



ساخت و بررسی خواص ساختاری، اپتیکی و مغناطیسی نانوذرات $Zn_{1-x}Ni_xO$

مرتضی زرگرشوشتری*، امیر پورمقدم، منصور فرید

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز

(دریافت مقاله: ۹۴/۳/۲۲، نسخه نهایی: ۹۴/۷/۱۲)

چکیده: در این مقاله، از روش مکانوشیمیایی برای تولید نانوذرات $Zn_{1-x}Ni_xO$ که در آن x برابر ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۸ و ۰/۱ است، استفاده شده است. برای بررسی خواص ساختاری از الگوی پراش پرتو X ، ریخت‌شناسی ذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی، خواص اپتیکی از طیف‌سنج فرابنفش- مرئی و طیف‌سنج فوتولومینسانس و خواص مغناطیسی از مغناطیس‌سنج نمونه‌ای ارتعاشی استفاده شده است. نتایج الگوی پراش پرتو X نشان می‌دهند که نانوذرات $Zn_{1-x}Ni_xO$ تا x برابر ۰/۰۳ تک فاز بوده و فاز ناخالصی در ساختار اکسید روی ظاهر نمی‌شود، و از x برابر ۰/۰۴ فاز ناخالصی در این ساختار ظاهر می‌شود. نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی نشان می‌دهد که با آرایش نیکل در ساختار اکسید روی، میانگین اندازه‌ی ذرات افزایش می‌یابند. بررسی نتایج طیف‌سنج فرابنفش- مرئی نشان می‌دهند که با آرایش نیکل، گاف اپتیکی نانوذرات اکسید روی کاهش می‌یابد که می‌تواند به- دلیل برهم‌کنش تبادلی $sp-d$ بین الکترون‌های نواری و الکترون‌های d یون‌های Ni^{2+} باشد. بررسی مغناطیسی نمونه‌ی ارتعاشی نشان می‌دهد که نانوذرات اکسید روی و آلیپده با نیکل، از میدان صفر تا حدود ۲۰۰ Oe خاصیت فرومغناطیس از خود نشان می‌دهند. در میدان‌های قوی‌تر، نانو ذرات $Zn_{1-x}Ni_xO$ با x برابر صفر و ۰/۰۱ خاصیت دیامغناطیسی و برای x بزرگتر از ۰/۰۱ نمونه‌ها از خود خاصیت پارامغناطیسی نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: اکسید روی؛ نیکل؛ مکانوشیمیایی؛ نانوذرات ZnO

مقدمه

ناخالصی به نیم‌رساناهای پهن گاف بر ویژگی‌های الکتریکی، اپتیکی و مغناطیسی آن‌ها بسیار مورد توجه است؛ لذا آرایش عناصر خاص در اکسید روی راهکار مؤثری برای بهینه‌سازی عملکرد اپتیکی، الکتریکی و مغناطیسی است که برای بسیاری از کاربردهای تجربی مهم است. معمولاً به‌منظور بهبود خواص اپتیکی، اکسید روی با انواع مختلفی از یون‌های فلزی مانند Sc، Al و Ga آرایش داده می‌شود. هم‌چنین به‌منظور بهبود خواص مغناطیسی، اکسید روی با یون‌های مغناطیسی مانند Ni، Co و Fe که ایجاد نیم‌رسانای مغناطیسی رقیق شده می‌کند، آرایش داده می‌شود [۵،۳].

امروزه نیم‌رساناهای مغناطیسی رقیق شده به‌دلیل کاربردهای وسیع از جمله افزایش سرعت پردازش داده‌ها،

در سال‌های اخیر، نانوساختارهای نیم‌رسانا با توجه به‌خواص منحصر به‌فرد و کاربردهایشان مورد توجه زیاد قرار گرفته‌اند. بین انواع نانوساختارهای فلز اکسید شده که گسترش یافته‌اند، به‌اکسید روی که کاربردهای مختلفی دارد بیشترین توجه شده است. اکسید روی دارای ساختار ششگوشی ورتسایت است و دارای گاف نواری مستقیم در حدود ۳/۳۷ eV در ۳۰۰ کلین و انرژی اکسایش بزرگ حدود ۶۰ meV است [۱]. این نیم‌رسانا دارای خواص مناسب بسیاری از جمله شفافیت خوب، رخشانی شدید در دمای اتاق و جذب UV است که در تولید وسایلی مانند سلول‌های خورشیدی، نمایشگرهای پانلی مسطح و تولید فراورده‌های آرایشی استفاده می‌شود [۲-۴]. بررسی اثر افزودن

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۶۱۳۳۷۳۸۳۱۰، نمابر: ۰۶۱۳۳۷۳۸۳۱۰، پست الکترونیکی: zargar@scu.ac.ir

مقدار x برابر ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۸ و ۰/۱ در نظر گرفته شد. سپس به منظور تولید نانوذرات خالص $Zn_{1-x}Ni_xO$ پودر حاصل از آسیا در دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتیگراد تکلیس شد. در نهایت برای حذف $NaCl$ پودر تکلیس شده با استفاده از آب، یون زدایی و شست و شو داده شد. و سپس به وسیله‌ی یک دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه جدا شدند. محصول نهایی با خشک کردن پودر شست و شو داده شده در دمای ۸۰ درجه‌ی سانتیگراد در کوره به مدت حدود ۱۲ ساعت به دست آمد.

