



ساخت نانوذرات فریت نیکل روی با جانشانی مس به روش سل-ژل و بررسی ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی آن‌ها

محمد نیایی فر*^۱، هدی شلیلیان^۱، احمد حسن پور^۱، جمشید عمیقیان^۲

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات خوزستان، گروه فیزیک

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، گروه فیزیک

(دریافت مقاله: ۹۰/۱۱/۲۷، نسخه نهایی: ۹۱/۴/۲۰)

چکیده: در این پژوهش نانوذرات فریت نیکل روی جانشانی شده به وسیله‌ی مس با ترکیب $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x=0.1-0.6$) روند پلکانی (۰.۱) با استفاده از روش سل-ژل تهیه شد. ساختار بلورین نمونه‌های جانشانی شده با استفاده از پراش پرتو ایکس (XRD)، آنالیز گرمایی TG-DTA، بیناب‌سنجی فروسرخ (FT-IR) و نگاره‌های SEM و TEM انجام گرفت. ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ها با استفاده از مغناطیس سنج نوسانی (VSM) اندازه‌گیری شد. بررسی منحنی پسماند مغناطیسی نشان داد که مقدار مغناطش اشباع با افزایش میزان جانشانی مس تا $x = 0.3$ افزایش می‌یابد و به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد، سپس با افزایش بیشتر مس، افت شدیدی می‌کند. وادارندگی مغناطیسی (H_c) با افزایش مقدار x روند صعودی داشت که این به افزایش ناهمسانگردی مغناطوبلوری یون‌های Cu^{2+} در مقایسه با یون‌های Zn^{2+} ارتباط دارد.

واژه‌های کلیدی: نانوذرات؛ فریت نیکل-روی با جانشانی مس؛ روش سل-ژل؛ ویژگی‌های مغناطیسی.

مقدمه

فریت‌های نیکل روی مس یکی از مهم‌ترین فریت‌های نرم با فرمول عمومی $M\text{Fe}_2\text{O}_4$ هستند که M یک یون دو ظرفیتی یا ترکیبی از چند یون دو ظرفیتی است که به علت اشباع مغناطش بالا و وادارندگی مغناطیسی و دمای چگالش پایین در هسته‌های ترانسفورماتورها، القاگرها، وسایل ارتباطی، ژنراتورها و هدهای ضبط مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. از دیدگاه بلورشناسی این فریت‌ها دارای ساختار اسپینلی FCC هستند و فرمول ساختاری حالت پایه آن ($x=0$) به صورت رابطه‌ی ۱ نمایش داده می‌شود.



که شامل ۸ واحد فرمولی از فریت نیکل روی مس است و با ۳۲ آنیون اکسیژن و ۲۴ کاتیون فلزی تشکیل می‌شود. کاتیون‌های

فلزی درون پرانتز جایگاه‌های چهاروجهی (A) و کاتیون‌های فلزی درون براکت جایگاه‌های هشت‌وجهی (B) را اشغال می‌کنند. به‌طور کلی کیفیت فریت‌ها با پارامترهای مغناطیسی آن‌ها از مانند تراوایی مغناطیسی اولیه (Initial Permeability) (μ_i) مشخص می‌شود که مقدار بیشینه‌ی نفوذپذیری از سه راه در فریت‌های نیکل روی ایجاد می‌شود؛ فراهم کردن یون‌های Fe^{2+} در فریت نیکل روی، قرار دادن میزان عنصر روی برابر ۰.۷ و جانشانی یون‌های مس (Cu^{2+}) در فریت نیکل روی [۲]. برتری دیگر جانشانی یون‌های مس در فریت نیکل روی آن است که این جانشانی از تلفات مغناطیسی (تلفات انرژی) جلوگیری می‌کند [۴،۳] و سبب یک گذار در فاز ساختاری می‌شود، این گذار همراه با کاهش تقارن بلورین (Crystal Symmetry) است که به علت اثر جان-تلا رخ می‌دهد [۵].

* نویسنده مسئول، تلفن: ۴۴۵۷۱۷۴ (۰۶۱۱)، نامبر: ۴۴۳۵۲۸۸ (۰۶۱۱)، پست الکترونیکی: M.niayifar@khozestan.srbiau.ac.ir

شرکت Diamond بررسی شد. بررسی ساختاری همه‌ی نمونه‌ها با یک پراش‌سنج پرتو ایکس ساخت شرکت SEIREFT مدل D3003 و بیناب‌سنج فروسرخ Perkin Elmer مدل LX185256 انجام شد. همچنین ریخت‌شناسی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت شرکت Philip's مدل xl30 و میکروسکوپ الکترونی عبوری ساخت شرکت Philip's مدل CM120 مورد بررسی قرار گرفتند. ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ها با یک مغناطیس سنج نوسانی مدل 14INCH اندازه‌گیری شد.

