

نقش ناهمسانگردیهای بلوری و شکلی بر خواص مغناطیسی نانوسیمهای کبالت و نیکل

روح ا... گلی پور، علی خیاطیان، عبدالعلی رضانی و محمد الماسی کاشی

پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان

(دریافت مقاله: ۸۵/۳/۹ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۱/۲۰)

چکیده

نانوسیمهای کبالت و نیکل با استفاده از قالب اکسید آلومینیوم حفره دار و انباشت الکتروشیمیایی متناوب با قطرهای مختلف و زمان انباشتهای متفاوت ساخته شد. برای نانوسیمهای نیکل با قطر ۳۰ نانومتر میدان وادارندگی با افزایش زمان انباشت ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد، در حالی که برای قطرهای بالاتر روند صعودی میدان وادارندگی با افزایش زمان انباشت تغییر نمی کند. به طور عام، افزایش قطر نانوسیم موجب کاهش وادارندگی می شود. برای نانوسیمهای کبالت بیشینه میدان وادارندگی به قطر ۳۰ نانومتر و زمان انباشت ۳۰ ثانیه مربوط است و با افزایش زمان انباشت میدان وادارندگی روند نزولی دارد. اثر ناهمسانگردی بلوری و شکلی بر خواص مغناطیسی نانوسیمهای کبالت و نیکل بررسی شد و مشخص گردید که ناهمسانگردی بلوری برای نانوسیمهای کبالت نقش غالب را ایفا می کند در حالی که برای نانوسیمهای نیکل رقابت دو ناهمسانگردی شکلی و بلوری تعیین کننده می باشد.

واژه های کلیدی: نانوسیمهای کبالت، نانوسیمهای نیکل، ناهمسانگردی بلوری، ناهمسانگردی شکلی، آلومینای حفره دار

۱. مقدمه

حفره دار می توان به فیلمهای پلیمری پلی کربنات، پلی آمید و کوپلیمرها و نیز فیلمهای آلومینا اشاره نمود که با پر نمودن آنها توسط اتمهای مورد نظر نانوسیمهای دلخواه تولید می شود [۱۰ و ۱۱]. اگر چه رشد حفره ها درون آلومینا با استفاده از الکترولیتهای اسیدی مناسب برای کاربردهای متنوع به مدت چندین دهه مورد مطالعه بوده است، ولی برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ میلادی نشان داده شد که با آندی کردن آلومینیوم تحت شرایط خاص می توان یک ساختار حفره دار فوق العاده منظم با یک شبکه شش گوشه تولید نمود که بستر مناسبی برای ساخت نانوسیمهای با نسبت طول به قطر بسیار بزرگ می باشد [۱۲]. پس از آن گروههای مختلفی در زمینه ساخت نانوحفره ها درون فیلم آلومینا و یافتن شرایط بهینه برای افزایش نظم آرایه ای تلاش کرده اند [۱۳-۱۶]. در این زمینه ساخت آلومینای آندی با حفره هایی با قطر قابل کنترل بین ۴ تا ۲۰۰ نانومتر،

در طی دو دهه گذشته ساخت و کاربرد نانوسیمها توجه پژوهشگران زیادی را به خود معطوف ساخته است و در این مدت روشهای ساخت مختلفی مطرح شده است. از جمله این روشها می توان به لیتوگرافی [۱]، لیتوگرافی چاپ نانویی [۲]، استفاده از میکروسکوپیهای پروبی روبشی [۳ و ۴] و روش قالب [۵ و ۶] اشاره نمود. روش قالب به دلیل توانایی بالای آن در تولید آرایه ای از نانوسیمها و سهولت و هزینه کم ساخت نسبت به دیگر روشها توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. در روش قالب، استفاده از ساختارهای حفره ای که دارای کانالهای ریز یکنواخت در مقیاس نانومتری هستند به عنوان بستر مناسبی برای ساخت ابزار نانومتری از قبیل ادوات مغناطیسی، اپتیکی، اپتوالکترونیکی و نیز ساخت شبکه ای از ترانزیستورهای اثر میدانی مطرح شده است [۷-۹]. از جمله این ساختارهای

قرار گرفت و با ساخت نانوسیمهای نیکل با قطر ۳۵ نانومتر و فاصله بین حفره‌های ۱۰۵ نانومتر، زمان آندسازی مرحله اول را از ۳ ساعت به ۷۲ ساعت رساندند (زمان آندسازی مرحله دوم در هر دو حالت ۲ ساعت است) و افزایش وادارندگی از ۷۲۰ به ۹۶۰ اورستد مشاهده شد [۲۳].