سرشتی‌یابی نمونه‌ها با استفاده از پراش پرتو (XRD) ، میکروسکوب الکترونی روبشی نشر میدانی $(FESEM)$ ، طیف-سنج فرابنفش- مرئی $(UV-vis)$ ، طیف‌سنج فوتولومینسانس (PL) و مغناطیس‌سنج نمونه‌ی ارتعاشی (VSM) انجام شد که در ادامه خواهد آمد.

بحث و بررسی

الگوی XRD نمونه‌های $Zn_{1-x}Ni_xO$ در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور بررسی الگوهای XRD از نرم افزار $Xpert$ استفاده شد. مشاهده می‌شود که تا آلایش x برابر ۰/۰۳ هیچ‌گونه فاز ناخالصی وارد نشده است که جانشینی نیکل به جای روی در ساختار اکسید روی را تأیید می‌کند و در نتیجه نمونه‌های تک فاز آلایش شده تولید شده است.

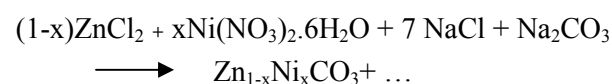
از x برابر ۰/۰۴ در الگوی پراش قله‌ی بیشینه و قله‌ی پس از آن مربوط به فاز ثانویه $Ni_{0.8}Zn_{0.2}O$ ظاهر شده است که با افزایش مقدار آلایش شدت قله‌ی ظاهر شده افزایش یافته است؛ لذا حد حلالیت Ni در ZnO در این پژوهش ۳ درصد است. نمونه‌های تک فاز با کارت $JCPDS$ به شماره‌ی ۰۲۰۷-۰۷۹ اکسید روی همخوانی دارند.

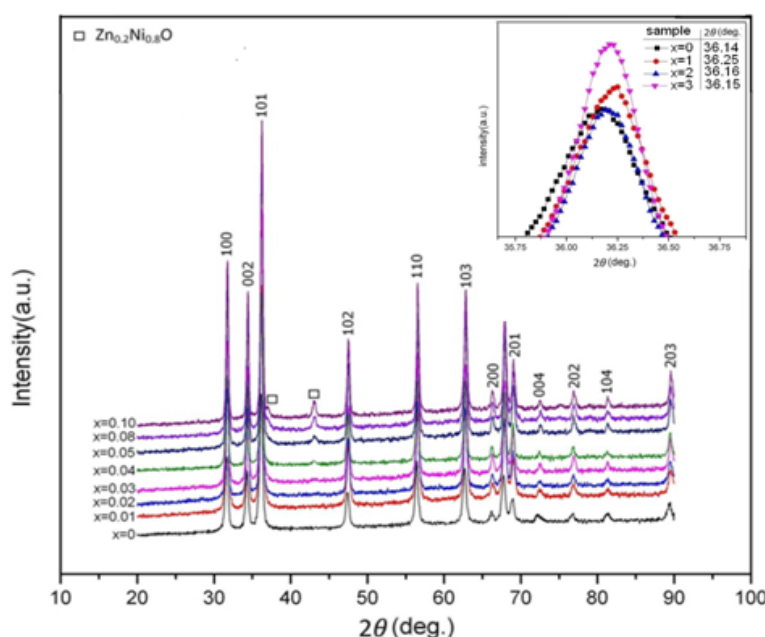
نتایج این پژوهش با پژوهش‌های دیگری مانند آسیاب گلوله‌ای [۱۱]، سل - ژل [۱۲] و حلالی - گرمایی [۳] که در این زمینه انجام داده است، مقایسه شد و نشان داد که حد حلالیت با روش‌های فوق به ترتیب ۳، ۴ و ۴/۳ درصد است که نشان می‌دهد حد حلالیت نیکل در ساختار اکسید روی، به روش ساخت وابسته است؛ حد حلالیت به دست آمده به روش مکانوشیمیایی در این پژوهش، به روش‌های دیگر نزدیک است. همچنین در روش‌های دیگر، فاز ناخالصی وارد شده اکسید نیکل است که در این پژوهش $Ni_{0.8}Zn_{0.2}O$ بوده است که نشان می‌دهد فاز ناخالصی نیز به روش ساخت وابسته است.