بحث و بررسی

بررسی رفتار تجزیه‌ی گرمایی ژل خشک شده

نمونه‌ای از منحنی‌های TG و DTA برای ژل خشکیده در شکل ۱ نشان داده شده است. از منحنی TG سه بخش کاهش وزن، مشاهده می‌شود. گام اول کاهش وزن در بازه‌ی دمایی ۱۶۵-۵۲/۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد رخ می‌دهد که همراه است با قله‌ی گرماگیر ۱۷۲/۱۹ درجه‌ی سانتی‌گراد در منحنی DTA، که این قله‌ی گرماگیر از دست دادن رطوبت به صورت شیمیایی و فیزیکی در ژل خشکیده وابسته است. گام دوم کاهش وزن در بازه‌ی دمایی ۱۶۵-۲۸۵/۷۱ درجه‌ی سانتی‌گراد رخ می‌دهد که دلیل آن تجزیه نیترات‌ها در ژل خشک شده است. قله‌ی تیز گرمازای ۳۶۲/۳۲ درجه‌ی سانتی‌گراد در منحنی DTA به بلوری شدن ساختار اسپینلی فریت نیکل روی مس وابسته است. تقریباً در دمای بالاتر از ۳۶۲/۳۲ درجه‌ی سانتی‌گراد هیچ کاهش وزنی دیده نمی‌شود که نشان می‌دهد فرآیند گرمایی هنوز به‌طور کامل صورت نگرفته است [۱۰،۱۱].

بررسی ساختاری

شکل ۲ الگوهای پراش پرتو ایکس نانوذرات فریت نیکل روی مس با ترکیب $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ پخته شده در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. شکل به روشنی نشان می‌دهد که همه‌ی نمونه‌ها دارای ساختار اسپینلی با گروه فضایی Fd-3m و مطابق با کارت استاندارد (08-0234) هستند. میانگین اندازه‌ی ریز بلورک‌ها از رابطه‌ی شرر و از قله‌ی (۳۱۱) الگوی پراش پرتو ایکس محاسبه شد (جدول ۱). شکل ۲ نشان می‌دهد که با کاهش نسبت روی، قله‌های پراش تیزتر شده و اندازه‌ی ریزبلورک‌ها رشد می‌یابد. رشد بلورک‌ها به دلیل کاهش میزان روی (Zn) نسبت به مس است. روی از

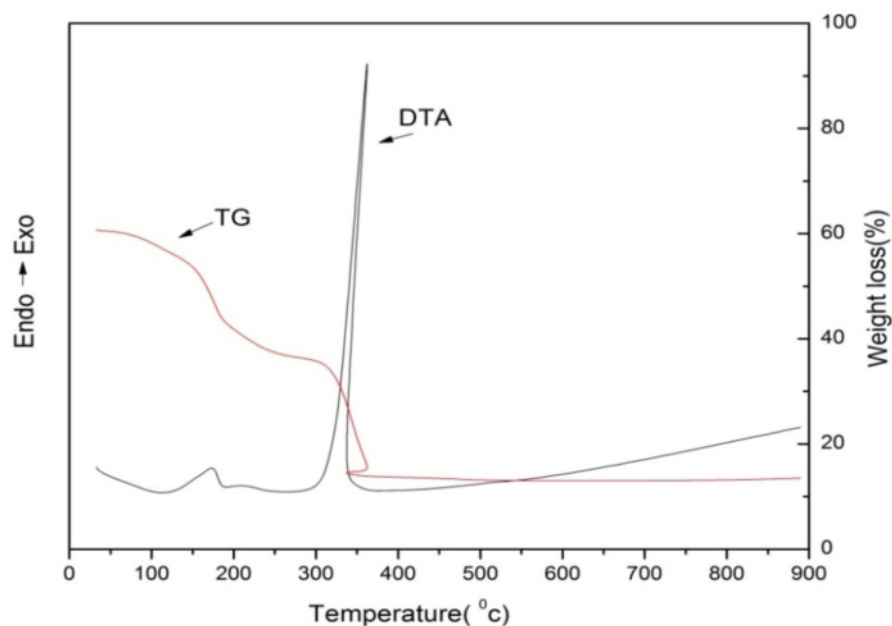
بسیاری از روش‌های ساخت همانند روش شیمیایی نرم [۶]، گرماب [۷]، سل ژل سوختنی [۸]، هم‌رسوبی [۹] و... برای ساخت این نانوذرات وجود دارد. از میان این روش‌ها در این پژوهش، روش سل-ژل به دلیل سودمندی‌هایی همانند، تولید ذرات همگن با اندازه‌ی بسیار ریز و خلوص بالا در یک زمان نسبتاً کوتاه در دمای پایین و کنترل دقیق عنصرسنجی در تولید ماده‌ی نهایی به کار گرفته شد. در این پژوهش از پلی-وینیل‌الکل به دلیل دارا بودن ویژگی‌هایی همانند قطبیت زیاد و مقاوم بودن در برابر حلال‌های آبی، به عنوان عامل پوشش-دهنده [۱] تمرکز می‌کنیم. در این مقاله ما نخست بر تولید نانوذرات فریت نیکل روی مس به روش سل-ژل با استفاده از ترکیب پلی وینیل‌الکل می‌پردازیم و سپس ویژگی‌های آن‌ها را بررسی خواهیم کرد.

