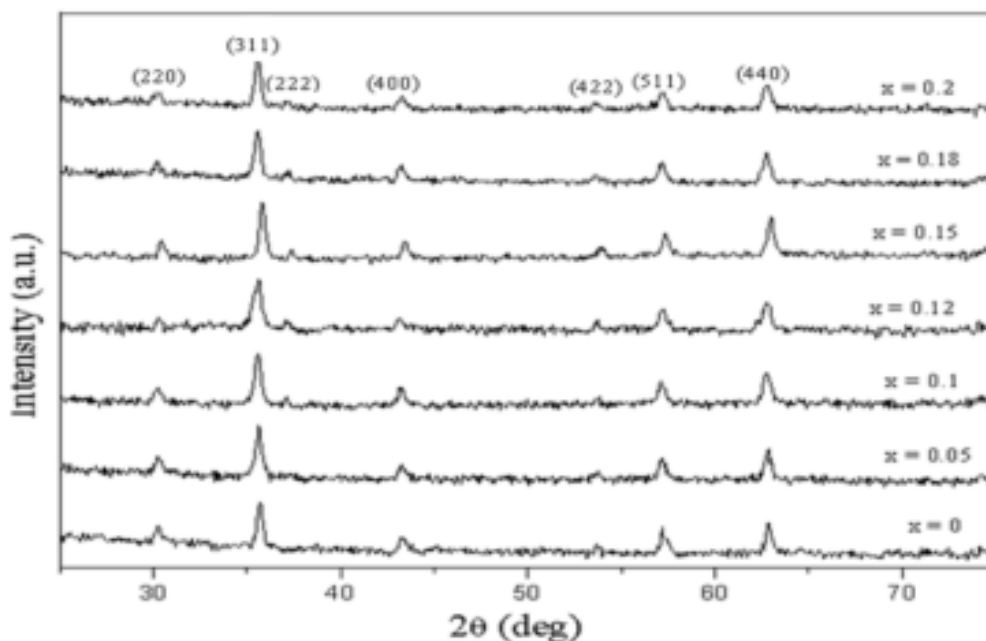
نیروی پیوند بین یون‌های مغناطیسی واقع در زیرشبکه‌هاست. با توجه به تغییرات عدد موج جایگاه چهار وجهی در جدول ۱، افزایش تراکم یون مس در ترکیب باعث جابه‌جایی اعداد موج به سمت بسامدهای کمتر می‌شود. از آنجا که تغییرات عدد موج نسبت عکس با طول پیوند دارد با افزایش سلول یکه و طول پیوند $Fe^{3+}-O^{2-}$ در جایگاه چهار وجهی، جابه‌جایی 71 به سمت اعداد موج کمتر قابل توجه است [۱۴].

به منظور بررسی سطح و بررسی اثر جانمایی یون مس بر ریخت شناسی نانو ذرات، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. در شکل ۳ تصاویر مربوط به نانو ذرات فریت نیکل روی و فریت نیکل روی مس نشان داده شده‌اند. چنانکه مشاهده می‌شود با جانمایی یون مس در ترکیب، شکل ذرات از حالت کروی خارج شده و اندازه‌ی ذرات نیز رشد می‌کند. شکل‌گیری کلوخه در نانو ذرات به دلیل میدان مغناطیسی و واکنش پذیری بالا بین نانو ذرات است [۱۵].

به منظور بررسی اندازه و شکل ذرات و نیز چگونگی توزیع اندازه‌ی ذرات از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری شکل ۴ استفاده شد. با توجه به تصاویر، اندازه و شکل نانو ذرات تقریباً یکسان و پراکندگی در توزیع اندازه‌ی نانو ذرات نسبتاً کم است. میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها با افزایش تراکم یون مس در ترکیب افزایش یافته و با مقادیر به دست آمده از فرمول شرر همخوان است.

$(\Delta H_0 = -1,22)$ ، $(\Delta H_0 = -2,67)$ و $(\Delta H_0 = -5,1)$ گرماگیرتر است [۱۰]. با افزایش تراکم یون مس در ترکیب دمای سطحی بلور کاهش پیدا می‌کند در نتیجه انباشت ملکولی در سطح بلور افزایش یافته و باعث رشد میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها می‌شود [۱۱].