کاهش انرژی الکتریکی، استفاده در وسایل اسپینترونیکی مانند حافظه‌های غیرفرار و کامپیوترهای کوانتومی توجه زیاد پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند [۷،۶]. پس از پیش‌بینی دیتل و همکارانش در سال ۲۰۰۰ میلادی مبنی بر اینکه آلایش اکسیدها (به‌طور خاص اکسید روی) با اتم‌های مغناطیسی ممکن است حالت فرومغناطیس با دمای کوری بالای دمای اتاق داشته باشند، اکسید روی آلایش داده شده با فلزات واسطه مشتاقانه مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. معلوم شده است که اکسید روی برای فلزات واسطه حلال‌پذیری بالا و خواص نیم‌رسانایی بهتری ارائه می‌دهد. پس از پیش‌بینی نظری فرومغناطیس در دمای اتاق برای اکسید روی به وسیله دیتل و همکارانش، فرومغناطیس با دمای کوری بالاتر از دمای اتاق در نانوذرات اکسید روی آلاییده با نیکل، آهن، کبالت و ... دیده شده است [۹،۸]. روش‌های مختلفی برای ترکیب نانوذرات اکسید روی مورد استفاده قرار گرفته است که اخیراً روش مکانوشیمیایی در ابعاد گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. از پژوهش‌های پیشین معلوم شد که با استفاده از فرآیند مکانوشیمیایی، امکان تولید آسان پودرهای نانوذره با اندازه‌ی دانه‌های کنترل شده و کمترین میزان ناخالصی قابل دستیابی است. این روش شامل فعال‌سازی مکانیکی واکنش‌های جانشینی حالت جامد در یک آسیاب گلوله‌ای است [۱۰،۲]. روش‌هایی از جمله آسیاب گلوله‌ای [۱۱]، سل - ژل [۱۲] و حلالی - گرمایی [۳] برای تولید نانوذرات $Zn_{1-x}Ni_xO$ استفاده شده‌اند. با توجه به بررسی‌های انجام شده تولید نانوذرات $Zn_{1-x}Ni_xO$ به روش مکانوشیمیایی که در آن x برابر ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۸ و ۰/۱ است، اولین بار در این مقاله گزارش می‌شود.

شرح آزمایش

برای تولید نانوذرات اکسید روی آلاییده به نیکل به روش مکانوشیمیایی، پیش‌ماده‌های $NaCl$ ، $ZnCl_2$ ، Na_2CO_3 و $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ با خلوص ۹۹/۹٪ استفاده شدند؛ که $NaCl$ به عنوان رقیق‌کننده به کار برده می‌شود. مخلوط تناسب عنصری پیش ماده‌ها درون یک آسیاب گلوله‌ای (با نسبت جرم گلوله به جرم پودر ۱۰ به ۱) به مدت ۱۱ ساعت و با سرعت ۳۰۰ دور بر دقیقه بنابر واکنش شیمیایی زیر آسیا شدند [۱۳]:





شکل ۱ الگوی XRD نمونه‌های $Zn_{1-x}Ni_xO$ ، در درون شکل تغییر زاویه‌ی پراش قله‌ی بیشینه با آرایش نیکل آورده شده است.

یافته‌اند. این کاهش می‌تواند به دلیل شعاع یونی کوچکتر نیکل ($r = 69 \text{ \AA}$) در مقایسه با شعاع یونی روی ($r = 74 \text{ \AA}$) رخ داده است [۳]. به منظور بررسی ریخت‌شناسی نانوذرات اکسید روی و نیز تعیین اندازه‌ی نانوذرات، از تصاویرهای FESEM استفاده شدند. شکل ۲ نشان می‌دهد که ذرات تقریباً شکل کروی دارند و با افزایش مقدار آرایش، میانگین اندازه‌ی نانوذرات افزایش می‌یابند.

میانگین اندازه‌ی نانوذرات با استفاده از نرم افزار Microstructure Measurement با خطای $\pm 3 \text{ nm}$ اندازه‌گیری شد؛ برای این کار بخشی از تصویر انتخاب و صد ذره اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شد. نیز از معادله‌ی دبای-شرر و با استفاده از زاویه‌ی پراش قله‌ی بیشینه (θ) و پهنای آن در نصف شدت قله ($\Delta\theta$) بر حسب رادیان، می‌توان اندازه‌ی بلورکها (d) را تعیین کرد [۱۴].

$$d = \frac{\kappa\lambda}{\Delta\theta\cos\theta} \quad (4)$$

میانگین‌های اندازه‌ی ذرات و بلورکها در جدول ۱ نوشته شده‌اند که نشان می‌دهند با ورود نیکل، میانگین اندازه‌ی ذرات و بلورکهای اکسید روی افزایش یافته است. توزیع اندازه‌ی ذرات نمونه‌ها نیز در شکل ۳ رسم شده است.

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر آرایش نیکل بر ساختار اکسید روی، ثابت‌های شبکه و حجم یاخته‌ی یک (v) محاسبه شدند. با توجه به اینکه یاخته‌ی نمونه‌ها ششگوشی ورتسایت است، پارامترهای شبکه و فاصله‌ی بین صفحات (d) با استفاده از شاخص‌های میلر (hkl) و قانون براگ از طریق روابط زیر قابل محاسبه‌اند [۴].