بخش تجربی

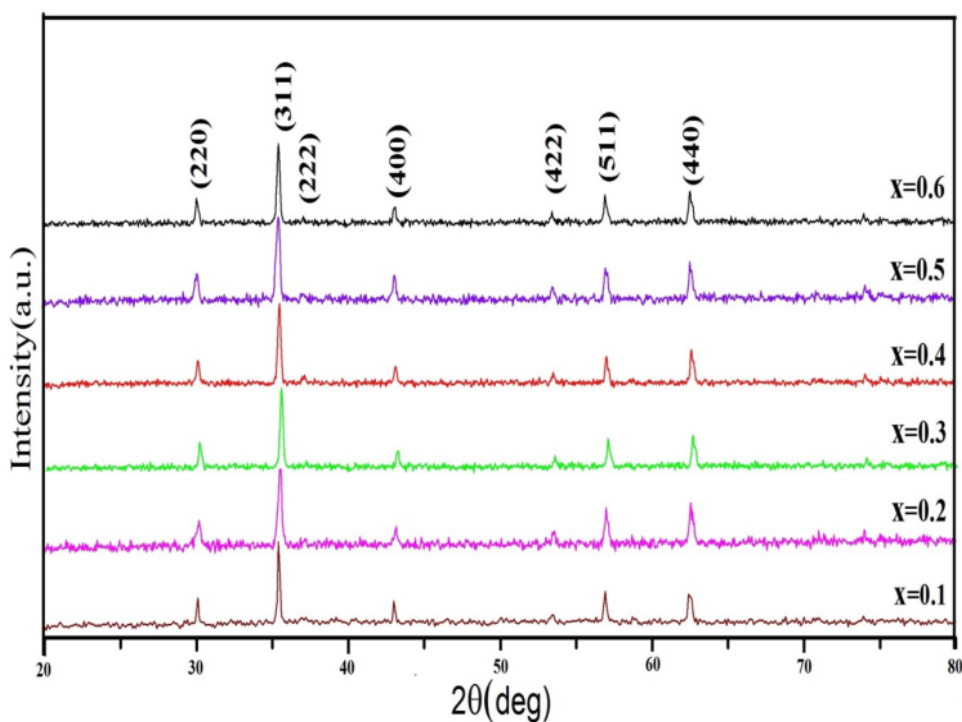
برای تهیه نانوذرات فریت نیکل روی مس با ترکیب $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ با $x = 0.1 - 0.6$ با روند پلکانی (۰/۱) نیترات‌های آبدار فلزات نیکل $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، روی $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، مس $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ و آهن $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (با درجه‌ی خلوص ۹۹٪ محصول شرکت مرک)، به عنوان مواد اولیه استفاده شدند. برای تهیه‌ی ۵ گرم محصول نهایی، نخست نیترات‌های یاد شده با نسبت‌های معین عنصر سنجی وزن شده و پس از مخلوط‌سازی در ۷۰ میلی‌لیتر آب دوبار یونیده حل شدند. سپس پلی‌وینیل‌الکل به محلول آبی تهیه شده افزوده شد. نسبت مولی یون‌های فلزی به واحدهای مونومر پلی‌وینیل‌الکل یک به دو (۱:۲) انتخاب شد. محلول حاصل با همزن مغناطیسی، همزده شد. سپس با گرم کردن و تکان دادن پیوسته‌ی آن در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، پلی-وینیل‌الکل کاملاً حل شد و یک محلول شفاف قهوه‌ای رنگ به دست آمد. این محلول در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تبخیر شد تا یک سل همگن به دست آمد. آنگاه به این سل در دمای ۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت گرما داده شد تا ژل خشک شده‌ای حاصل شود. سپس فرایند گرمادهی به ژل خشکیده در دمای ۱۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت با آهنگ $5^\circ\text{C}/\text{min}$ در هوا انجام شد. آنالیز گرمایی روی ژل خشک شده با استفاده از دستگاه TG-DTA ساخت

است [۳]. ثابت شبکه با افزایش نسبت مس به صورت خطی افزایش می‌یابد که می‌توان آن را به دلیل بزرگتر بودن شعاع یونی مس ($0.87 \text{ \AA}$) در مقایسه با شعاع یونی روی ($0.74 \text{ \AA}$) نسبت داد [۷].