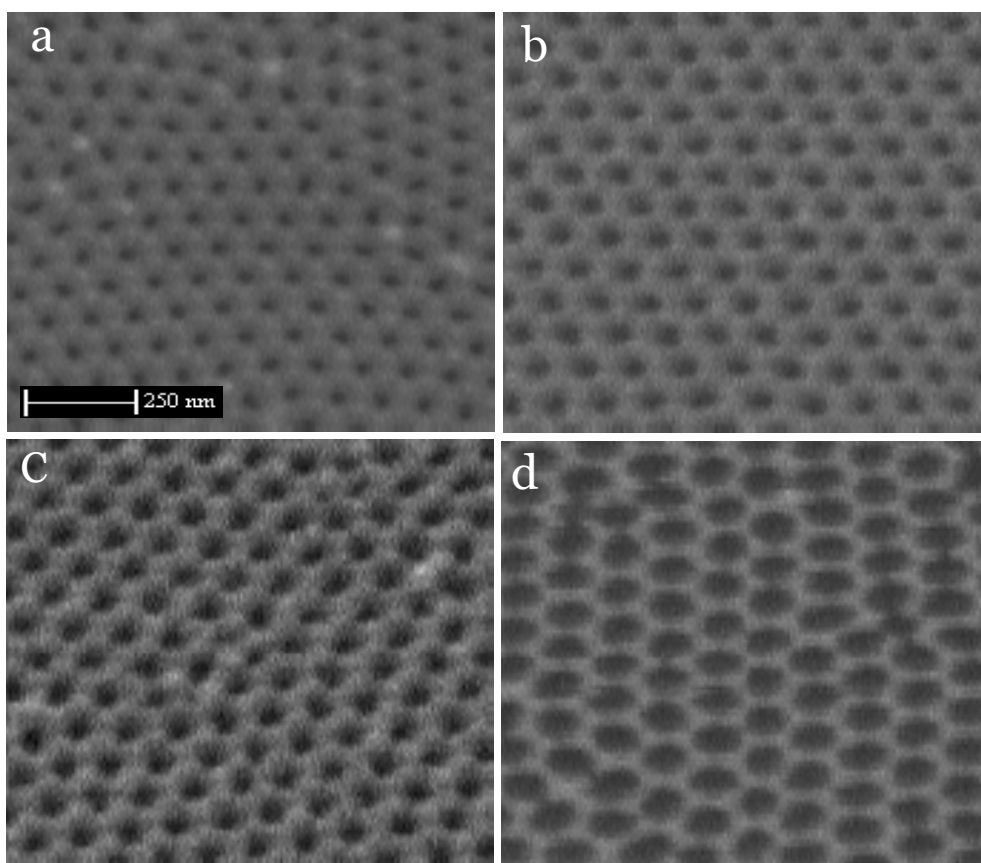
در این مقاله با ایجاد نانوحفره‌های منظم درون قالب آلومینا با فاصله حدود ۱۰۰ نانومتر، نانوسیمهای کبالت و نیکل با قطرهای متفاوت و زمانهای انباشت مختلف ساخته شد و رقابت ناهمسانگردی بلوری و شکلی در بررسی خواص مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲. روش ساخت

ورقه آلومینیوم با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر و با درجه خلوص ۹۹/۹۹٪ با استون و آب دوبار تقطیر شسته شد تا چربی و دیگر آلودگیها از سطح نمونه برطرف شود. آنگاه نمونه برای آزادسازی تنشهای حاصل از بریدن قطعه، درون کوره و در مجاورت هوا به مدت ۳ ساعت تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تابکاری شد و سپس لایه اکسید تشکیل شده روی سطح آلومینیوم، درون محلول سود سه مولار به مدت ۳ دقیقه برطرف گردید. پس از آن نمونه توسط محلولی شامل اتانول و اسید پرکلریک که به نسبت حجمی چهار به یک مخلوط شده بودند در جریان ثابت ۱۰۰ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع الکتروپولیش گردید. در طی این فرایند سطح آلومینیوم کاملاً صاف و صیقلی می‌شود. آنگاه نمونه در محلول اسید اکسالیکی ۰/۳ مولار در دمای ۱۷ درجه سانتی‌گراد و با اعمال ولتاژ مستقیم ۴۰ ولت آندی گردید. بعد از ۱۵ ساعت آندی مرحله اول، نمونه را از سلول الکتروشیمیایی خارج کرده و با قرار دادن آن درون محلولی شامل اسید فسفریک و اسید کرمیک به ترتیب با غلظتهای ۰/۵ و ۰/۲ مولار، لایه ضخیم اکسید آلومینا که در مرحله اول آندی کردن ایجاد شده بود حل گردید. برای به دست آوردن حفره‌هایی که به عنوان قالب برای ساخت نانوسیمها مورد نیاز می‌باشد، برای بار دوم نمونه در شرایط آندی مرحله اول و به مدت دو ساعت آندی