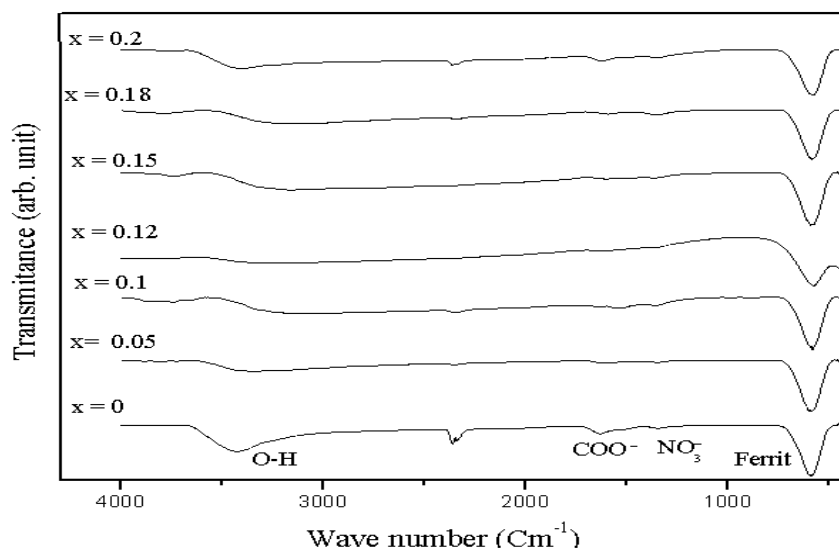
طیف‌های FT-IR نمونه‌ها در شکل ۲، به منظور بررسی پیوندهای شیمیایی و تعیین نوع گروه‌های عاملی موجود در ترکیب، مورد بررسی قرار گرفت. نوارهای مشخص در عدد موج 1380 cm^{-1} متناظر با مد نوسانی کششی و خمشی گروه نیترات‌ها NO_3^- در عدد موج 1621 cm^{-1} مربوط به نوسان‌های گروه کربوکسیل (COO^-) و در اعداد موج 3422 cm^{-1} و 2400 cm^{-1} مربوط به پیوند کششی ملکول آب و نوسانات عوامل هیدروکسیل ($O-H$) می‌باشند [۱۲، ۷]. در فریت‌های اسپینلی دو منطقه‌ی جذب مربوط به ارتعاشات ذاتی فلزات در جایگاه چهاروجهی ($M_{tetra}-O$) و جایگاه هشتوجهی ($M_{octa}-O$) وجود دارند که به ترتیب با 71 و 72 مشخص می‌شوند [۱۳] و در گستره‌ی بسامدی $500-600\text{ cm}^{-1}$ و $400-500\text{ cm}^{-1}$ قرار می‌گیرند. در کلیه‌ی نمونه‌های سنتز شده، مد ارتعاشی کششی پیوند اکسیژن با فلز مربوط به ترکیب‌های موجود در ناحیه‌ی چهاروجهی در $570-590\text{ cm}^{-1}$ قابل مشاهده است. نوار جذب مربوط به ارتعاش‌های جایگاه هشتوجهی در این طیف‌ها به دلیل محدودیت دستگاه قابل مشاهده نیست. تغییرات عدد موج جایگاه‌ها وابسته به جرم کاتیونی، فاصله‌ی کاتیون اکسیژن و



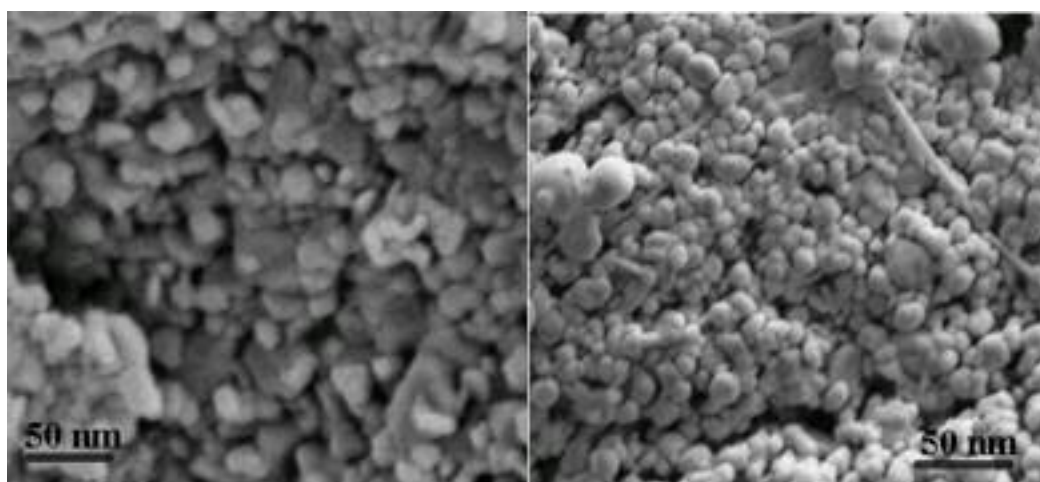
شکل ۱ طیف‌های پراش پرتو ایکس برای نانو ذرات $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_xFe_{2-x}O_4$