رشد دانه‌ها جلوگیری می‌کند که این را می‌توان با استفاده از تحلیل TG-DTA توجیه کرد، با توجه به تحلیل گرمایی DTA فریت نیکل روی و فریت نیکل روی مس، قله‌ی گرمزای فریت نیکل روی در مقایسه با فریت نیکل روی مس شدیدتر



شکل ۱ منحنی DTA-TG ژل خشک شده فریت نیکل روی مس در $x=0.1$.



شکل ۲ پراش پرتو ایکس نانوذرات $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ گرما داده شده در 1000°C .

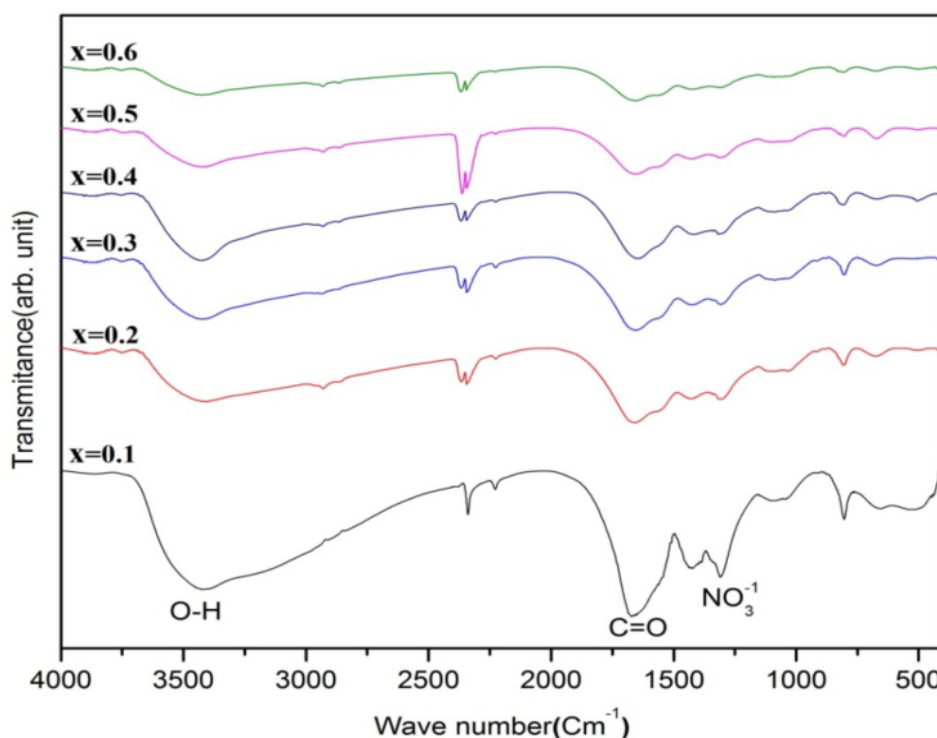
جدول ۱ ثابت شبکه، اندازه ریزبلورکها و دانه‌های ذرات گرما دیده با ترکیب $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$

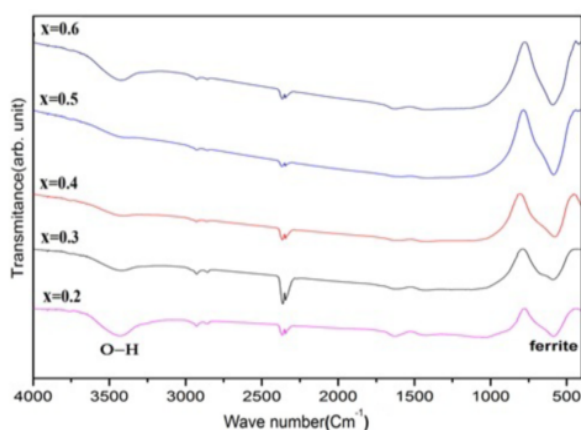
اندازه ی ذرات (nm)	اندازه ی ریزبلورکها (nm)	ثابت شبکه (Å)	میزان مس (x)
۸۷	۲۱٫۴۲	۸٫۳۹۹	۰٫۱
۱۱۴	۲۸٫۷۵	۸٫۴۰۱	۰٫۲
۱۲۰	۲۹٫۰۵	۸٫۴۰۹	۰٫۳
۱۳۴	۳۸٫۷۱	۸٫۴۱۴	۰٫۴
۱۴۶	۳۸٫۸۲	۸٫۴۱۸	۰٫۵
۱۶۸	۴۲٫۱۲	۸٫۴۲۰	۰٫۶