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (1)$$

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (2)$$

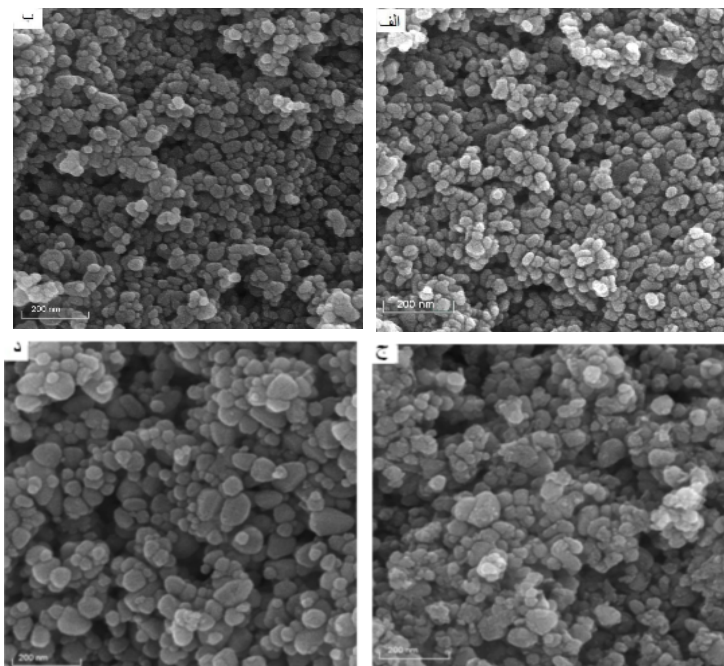
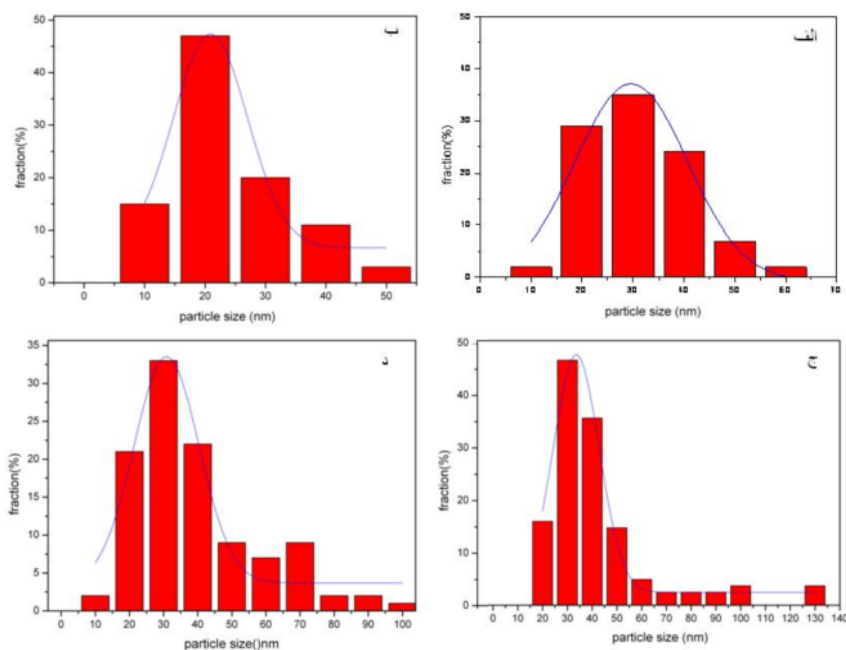
$$V = \frac{\sqrt{3}a^2c}{2} \quad (3)$$

که λ در رابطه‌ی ۲ طول موج پرتو X ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) و n مرتبه پراش است.

برای به دست آوردن مقادیر a و c، لازم است که معادله‌ی (۱) هم‌زمان برای دو صفحه از صفحات بلوری (با شاخص‌های میلر متفاوت) حل شود. برای دقت بیشتر می‌توان این معادله را برای جفت صفحات متوالی حل کرد و سپس میانگین آنها را به دست آورد که در اینجا از ۱۲ قله استفاده شده است. نتایج در جدول ۱ نوشته شده‌اند؛ که نشان می‌دهند با جانشینی نیکل به جای روی در ساختار اکسید روی، پارامترهای شبکه کاهش

جدول ۱ میانگین پارامترهای شبکه، میانگینی اندازه‌ی ذرات و بلورکها و گاف اپتیکی $Zn_{1-x}Ni_xO$

نمونه	$a(\text{\AA})$	$c(\text{\AA})$	$V_{\text{cell}}(\text{\AA}^3)$	متوسط اندازه ذرات (nm)	متوسط اندازه بلورکها (nm)	گاف اپتیکی (eV)
ZnO	۳٫۲۵۹	۵٫۲۱۸	۴۷٫۹۹۴	۳۶	۱۷	۳٫۳۸
$Zn_{0.99}Ni_{0.01}O$	۳٫۲۵۶	۵٫۲۱۵	۴۷٫۸۷۸	۳۲	۱۹	۳٫۳۷
$Zn_{0.98}Ni_{0.02}O$	۳٫۲۵۶	۵٫۲۱۳	۴۷٫۸۶۰	۴۳	۲۱	۳٫۳۶
$Zn_{0.97}Ni_{0.03}O$	۳٫۲۵۵	۵٫۲۱۳	۴۷٫۸۳۱	۴۴	۲۰	۳٫۲۲

شکل ۲ تصاویر FESEM نمونه‌های $Zn_{1-x}Ni_xO$ (الف) $x=0$ (ب) $x=0.1$ (ج) $x=0.2$ (د) $x=0.3$.شکل ۳ توزیع اندازه‌ی ذرات نمونه‌های $Zn_{1-x}Ni_xO$ (الف) $x=0$ (ب) $x=0.1$ (ج) $x=0.2$ (د) $x=0.3$.