جدول ۱ اطلاعات میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها (D)، ثابت شبکه (a) و تغییرات عدد موج جایگاه چهار وجهی (v_1) برای نانو ذرات فریت $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_xFe_{2-x}O_4$ با مقادیر جانشین شده مختلف.

مقدار جانشینی x	میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها (nm)	ثابت شبکه (Å)	تغییرات عدد موج جایگاه چهار وجهی (v_1) (cm^{-1})
۰	۱۳	۸,۳۵۱	۵۸۹,۸۵
۰,۰۵	۱۴	۸,۳۵۴	۵۸۳,۱۳
۰,۱	۱۶	۸,۳۵۶	۵۸۲,۳۱
۰,۱۲	۱۸	۸,۳۵۷	۵۸۱,۲۲
۰,۱۵	۲۱	۸,۳۵۹	۵۷۶,۱۶
۰,۱۸	۲۴	۸,۳۶۳	۵۷۵
۰,۲	۲۶	۸,۳۶۵	۵۷۳



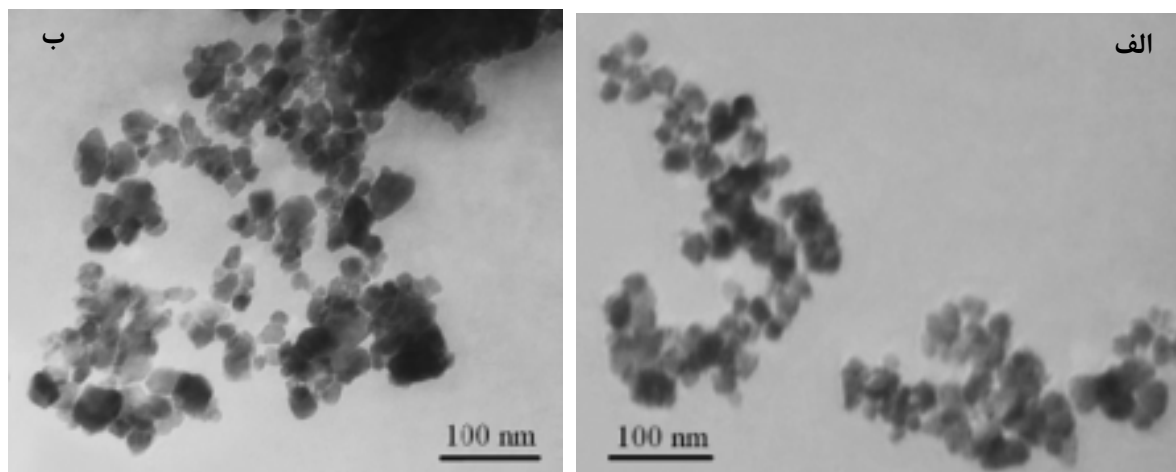
شکل ۲ طیف‌های فرسرخ نانو ذرات فریت $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_xFe_{2-x}O_4$.



(ب)

(الف)