تحلیل بیناب‌های بیناب سنج فروسرخ

تغییرات شیمیایی و ساختاری که به هنگام پخت رخ می‌دهند با بیناب‌های فروسرخ مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های ۳ و ۴ نشان دهنده‌ی طیف‌های بیناب‌سنج فروسرخ ژل خشکیده و ذرات پخته شده در بازه‌ی عدد موجی $4000-400\text{ cm}^{-1}$ است. بیناب ژل خشکیده نشان دهنده‌ی نوارهای مشخص 3400 و 1670 و 1420 cm^{-1} است که به ترتیب با مدهای نوسانی کششی (Stretching mode) گروه O-H و یون‌های NO_3^{-1} همخوانی دارند [۱]. ظاهر شدن نوارهای مشخص NO_3^{-1} نشان می‌دهند که به هنگام ژل شدن محلول،

NO_3^{-1} به‌صورت یک گروه در ساختار ژل ترکیبی وجود دارد. در بیناب‌های فروسرخ شدت‌ها برای گستره‌ی بسامدهای متناظر با گروه O-H و NO_3^{-1} کاهش بسیار شدیدی دارند که می‌توان آن را با از بین رفتن آب باقی‌مانده در ژل و تجزیه پلی‌وینیل‌الکل و NO_3^{-1} در ژل خشک شده توجیه کرد [۱۱]. نوار جدید 571 cm^{-1} مد کششی است که به عنوان نوار جذبی (Absorption band) مشخص‌کننده‌ی فریت در نظر گرفته می‌شود [۱۲]. بنابراین، کاهش نوارهای مشخص‌شده با افزایش دمای پخت نشان‌دهنده‌ی تجزیه بیشتر مواد آلی و تشکیل نوارهای فریت ($\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$) است [۱۳، ۱].

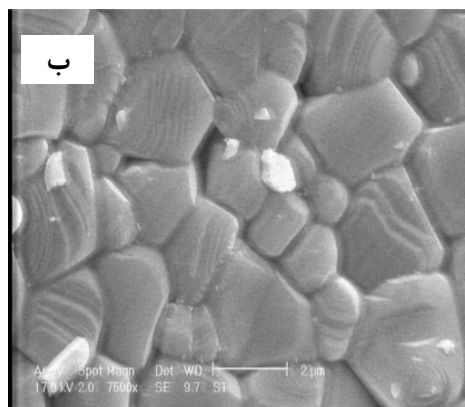
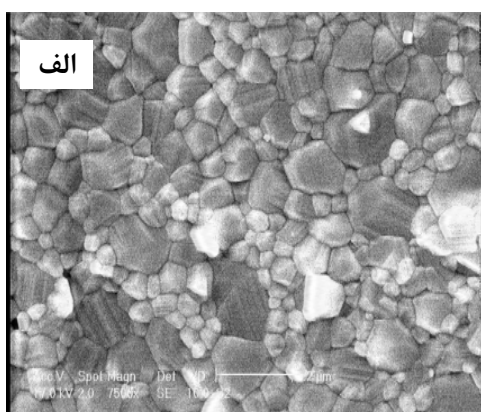
شکل ۳ طیف بیناب‌سنج فروسرخ ژل خشک شده نانوذرات $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$



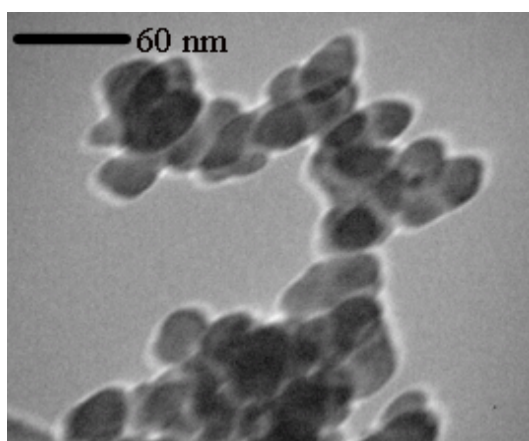
شکل ۴ طیف بیناب سنج فروسرخ نانوذرات گرما داده شده $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ در 1000°C .

دهند. شکل ۵ (الف و ب) در برازش با نتایج XRD نشان می- دهد که با کاهش میزان روی ذرات دیگر افزایش می- یابند و میانگین ذرات دیگر بین ۸۷ تا ۱۶۸ نانومتر است.

عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی (شکل ۵) و عکس میکروسکوپ الکترونی عبوری (شکل ۶) ریخت شناسی نانوذرات فریت نیکل روی مس با ترکیب $(\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4)$ پخته شده در دمای 1000°C درجه سانتی گراد را نشان می-



شکل ۵ تصاویر SEM نانوذرات فریت نیکل روی مس با ترکیب (الف) $x = 0.2$ و (ب) $x = 0.6$ پخته شده در دمای 1000°C .



شکل ۶ تصویر TEM نانو ذرات فریت نیکل روی مس با ترکیب $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.6}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ پخته شده در دمای 400°C .

بررسی ویژگی‌های مغناطیسی

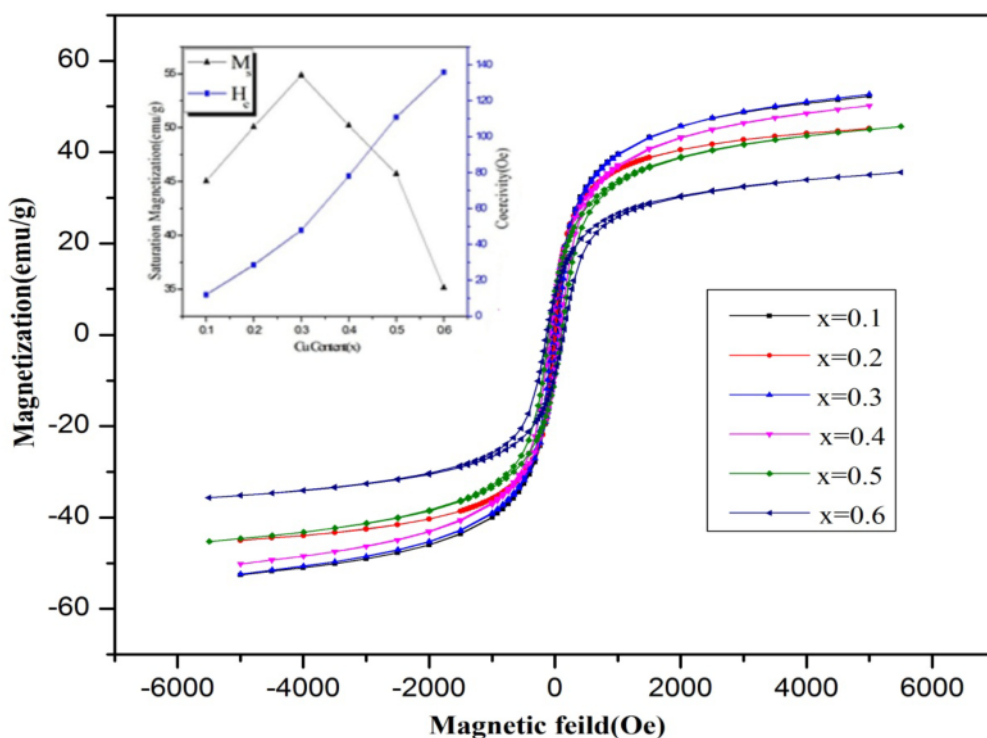
$x < 0.3$ ، یون‌های Cu^{+2} جانشین یون‌های Zn^{+2} در جایگاه A می‌شوند که این باعث افزایش گشتاور مغناطیسی زیرشبکه A و در نتیجه کاهش مغناطش کل می‌شود. با اطلاع از گشتاور مغناطیسی یون‌ها، مقدار مغناطش کل برای نمونه‌های جانشانی شده با میزان $x = 0.1 - 0.3$ را می‌توان از رابطه‌ی نظری (۲) محاسبه کرد.

$$M_s = \left[\left(\overbrace{0.6-x}^{\text{Zn}} + \overbrace{0.3}^{\text{Fe}} + \overbrace{0.1}^{\text{Cu}} x \right) \right] \mu_B \quad (2)$$

$$- \left[\left(\overbrace{2/3 \cdot 0.3}^{\text{Ni}} + \overbrace{0.7}^{\text{Fe}} \right) \right] \mu_B$$

ولی همزمان، حضور یون‌های Cu^{+2} با گشتاور مغناطیسی ۱/۷۳ در جایگاه A به جای یون‌های Zn^{+2} باعث افزایش برهم‌کنش ابرتبادلی (Superexchange Interaction) بین جایگاه‌های A و B می‌شود که در نتیجه بر پایه‌ی نظریه‌ی نیل باعث افزایش نظم گشتاورهای مغناطیسی اتم‌ها در دو جایگاه می‌شود.