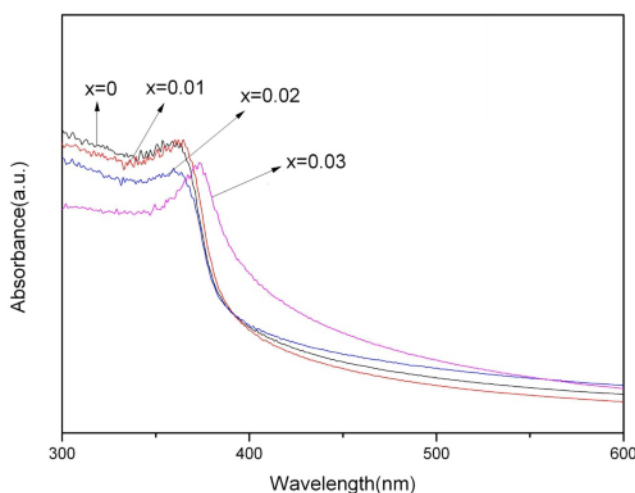
ضریب ثابت و E_g گاف اپتیکی است. برای به دست آوردن گاف، نمودار $(\alpha h\nu)^2$ را بر حسب $h\nu$ رسم می کنند؛ که گاه بخش خطی نمودار با محور افقی مقدار گاف را به دست می دهد که در شکل ۵ برای نمونه های $Zn_{1-x}Ni_xO$ رسم شده اند. به کمک شکل ۵ گاف اپتیکی نمونه ها (با خطای $\pm 0.02\text{ eV}$) اندازه گیری شدند و جدول ۱ نوشته شده اند؛ که کاهش گاف اپتیکی را با آرایش نیکل برای اکسید روی نشان می دهد. این کاهش گاف می تواند به دلیل برهم کنش تبدیلی $sp-d$ بین الکترون های نواری (اوربیتال s مربوط به اتم روی و اوربیتال p مربوط به اتم اکسیژن) و الکترون های d یون های Ni^{2+} باشد. این برهم کنش منجر به تولید ترازهای جدیدی زیر نوار رسانش شده و در نتیجه گاف کاهش یافته است [۱۴].

به منظور بررسی اثر آرایش نیکل بر جذب اپتیکی و نیز گاف اپتیکی اکسید روی، طیف های جذب UV نمونه ها گرفته شدند. شکل ۴ طیف های UV-vis نمونه های $Zn_{1-x}Ni_xO$ با x برابر ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۳ را نشان می دهد. این طیف ها افزایش بیشینه طول موج جذب اپتیکی از ۳۵۳/۵ نانومتر برای نمونه ی خالص به ۳۷۳/۵ نانومتر برای نمونه ی سه درصد نیکل را نشان می دهند که می تواند به دلیل کاهش گاف اپتیکی رخ داده باشد.

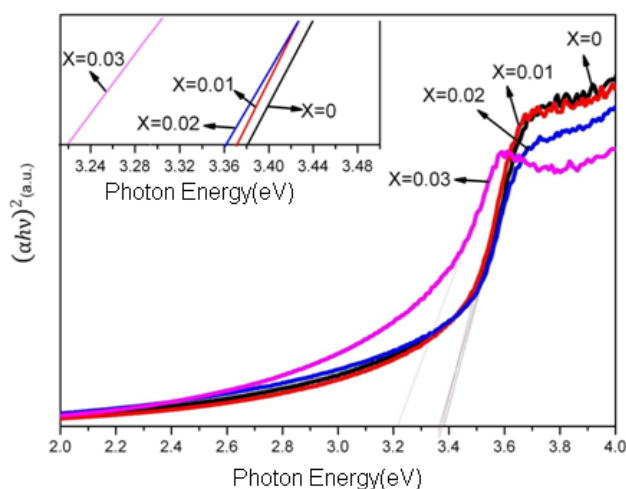
برای تعیین گاف اپتیکی نمونه ها، از داده های طیف UV-vis و رابطه ی ۵ استفاده شده است [۱۶، ۱۵]:

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

که در آن $h\nu$ انرژی فوتون فرودی، α ضریب جذب اپتیکی که معمولاً محور عمودی طیف UV در نظر گرفته می شود، A