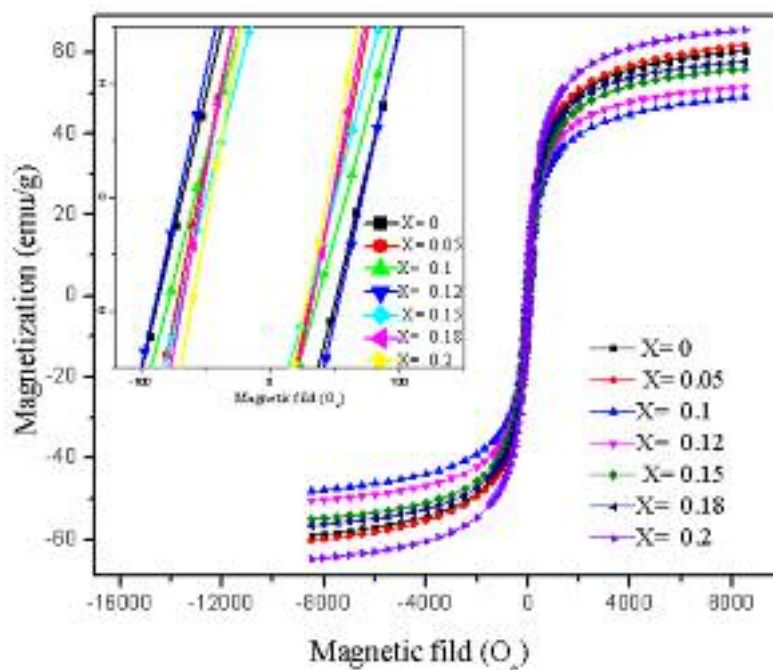
شکل ۳ تصاویر SEM: (الف) $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Fe_2O_4$ ، (ب) $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_{0.18}Fe_{1.9}O_4$.



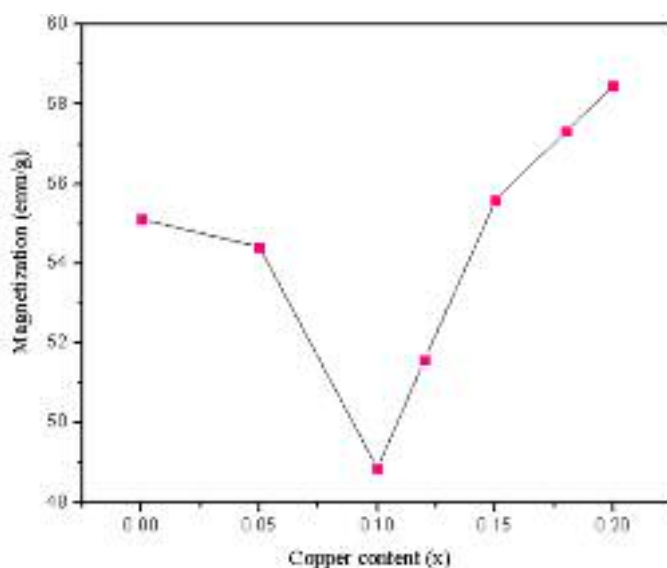
شکل ۴ تصاویر TEM (الف) $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_{0.1}Fe_{1.9}O_4$ و (ب) $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_{0.18}Fe_{1.82}O_4$.

گشتاورهای مغناطیسی یون‌ها در هر زیرشبکه به صورت موازی و نسبت به هم به صورت پادموازی جهتگیری می‌کنند [۱۵]. بررسی‌ها نشان داد که در فریت نیکل روی مس، یون‌های Zn^{2+} تمایل به قرار گرفتن در جایگاه چهاروجهی دارند در حالی که یون‌های Ni^{2+} و Cu^{2+} در جایگاه هشت‌وجهی قرار می‌گیرند، یون‌های Fe^{3+} در هر دو جایگاه وجود دارند به این ترتیب توزیع کاتیونی در فریت نیکل روی مس به صورت زیر نوشته می‌شود [۶].

شکل ۵ حلقه‌های پسماند مغناطیسی نانو ذرات فریت $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_xFe_{2-x}O_4$ را نشان می‌دهد. تغییرات مغناطش اشباع نمونه‌ها (M_s)، نیروی وادارندگی (H_c) و غیره از این نمودارها قابل استخراج است. چنانکه در شکل ۶ دیده می‌شود تغییرات مغناطش اشباع در نمونه‌ها را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد؛ مغناطش اشباع برای $x \leq 0.1$ کاهش و با افزایش یون مس در ترکیب برای $x > 0.1$ افزایش می‌یابد. در ساختار فریت‌های اسپینلی، کاتیون‌ها در دو زیرشبکه‌ی مختلف چهاروجهی (A) و هشت‌وجهی [B] قرار گرفته‌اند؛



شکل ۵ حلقه‌های پسماند مغناطیسی نانو ذرات فریت $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_xFe_{2-x}O_4$.



شکل ۶ تغییرات مغناطش اشباع (Ms) با افزایش تراکم یون مس در نانو ذرات فریت $\text{Ni}_{0.65}\text{Zn}_{0.35}\text{Cu}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_4$.