شکل ۷ منحنی پسماند نمونه‌ها، تغییرات مغناطش اشباع و وادارندگی مغناطیسی با تغییر میزان جانشانی مس در ترکیب را نشان می‌دهد. براساس نظریه‌ی فری مغناطیس نیل (Neel Theory) در ساختار اسپینلی، کاتیون‌ها در زیرشبکه‌های (Sub-Lattice) مختلف (جایگاه‌های چهاروجهی و هشت-وجهی) دارای گشتاورهای پادماوازی هستند. با توجه به این نظریه‌ی و آگاهی از اینکه گشتاورهای مغناطیسی یون‌های Zn^{+2} ، Ni^{+2} ، Cu^{+2} و Fe^{+3} به ترتیب ۰، ۱/۷، ۵/۴ و ۵/۴ است [۵]، رفتار مغناطیسی نمونه‌ها را می‌توان توجیه کرد. چنانکه که در شکل ۷ دیده می‌شود، مقدار مغناطش اشباع نانوفریته‌ها با افزایش میزان جانشانی مس از $x = 0.1$ تا $x = 0.3$ ، افزایش می‌یابد و برای نمونه‌های با $x > 0.3$ کاهش می‌یابد. بنابر گزارشات قبلی یون‌های Cu^{+2} و Fe^{+3} در هر دو جایگاه قرار می‌گیرند [۸]. از طرفی با توجه به اینکه ZnFe_2O_4 نرمال اسپینل کامل و NiFe_2O_4 وارون اسپینل است، می‌توان گفت یون‌های Zn^{+2} در جایگاه A و یون‌های Ni^{+2} در جایگاه B قرار دارند [۱۰]. برای نمونه‌های جانشانی شده با میزان



شکل ۷ منحنی پسماند مغناطیسی ذرات پخته شده با ترکیب $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.7-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ نمودار تغییرات M_s و H_c بر حسب میزان مس جانشانی شده.

مکعبی همخوانی دارد. میانگین اندازه‌ی ریزبلورک‌ها با استفاده از قله‌ی (۳۱۱) الگوی پراش پرتو ایکس بین ۴۲-۲۱ نانومتر محاسبه شد. میانگین اندازه‌ی به‌دست آمده از تصاویر میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و عبوری با نتایج به‌دست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس همخوانی دارد. بررسی ویژگی‌های مغناطیسی نمونه‌ها نشان می‌دهد که مقدار مغناطش اشباع با افزایش میزان جانشانی مس تا $x = 0.3$ زیاد شده و برای میزان جانشانی $x > 0.3$ کاهش می‌یابد. رفتار مغناطیسی نمونه‌ها به اثرهای مغناطش کل ناشی از توزیع کاتیونی و برهم‌کنش ابرتبادلی نسبت داده شده است. همچنین، با افزایش میزان جانشانی مس وادارندگی مغناطیسی (H_c) به طور خطی افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] Sh. Yan, J. Yin, E. Zhou, "Study on the synthesis of Ni Zn Cu ferrite nanoparticles by PVA sol-gel method and their magnetic properties", Journal of alloys and compounds 450. (2008) 417-420.
- [2] J. Subrt, J. Slama, E. Usak, A. Gruskova, V. Jancarik, R. Dosoudil, J. Lukac, M. Usakova, "Influence of Cu^{2+} ions on structural and magnetic properties of Ni Zn ferrites", Journal of Material Electron 18. (2007) 1183-1189.
- [3] M.A. Gabal, "Magnetic properties of Ni Cu Zn ferrite nanoparticles synthesized using egg-white", Journal of Material research Bulletin 45. (2010) 589-593.
- [4] J. Xiang, X. Shen, F. Song, M. Liu, "One-dimensional Ni Cu Zn ferrite nanostructures: Fabrication, structure, and magnetic properties", Journal of Solid State Chemistry 183. (2010) 1239-1244.
- [5] B.K. Chougule, P.A. Jadhav, R.S. Devan, Y.D. Kolekar, "Structural, electrical and magnetic characterizations of Ni-Cu-Zn ferrite synthesized by citrate precursor method", Journal of Physics and Chemistry of solids 70. (2009) 396-400.
- [6] S.k. Date, J.J. Shorti, S.D. Kulkarni, C.E. Deshpande, A. Mitra, S.R. Sainkar, P.S. Anil Kumar, "effect of cu substitution on the magnetic and electrical properties of Ni-Zn ferrite synthesized by soft chemical method", Journal of materials chemistry and physics 59. (1999) 1-5.