شکل ۴ طیف جذب UV نمونه های $Zn_{1-x}Ni_xO$



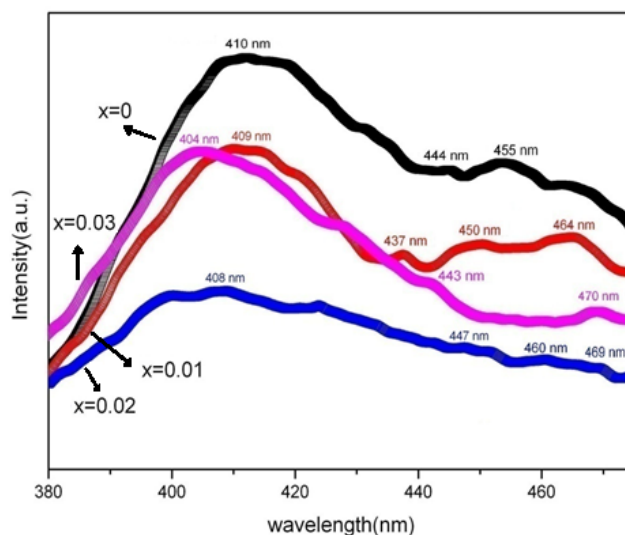
شکل ۵ نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب $h\nu$ نمونه های $Zn_{1-x}Ni_xO$ بزرگ شده ی شکل در محدوده ی گاف.

نشر مرئی بالا، به نشرهای ۴۳۷، ۴۵۰ و ۴۶۴ نانومتر در نمونه-ی یک درصد نیکل، ۴۴۷، ۴۶۰ و ۴۶۹ نانومتر در نمونه-ی دو درصد نیکل و ۴۷۰ نانومتر در نمونه-ی آلایش یافته با سه درصد نیکل انتقال یافته است؛ شدت این قله‌ها با آلایش نیکل نسبت به نمونه-ی خالص کاهش یافته است که می‌تواند به دلیل کاهش تهی‌جاها روی با ورود نیکل رخ داده باشد [۱۷].

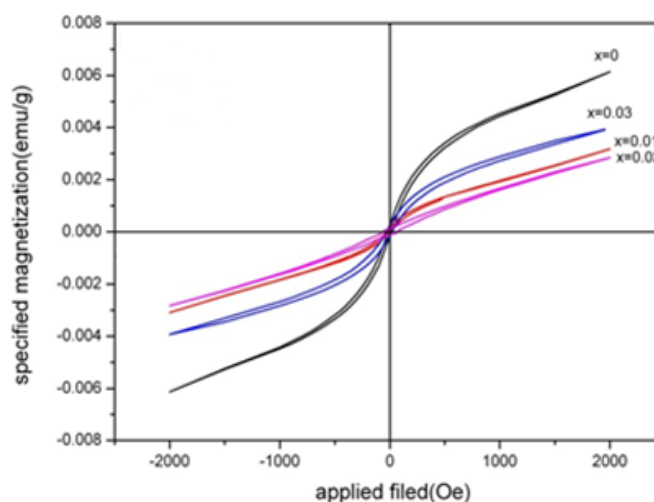
به منظور بررسی خواص مغناطیسی نمونه‌های $Zn_{1-x}Ni_xO$ از نتایج VSM استفاده شده است. با توجه به تکرار آزمایش‌ها مشاهده شد که نتایج در میدان‌های ضعیف و قوی با هم متفاوت‌اند. شکل‌های ۷ و ۸ نتایج VSM را در میدان‌های ضعیف (از صفر تا حدود ۲۰۰۰ Oe) و شدید (بزرگتر از ۵۰۰۰ Oe) نشان می‌دهند.

روش بسیار مناسبی برای به دست آوردن اطلاعات مفید وابسته به خواص اپتیکی نیم‌رساناها، بررسی طیف PL است. نتایج PL وابسته به نمونه‌های $Zn_{1-x}Ni_xO$ در شکل ۶ مشاهده می‌شوند. نمونه‌ی خالص دارای یک قله‌ی چشمگیر و پهن به-مرکزیت ۴۱۰ نانومتر است که به تابش فرابنفش و تابش نزدیک لبه‌ی نواری معروف است. این قله در نمونه‌ی آلایشه با یک، دو و سه درصد نیکل به ترتیب به قله‌های ۴۰۹، ۴۰۸ و ۴۰۴ نانومتر انتقال یافته و شدت آن نسبت به نمونه‌ی خالص کاستی گرفته که کاهش شدت گسیل غیر تابشی را نشان می‌دهد.

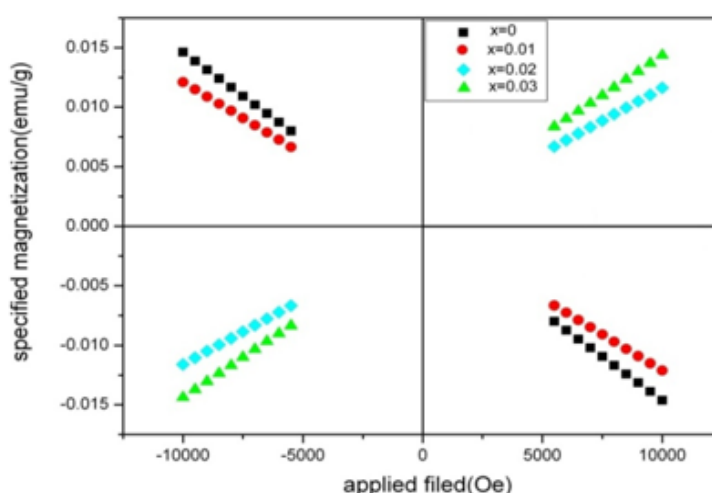
نمونه‌ی خالص نیز دارای دو قله‌ی تابشی تراز عمیق به-مرکزیت ۴۴۴ و ۴۵۵ نانومتراند. این قله‌ها از نشر آبی و معمولاً از نقص‌های شبکه از جمله جای خالی روی ناشی می‌شوند. دو



شکل ۶ طیف PL نمونه‌های $Zn_{1-x}Ni_xO$.