فاصله بین حفره‌های ۱۰ تا ۵۰۰ نانومتر، طولهای متفاوت و چگالی بالای حفره‌ها در واحد سطح (10^{10} تا 10^{11} حفره در سانتی‌متر مربع) گزارش شده است.

ساخت نانوسیمهای مغناطیسی تک عنصری و آلیاژی در قالب آلومینا به منظور افزایش قدرت ذخیره اطلاعات مورد توجه قرار گرفته است [۱۷]. در بررسی خواص مغناطیسی نانوسیمهای مغناطیسی، می‌توان به دو عامل کلیدی میدان وادارندگی و نسبت مربعی بودن حلقه پسماند اشاره نمود. با الکتروانباشت اتمهای کبالت درون حفره‌های آلومینا و ساخت نانوسیمهای کبالت و اندازه‌گیری مقدار وادارندگی آنها در میدانهای مغناطیسی تابش شده تحت زوایای مختلف نشان داده شد که ناهمسانگردی شکلی نانوسیمها در امتداد محورشان باعث افزایش وادارندگی آنها به بیشینه مقدار خود می‌شود [۱۸]. گروه دیگری از محققان با ساخت نانوسیمهای کبالت با قطر و طولهای متفاوت مشاهده نمودند با افزایش قطر و کاهش طول، وادارندگی نانوسیمها کاهش می‌یابد [۱۹]. همچنین در مطالعه دیگری با ساخت نانوسیمهای کبالت در حضور میدان مغناطیسی اعمال شده عمودی و مماسی بر سطح فیلم و اندازه‌گیری وادارندگی عمود بر سطح فیلم و بررسی ساختار بلوری معلوم شد که محور آسان شش گوشه کبالت در امتداد میدان اعمال شده جهتگیری می‌نماید و به افزایش میدان وادارندگی می‌انجامد [۲۰]. گروهی از محققین با ساخت نانوسیمهای نیکل با قطر ۱۴۰ تا ۲۷۰ نانومتر و طول ۲ میکرومتر مشاهده کردند که با افزایش قطر نانوسیمها یک گذار از جهت مغناطش آسان به جهت مغناطش سخت اتفاق می‌افتد که آن را ناشی از ترکیب ناهمسانگردی شکلی و جفت شدگی مغناطواستاتیکی بین نانوسیمهای نیکل دانستند [۲۱]. مطالعه بر روی نانوسیمهای نیکل با قطر ۱۵ تا ۵۰ نانومتر نشان داد که وادارندگی نانوسیمها با قطر ۱۵ نانومتر در ۳۰۰ درجه کلون با افزایش طول از ۲۰۰ اورستد تا ۴۵۰ اورستد تغییر می‌کند و از ۱/۷ تا ۳۰۰ درجه کلون برای تمامی طولها با افزایش دما کاهش می‌یابد [۲۲]. بالاخره تأثیر افزایش زمان مرحله نخست آندسازی را بر روی وادارندگی مورد مطالعه



شکل ۱. تصویر SEM از حفره‌های با قطرهای متفاوت (a-۳۰، b-۴۰، c-۵۰ و d-۸۰ نانومتر).