افزایش مغناطش مشاهده شده در نمونه‌های جانشانی شده با میزان $x \leq 0.3$ را می‌توان به چیرگی اثر افزایش برهم‌کنش ابرتبادلی به اثر کاهش مغناطش کل نسبت داد. افزایش میزان جانشانی مس بیش از 0.3 باعث جانشانی یون‌های Cu^{+2} در جایگاه هشت وجهی به جای یون‌های Fe^{+3} در این جایگاه می‌شود. بدین ترتیب یون‌های آهن جانشین یون‌های Zn^{+2} در جایگاه چهاروجهی می‌شوند، که باعث کاهش مغناطش کل می‌شود. کاهش مشاهده شده در مغناطش اشباع نمونه‌های جانشانی شده با میزان $x > 0.3$ را می‌توان به اثر حضور یون‌های آهن نسبت داد. بر مبنای توزیع کاتیونی فوق، مقدار مغناطش کل برای نمونه‌های $x > 0.3$ را می‌توان از رابطه نظری (۳) به‌دست آورد [۱۴].

$$M_s = \left[\left(\overbrace{0.6 - x}^{Zn} + \overbrace{0.3 + x}^{Fe} \right) \right] \mu_B \quad (3)$$

$$- \left[\left(\overbrace{0.3}^{Ni} + \overbrace{0.7 - x}^{Fe} + \overbrace{0.3}^{Cu} \right) \right] \mu_B$$

با افزایش میزان جانشانی مس، وادارندگی مغناطیسی نانوذرات فریت نیکل روی مس افزایش می‌یابد. می‌دانیم یون‌های Cu^{+2} دارای ناهمسانگردی مغناطوبلوری^۲ بیشتری نسبت به یون‌های Zn^{+2} هستند [۱۵]. از سوی دیگر با توجه به اینکه ذرات دیگر بیش از ۸۰ نانومتر است و همه‌ی نمونه‌ها در منطقه‌ی چند حوزه‌ای قرار دارند [۱۶]، انتظار می‌رود که با افزایش ذرات دیگر شاهد کاهش وادارندگی باشیم اما نتایج خلاف این را نشان می‌دهند. بنابراین افزایش وادارندگی را می‌توان به غلبه اثر افزایشی ناهمسانگردی یون‌های (Cu^{+2}) بر اثر افزایشی اندازه نسبت داد.

برداشت

ذرات فریت نیکل روی مس در اندازه‌ی نانو با استفاده از پلی-وینیل‌الکل به روش سل-ژل تولید شدند و ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های تهیه شده با ساختار اسپینلی

- [12] E. Zhou, Sh.Yan, J. Geng, Li. Yin, "Preparation of nanocrystalline Ni Zn Cu ferrite particles by sol-gel method and magnetic properties", Journal of magnetism and magnetic Materials 277.(2004)84- 89.
- [13] Z. Yue, L. Li, J. zhou, H. Zhang, Z. Gui, "Preparation and characterization of Ni Cu Zn ferrite nanocrystalline powders by auto-combustion of nitrate-citrate gels", Journal of materials science and Engineering B64.(1999) 68-72.
- [14] E. Usak, J. Slama, A. Gruskova, M. Usakova, R. Dosoudil, "Contribution to analysis of Cu-substituted NiZn ferrite", Journal of magnetism and magnetic Materials 321. (2009)3346-3351.
- [15] M. Mozaffari, M. Eghbali Arani, J. Amighian, "The effect of cation distribution on magnetization of $ZnFe_2O_4$ nanoparticles", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 322. (2010)3240-3244.
- [16] Yu. Liming, Sh. Cao, Y. Liu, J. Wang, Ch. Jing, J. Zhang, "Thermal and Structural analysis on the nanocrystalline Ni Cu Zn ferrite synthesis in different atmospheres", Journal of magnetism and magnetic Materials 301. (2006)100-106.
- [7] H. Wen wang, Sh.chung kung, "Crystallization of nanosized Ni Zn Cu ferrite powders prepared by hydrothermal method", Journal of magnetism and magnetic materials 270.(2004)230-236.
- [8] J. Bera, P.k. Roy, "Characterization of nanocrystalline NiZnCu ferrite powders synthesized by sol-gel auto combustion method", Journal of materials processing technology197.(2008)279-283.
- [9] W. Chih Hsu, S.C. Chen, P.C. Kuo, C.T. Lie, W.S. Tsal, "Preparation of Ni Cu Zn ferrite nanoparticles from chemical co-precipitation method and magnetic properties after sintering", Journal of materials science and Engineering B111.(2004)142-149.
- [۱۰] فراست م، گلزان س.م، حسن زاده ع، "تهیه نانوذرات نقره بر پایه ی سل- ژل و مطالعه ی ویژگی های فیزیکی و ساختاری آن"، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، سال نوزدهم شماره ۲ (۱۳۹۰) ص ۴۷-۵۰.
- [11] S. zahi, M. hashim, A.R. Duad , "Preparation of Ni Zn Cu Ferrite particles by sol-gel technique", Journal of material letters60. (2006) 2803-2806.