شکل ۷ نتایج VSM نمونه‌های $Zn_{1-x}Ni_xO$ در میدان‌های ضعیف.



شکل ۸. نتایج VSM نمونه‌های $\text{Zn}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}$ در میدان‌های قوی.

افزایش میدان مغناطیسی، انرژی مغناطیسی داده شده به-سیستم باعث از بین رفتن این جفت شدگی بین تهی-جا-حفره-یون اکسیژن شده و حالت فرومغناطیسی از بین رفته و حالت دیامغناطیس در میدان‌های قوی‌تر ظاهر می‌گردد. ایجاد حالت پارامغناطیس در میدان‌های قوی‌تر با افزایش آلایش نیکل، می‌تواند به دلیل حضور اتم مغناطیسی نیکل در ساختار اکسید روی باشد.

برداشت

در این پژوهش، نانوذرات $\text{Zn}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}$ با x برابر ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۸ و ۰/۱ به روش مکانوشیمیایی تولید شدند. نمونه‌ها تا x برابر ۰/۰۳ تک فاز بوده و در x برابر ۰/۰۴ اثر فاز ناخالصی وابسته به $\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{O}$ در شبکه ظاهر می‌شود. بررسی خواص ساختاری نمونه‌های تک فاز نشان داد که با آلایش نیکل؛ پارامترهای شبکه‌ی ششگوشی و رتسایت اکسید روی کاهش می‌یابند؛ و نیز میانگین اندازه‌ی ذرات و بلورک‌ها افزایش می‌یابد. بررسی خواص اپتیکی نشان می‌دهد که با آلایش نیکل در ساختار ZnO ، گاف اپتیکی کاهش خواهد یافت. نتایج PL نشان می‌دهند که نمونه‌ی خالص دارای یک قله به-مرکزیت ۴۱۰ نانومتر است که به نشر فرابنفش وابسته است و با آلایش نیکل شدت آن کاهش می‌یابد که گسیل غیر تابشی را نشان می‌دهد. همچنین نمونه‌ی خالص دارای دو قله‌ی تابش تراز عمیق به مرکزیت ۴۴۴ و ۴۵۵ نانومتر است که تابش ۴۷۰ نانومتر در نمونه‌ی اکسید روی آلایش یافته با سه درصد نیکل انتقال می‌یابد. بررسی خواص مغناطیسی نشان می‌دهد که همه‌ی نمونه‌ها در میدان‌های ضعیف از صفر تا حدود ۲۰۰۰ Oe

چنانکه مشاهده می‌شود، نانوذرات خالص ZnO در میدان‌های ضعیف، خاصیت فرومغناطیسی از خود نشان داده‌اند. با توجه به اینکه اکسید روی توده خاصیت دیامغناطیس دارد [۱۸]، می‌توان گفت که خاصیت مغناطیسی اکسید روی در میدان-های ضعیف، به اندازه ذره وابسته است؛ به طوری که در حالت نانوذره از خود حالت فرومغناطیس نشان می‌دهد. همچنین در میدان‌های ضعیف، با ورود نیکل همچنان نانوذرات خاصیت فرومغناطیس دارند، ولی با ورود نیکل، مغناطش اندکی کاهش یافته است. این کاهش می‌تواند به این دلیل باشد که نانوذرات آلاییده با نیکل بزرگتر از نانوذرات نمونه‌ی خالص هستند. این نتیجه نشان می‌دهد که خاصیت مغناطیسی اکسید روی در میدان‌های ضعیف به اندازه‌ی ذره وابسته است. با افزایش میدان، مغناطش نمونه‌ها به اشباع نمی‌رسد و در میدان‌های قوی تغییر رفتار می‌دهند؛ لذا در میدان‌های شدید، نمونه‌ی اکسید روی خالص و یک درصد آلاییده با نیکل خاصیت دیامغناطیس دارند که به نظر می‌رسد در نمونه آلاییده با یک درصد نیکل، به دلیل پایین بودن آلایش، هنوز نیکل تأثیر خود را نگذاشته است، ولی با افزایش نیکل خاصیت دیامغناطیس به خاصیت پارامغناطیس تبدیل شده است.

معلوم شده است که در نانوذرات اکسیدهای دوتایی مانند ZnO ، جای خالی کاتیون‌ها (Zn^{2+} در ZnO) باعث ایجاد حفره در همسایگی یون‌های اکسیژن شده است که منجر به حالت پایه سه‌گانه می‌شود، که این می‌تواند مسئول حالت فرومغناطیس در نانوذرات اکسید فلزی (که در حالت توده‌ای دارای خاصیت دیامغناطیس هستند) باشد [۲۰، ۱۹]. به نظر می‌رسد که با

nanoparticles obtained by mechanochemical technique and the optical properties", Surface Science 601(2007) 2850–2854.