وجود می‌آید [۱۵،۵]. بنابراین مغناطش اشباع کل که از اختلاف مغناطش اشباع جایگاه هشت وجهی M_B و چهار وجهی M_A ناشی می‌شود [۱۸]، با کاهش مغناطش اشباع در جایگاه A افزایش می‌یابد و در نمونه‌ی $x=0.2$ به بیشترین مقدار خود (۵۸٫۴ emu/g) می‌رسد. از طرفی افزایش M_s ممکن است به علت رشد میانگین اندازه‌ی بلورکها باشد. چنانکه گفته شد جانمایی یون مس در ترکیب باعث رشد نانو ذرات می‌شود در نتیجه بی‌نظمی‌های اسپینی و آشفستگی در سطح نانو ذرات کاهش می‌یابد. کاهش حجم لایه‌ی مرده در نانو ذرات منجر به هم جهت شدن اسپین هسته در جهت میدان مغناطیسی اعمال شده می‌شود که در نتیجه مغناطش اشباع افزایش می‌یابد [۱۹،۱۴].

تغییرات نیروی وادارندگی (H_c) در جدول ۲ آورده شده‌اند. داده‌ها نشان می‌دهند که نیروی وادارندگی بر حسب میزان جانمایی مس، رفتار یکنواختی ندارد. نیروی وادارندگی تحت تأثیر عوامل مختلفی مثل نقص‌ها، تأثیرات سطح، فشارها، اتم‌های غیر مغناطیسی و غیره در ماده قرار می‌گیرد [۲۰]. از طرفی جانمایی یون مس در ترکیب باعث کاهش تقارن بلوری در شبکه فریت و افزایش ناهمسانگردی مغناطیسی در نمونه‌ها می‌شود [۲۱] که در نهایت منجر به افزایش نیروی وادارندگی مغناطیسی در نمونه‌ها خواهد شد. از طرف دیگر رشد ذرات و نیز جانمایی یون کمتر مغناطیسی مس به جای یون آهن در ترکیب باعث کاهش برهم‌کنش بین ذرات مغناطیسی و کاهش مقاومت دیواره‌ی حوزه‌ها می‌شود بنابراین نیروی وادارندگی کاهش می‌یابد [۲۳،۲۲].

در این سیستم یون‌های Cu^{2+} با گشتاور مغناطیسی (μ_B) (۱٫۳) جانشین یون‌های Fe^{3+} با گشتاور مغناطیسی ($5\mu_B$) [۱۶] در جایگاه B می‌شوند. بنابراین گشتاورهای مغناطیسی در جایگاه B و نیز برهم‌کنش ابرتبادلی بین دو زیر شبکه‌ی A و B کاهش و در نتیجه مغناطش اشباع کل کاهش می‌یابد و در نمونه‌ی $x=0.1$ به کمترین مقدار خود (۴۸٫۸۵ emu/g) می‌رسد. از طرفی به منظور حفظ خنثایی، تبادل الکترون بین یون‌های Fe^{3+} و Cu^{2+} ایجاد می‌شود که خود باعث به وجود آمدن تهی‌جاها یونونی در شبکه می‌شود [۸]. این تهی‌جاها باعث کاهش در برهم‌کنش ابرتبادلی و در نتیجه کاهش در مغناطش اشباع می‌شود.

چنانکه در شکل ۶ مشاهده می‌شود مغناطش اشباع کل برای نمونه‌های $x > 0.1$ ، افزایش می‌یابد. می‌دانیم در فریت‌ها جانمایی یک یون نامغناطیسی (یا کمتر مغناطیسی) در یک جایگاه، باعث کج شدگی اسپینی در جایگاه مقابل می‌شود [۱۷]. با توجه به کم شدن گشتاورهای مغناطیسی جایگاه هشت وجهی در اثر افزایش تراکم یون مس و کاهش یون‌های آهن در آن برهم‌کنش بین یون‌های مغناطیسی در جایگاه B- و نیز برهم‌کنش ابرتبادلی بین جایگاه‌ها (A-B) کاهش پیدا می‌کند؛ در نتیجه جایگاه B قادر نیست تمام گشتاورهای مغناطیسی جایگاه A را نسبت به خودش به صورت پادماوازی نگه دارد به این ترتیب گشتاورهای مغناطیسی از حالت موازی نسبت به هم خارج شده و کج شدگی اسپینی در جایگاه A به

جدول ۲ تغییرات مغناطش اشباع و نیروی وادارندگی برای نانو ذرات فریت $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_xFe_{2-x}O_4$.