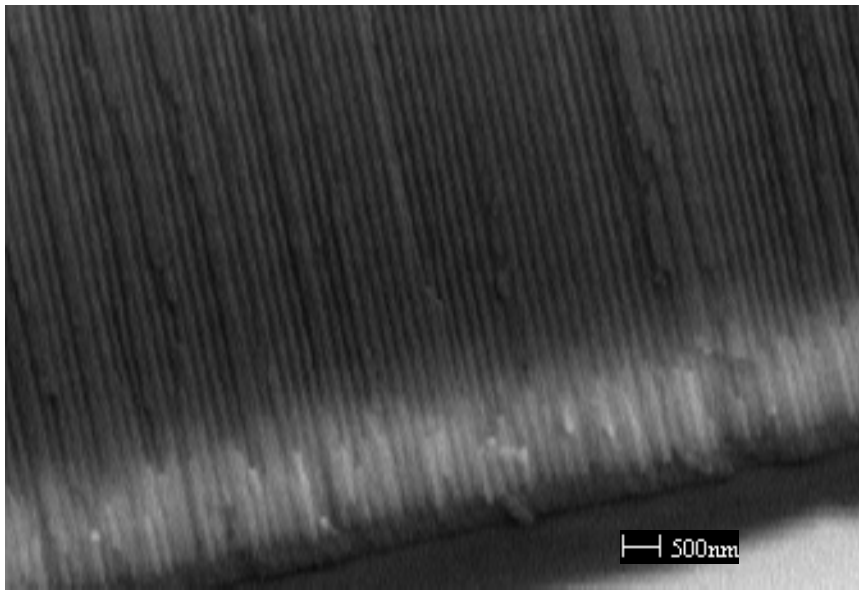
۰/۳ مولار جایگزین سولفات کبالت گردید. برای الکتروانباشت نانوسیمهای کبالت از ولتاژ سینوسی با مقدار قله به قله ۳۰ ولت و فرکانس ۲۵۰ هرتز استفاده شد و برای ساخت نانوسیمهای نیکل فرکانس ۵۰ هرتز مورد استفاده قرار گرفت. دمای الکتروانباشت ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد و مدت زمان انباشت برای کبالت ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ ثانیه و برای نیکل ۱۲۰، ۲۴۰ و ۳۶۰ ثانیه انتخاب گردید. در شکل ۲ تصویر عرضی فیلم آلومینای حفره دار که در آن نانوسیمهای کبالت انباشت شده است دیده می‌شود. در این تصویر از مد پس پراکندگی میکروسکوپ الکترونی روشی به منظور افزایش هر چه بیشتر میزان تشخیص بین عناصر بهره گرفته شده است.

۳. نتایج و بررسیها

حلقه‌های پسماند نمونه‌ها با استفاده از مغناطومتر گرادیان

شد. بدین ترتیب ساختار حفره‌ای منظم با حفره‌هایی با قطر و فاصله بین حفره‌ای به ترتیب ۳۰ و ۱۰۰ نانومتر و طولی در حدود ۱۲ تا ۱۴ میکرومتر تولید شد. سپس با استفاده از فرایند سونش شیمیایی درون محلول اسید فسفریک ۰/۵ مولار در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد در زمانهای ۸، ۱۶، ۲۴ و ۴۰ دقیقه، قطر حفره‌ها به ترتیب به ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ نانومتر افزایش یافت. بعد از تولید حفره‌ها در فیلم آلومینا، با کاهش تدریجی ولتاژ آندایز تا ۸ ولت و نازک نمودن لایه اکسید سدّی کف حفره‌ها، نمونه آماده الکتروانباشت گردید. شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از سطوح با حفره‌های با قطر متفاوت را نشان می‌دهد.

برای پر نمودن نانوحفره‌ها از روش انباشت الکتروشیمیایی تناوبی استفاده شد. برای تولید نانوسیمهای کبالت، الکترولیت مخلوطی از سولفات کبالت ۰/۳ مولار و اسید بوریک ۴۵ گرم در لیتر بود و برای ساخت نانوسیمهای نیکل سولفات نیکل



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوسیمهای کبالت درون قالب آلومینا.