[11] Mao X., Zhong W., Du Y., "Ferromagnetism of Ni cluster in Ni-doped ZnO by solid state reaction", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320(2008) 1102–1105.

[12] Malaeru T., Neamtu J., Morari C., Sbarcea G., "structural and magnetic properties of nanocrystalline powders of Ni – doped ZnO diluted magnetic conductors synthesized by sol-gel method", Revue Roumaine de Chimie 57(9-10) (2012) 857-862.

[۱۳] پورمقدم ا.، زرگروشتری م.، فرید م.، "تعیین شرایط بهینه تولید نانوذرات اکسید روی به روش مکانوشیمیایی"، بیست و دومین همایش بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دانشگاه شیراز (۱۳۹۳).

[14] Elilarassi R., Chandrasekaran G., "Structural, optical and magnetic properties of nanoparticles of ZnO:Ni—DMS prepared by sol–gel method", Materials Chemistry and Physics 123 (2010) 450-455.

[15] Elilarassi R., Chandrasekaran G., "Synthesis, structural and optical characterization of Ni-doped ZnO nanoparticles", J Mater Sci: Mater Electron 22 (2011) 751-756.

[16] Shinde K. P., Pawar R. C., Sinha B. B., Kim H. S., Oh S. S., Chung K. C., "Optical and magnetic properties of Ni doped ZnO planetary ball milled nanopowder synthesized by co-precipitation", Ceramics International 40 (2014) 16799–16804.

[17] Srinet G., Kumar R., Sajal V., "Effects of Ni doping on structural, optical and dielectric properties of ZnO", Ceramics International 39 (2013) 7557-7561.

[18] Straumal B. B., Mazilkin A. A., Protasova S. G., Straumal P. B., Myatiev A. A., Schutz G., Goering E. J., Tietze T., Baretzky B., "Grain boundaries as the controlling factor for the ferromagnetic behaviour of Co-doped ZnO", Philosophical Magazine 93 (2013) 1371–1383.

[19] Sundaresan A., Rao C. N. R., "Ferromagnetism as a universal feature of inorganic nanoparticles", Nano Today 4 (2009) 96-106.

[20] Hong N. H., Sakai J., Poirrot N., Brize V., "Room-temperature ferromagnetism observed in undoped semiconducting and insulating oxide thin films", Phys Rev B 73 (2006) 132404-132408.

خاصیت فرومغناطیسی دارند که در میدان‌های شدیدتر از ۵۰۰۰ Oe نمونه‌ی اکسید روی خالص و یک درصد آلاییده با نیکل خاصیت دیامغناطیسی نشان می‌دهند، ولی با افزایش نیکل خاصیت دیامغناطیسی به‌خاصیت پارامغناطیسی تبدیل می‌شود.

مراجع

[1] Echresh A., Zargar Shoushtari M., "Synthesis of Al-doping ZnO nanoparticles via mechanochemical method and investigation of their structural and optical properties", Materials Letters 109 (2013) 88–91.

[2] Tsuzuki T., McCormick P. G., "ZnO Nanoparticles Synthesised by mechanochemical processing", Scripta mater 44 (2001) 1731–1734.

[3] El-Hilo M., Dakhel A. A., Ali-Mohamed A. Y., "Room temperature ferromagnetism in nanocrystalline Ni-doped ZnO synthesized by co-precipitation", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 321(2009) 2279–2283.

[4] Khorsand Zak A., Majid W. H. A., Abrishami M. E., Yousefi R., Parvizi R., "Synthesis, magnetic properties and X-ray analysis of $Zn_{0.97}X_{0.03}O$ nanoparticles ($X = Mn, Ni, \text{ and } Co$) using Scherrer and size strain plot methods", Solid State Sciences 14(2012) 488-494.

[5] Udayakumar S., Renuga V., Kavitha K., "synthesis and characterization of Ni – doped ZnO by chemical precipitation method", international journal of recent scientific research 3(2012) 118-122.

[6] Elilarassi R., Chandrasekaran G., "Synthesis, Structural and Magnetic Characterization of Ni-Doped ZnO Diluted Magnetic Semiconductor", American Journal of Materials Science 2 (2012) 46-50.

[7] Zhang Y., Chen E., Shi, Z., "Magnetic properties of different temperature treated Co- and Ni-doped ZnO hollow nanospheres", Materials Science in Semiconductor Processing 13 (2010) 132–136.

[8] Dietl T., Ohno H., Matsukura F., Cibert J., Ferrand D., "Zener model description of ferromagnetism in zinc-blende magnetic semiconductors", Science 287 (2000) 22-1019.

[9] Wibowo J. A., Djaja N. F., Saleh R., "Cu- and Ni-doping effect on structure and magnetic properties of Fe-doped ZnO nanoparticles", Advances in materials physics and chemistry 3 (2013) 48-57.

[10] Moballegh A., Shahverdi H. R., Aghababazadeh R., Mirhabibi A. R., "ZnO