مقادیر جاینشانی x	مغناطش اشباع Ms (emu/g)	وادارندگی مغناطیسی Hc (Oe)
۰	۵۵,۱۱	۸۱,۰۷
۰,۰۵	۵۴,۲۰	۵۱,۲۸
۰,۱	۴۸,۸۵	۶۵,۰۷
۰,۱۲	۵۱,۵۸	۷۶,۵۵
۰,۱۵	۵۵,۵۷	۵۷,۶۷
۰,۱۸	۵۷,۳۳	۴۹,۴۴
۰,۲	۵۸,۴	۴۷,۴۱

برداشت

در این پژوهش نانو ذرات فریت نیکل روی مس به روش سل ژل و در حضور پلی وینیل الکل ساخته شد. با استفاده از اطلاعات به دست آمده از طیف پراش پرتو ایکس (XRD) و نیز طیف (FT-IR)، تشکیل و تکفاز بودن نمونه‌ها تأیید شد. به دلیل جاننشانی یون مس با شعاع یونی بزرگ‌تر نسبت به یون آهن، ثابت شبکه افزایش می‌یابد. افزایش مشاهده شده در اندازه‌ی نانو ذرات را می‌توان به گرماگیر بودن آنتالپی تشکیل فریت مس که موجب کاهش دمای سطحی بلور و رشد ذرات می‌شود، نسبت داد. جابه‌جایی عدد موج نمونه‌ها به سمت بسامدهای کمتر در ترکیب می‌تواند به علت افزایش ابعاد سلول واحد در نمونه‌ها باشد. تصاویر SEM و TEM نشان می‌دهند که ذرات در گستره‌ی نانومتری قرار گرفته‌اند. نتایج به دست آمده از VSM نشان می‌دهد که رفتار مغناطیسی نانو ذرات $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_xFe_{2-x}O_4$ به میزان یون مس در ترکیب بستگی دارد. به منظور خنثی ماندن ترکیب از لحاظ بار الکتریکی، بین یون‌های Fe^{3+} و Cu^{2+} تبادل الکترون می‌شود. مغناطش اشباع با جاننشانی مس برای مقادیر $x \leq 0.1$ کاهش و به ازای مقادیر $x > 0.1$ افزایش می‌یابد. این تغییرات در اثر قرار گرفتن یون مس در جایگاه هشت‌وجهی و برحسب برهم‌کنش-های تبدالی بین جایگاه‌ها، به وجود آمدن تهی‌جا در ساختار شبکه، کج‌شدگی اسپینی و نیز کاهش اثرهای سطحی که در نتیجه‌ی رشد ذرات به وجود می‌آید، توضیح داده می‌شود.

تغییرات نیروی وادارندگی براساس جاننشانی یون مس در ترکیب، افزایش ناهمسانگردی و نیز کاهش مقاومت دیواره‌ی حوزه‌ها در اثر رشد اندازه‌ی ذرات توضیح داده می‌شود.

مراجع

- [1] منوچهری س، عمیقان ج، مظفری م، یوسفی م.ح، "تهیه‌ی نانو ذرات فریت کبالت-روی و بررسی تغییرات دمای بستن با جاننشانی روی به جای کبالت در میدان مغناطیسی متناوب با بسامدهای گوناگون"، مجله‌ی بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره اول، (۱۳۹۱) ص ۱۷۹-۱۸۶.
- [2] Ajmal M., "Fabrication and Physical Characterization of $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ and $Cu_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ Ferrites, Thermal Physics Laboratory Department of Physics Quaid-i-Azam University Islamabad, Pakistan, (2009) 4-12.
- [3] Rezlescu E, Sachelarie. L, Popa. P. D, Rezlescu N, "Effect of Substitution of Divalent Ions on the Electrical and Magnetic Properties of Ni-Zn-Me Ferrites", IEEE Transactions on magnetics 36 (2000) 3962-3968.
- [4] Slatineanu T., Iordan A., Palamaru M., Caltun O., Gafton V., Leontie L., "Synthesis and characterization of nanocrystalline Zn ferrites substituted with Ni", Materials Research Bulletin. 46(2011)1455-1460.
- [5] Xiang J., Shen X., Song F., Liu M., "One-dimensional NiCuZn ferrite nanostructures: Fabrication, structure, and magnetic properties",

- [15] Ahmed T.T., Rahman I.Z., Rahman M.A., "Study on the properties of the copper substituted NiZn ferrites", Journal of Materials Processing Technology. 153-154(2004)797-803.
- [16] Gabal M.A, Al Angari Y.M, Al-Juaid S.S., "A study on Cu substituted Ni-Cu-Zn ferrites synthesized using egg-white", Journal of Alloys and Compounds 492 (2010) 411-415.
- [17] Dionne Gerald F., "Molecular Field Coefficients of Substituted Yttrium Iron Garnets", J. Appl. Phys. 41 (1970) 4874.
- [18] Mukesh C., Dimri Verma A., Subhash C., Kashyap Dubea D.C., Thakur O.P., Chandra Prakash, "Structural, dielectric and magnetic properties of NiCuZn ferrite grown by citrate precursor method", Materials Science and Engineering B. 133 (2006) 42-48.
- [19] Choodamani C., Nagabhushana G.P., Rudraswamy B., Chandrappa G.T., "Thermal effect on magnetic properties of Mg-Zn ferrite nanoparticles", Materials Letters 116 (2014) 227-230.
- [20] Gabal M.A, Abdullah M., Asiri AlAngari Y.M, "On the structural and magnetic properties of La-substituted NiCuZn ferrites prepared using egg-white", Ceramics International. 37 (2011) 2625-2630.
- [21] Jun-gang CAO, Jian-jun L.I., Hai-feng DUAN, Ying-jie LIN, "Synthesis and Characterization of Manganese-copper Spinel Ferrite Powders", chem. res.chinese univcities. 28 (2012)590-593.
- [22] Zaki H.M., "Structure analysis and some magnetic properties for low temperature fired Ni-Cu ferrite", Physica B 407(2012) 2025-2031.
- [23] Laokul P., Maensiri S., "Aloe vera solution synthesis and magnetic properties of Ni-Cu-Zn ferrite nanopowders", journal of optoelectronics and advanced materials. 11(2009) 857 - 862.
- Journal of Solid State Chemistry.183(2010)1239-1244.
- [6] Kim C.H, Kim W.C, An S.Y, Lee S.W, "Structure and Mossbauer studies of Cu-doped Ni-Zn ferrite", Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 215-216 (2000) 213-216.
- [7] Shifeng Yan, Jingbo Yin, Enle Zhou, "Study on the synthesis of NiZnCu ferrite nanoparticles by PVA sol-gel method and their magnetic properties", Journal of Alloys and Compounds, 450 (2008)417-420.
- [8] Tawfik A., Hemeda O.M., "Effect of vacancy jump rate on the permeability and dielectric properties of $Ni_{0.65}Zn_{0.35}Cu_xFe_{2-x}O_4$ ", Materials Letters 56 (2002) 665- 670.
- [۹] براتی م.، سید ابراهیمی س.ع.، بدیعی ع.ر.، "بررسی اثر شرایط هم زدن بر دمای تشکیل و اندازه ی بلوری نانو پودرهای فریت نیکل روی تهیه شده به روش سل - ژل خود احتراقی"، دهمین کنگره ی سالانه ی انجمن مهندسیان ایران.
- [10] Navarosky A., Kleppa O. J, "Thermodynamics of formations of simple spinells", J. inorg, nucl. Chem 30 (1968) 479 - 498.
- [11]Upadhyay C., Verma H.C., Anand S., "Cation distribution in nanosized Ni-Zn ferrites", J. Appl. Phys. 95, 5746 (2004).
- [12] Raghavender A.T., "XRD and IR analysis of nanocrystalline Ni-Zn ferrite synthesized by the sol-gel method", Materials Letters 65(2011) 677-680.
- [13] Mullai R. U., Priyadharsini Pra.deep. P., Chandrasekaran G., "Synthesis And Characterization Of Lanthanum Doped Mg-Zn Ferrite Nanoparticles Prepared by sol-gel Method", International Journal of Recent Trends in Science And Technology. 5 (2012) 78-85.
- [14] Navneet S., Ashish A., Sujata S., Paramjeet S., "Effect of magnesium substitution on dielectric and magnetic properties of Ni-Zn ferrite", Physica B. 406(2011) 687-692.