می‌دهد. چنان که در شکل ۵ دیده می‌شود نانوسیمهای با قطر ۳۰ نانومتر و مدت انباشت ۳۰ ثانیه دارای میدان وادارندگی بیشینه با مقدار ۱۶۲۰ اورستد می‌باشند و افزایش زمان انباشت به کاهش میدان وادارندگی منجر می‌شود به طوری که برای نانوسیمهای با زمان انباشت ۲۴۰ ثانیه، وادارندگی به حدود ۸۱۰ اورستد کاهش می‌یابد. به همین ترتیب روند نزولی وادارندگی با زمان انباشت برای سه قطر ۴۰، ۵۰ و ۸۰ نانومتر نیز دیده می‌شود. با وجود آنکه با افزایش مدت زمان انباشت، طول نانوسیمها و در نتیجه ناهمسانگردی شکلی افزایش می‌یابد، انتظار می‌رود که مقدار میدان وادارندگی با افزایش طول افزایش یابد، اما در اندازه‌گیریهای انجام شده روی نمونه‌ها خلاف این موضوع دیده شد (شکل ۵). برای توجیه روند نزولی وادارندگی با افزایش طول، الگوهای حاصل از پراش اشعه ایکس نانوسیمها مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که پس از انباشت، بستر آلومینیوم همچنان در زیر لایه آلومینا باقی است و خطوط طیفی آلومینیوم مانع شناسایی دقیق کبالت بود، برای بررسی الگوی پراش نانوسیمهای کبالت، بستر آلومینیومی از پشت فیلمها برداشته شد. شکل ۶ الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌هایی با قطر ۳۰ نانومتر که با زمانهای ۳۰ و ۲۴۰ ثانیه الکتروانباشت شده‌اند را نمایش می‌دهد.

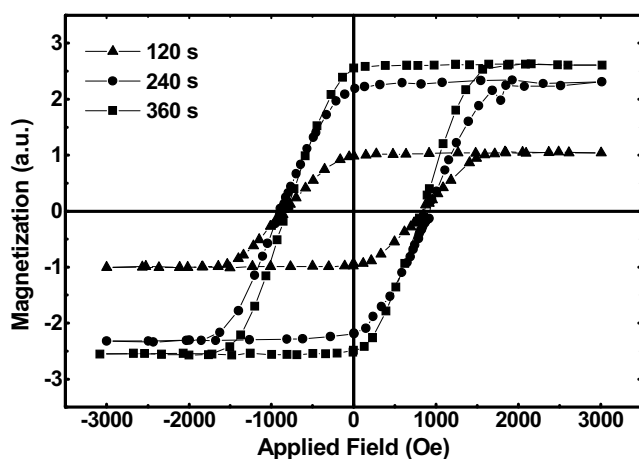
نیروی متناوب^۱ AGFM رسم شد. دقت اندازه‌گیری این مغناطومتر در حدود ۱۰ اورستد است. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب حلقه‌های پسماند نانوسیمهای کبالت و نیکل با قطر ۳۰ نانومتر و زمانهای انباشت متفاوت نشان داده شده است.

۴. خواص مغناطیسی نانوسیمهای کبالت

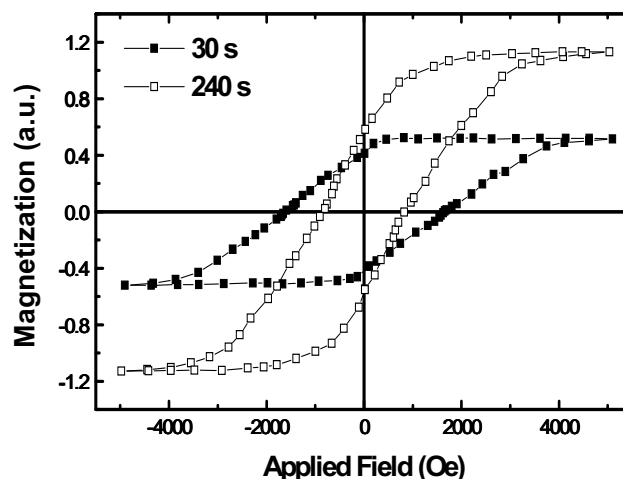
مقدار میدان وادارندگی در امتداد نانوسیمهای کبالت با استفاده از حلقه‌های پسماند اندازه‌گیری شده است و مقدار آن به صورت تابعی از قطر نانوسیم برای زمانهای انباشت متفاوت در شکل ۵ دیده می‌شود.

همان طور که شکل ۵ نشان می‌دهد میدان وادارندگی در امتداد طول نانوسیمها به طور متوسط بیش از ۱۰۰۰ اورستد می‌باشد که چند ده مرتبه از مقدار وادارندگی کبالت در حالت توده‌ای بزرگتر است. همچنین میدان وادارندگی برای نانوسیمهای کبالت به مراتب از مقدار آن برای لایه‌های نازک کبالت بزرگتر است. درحقیقت حضور Al_2O_3 به عنوان ماده غیر مغناطیسی میان سیمهای مغناطیسی باعث کاهش اثر نیروهای دوقطبی مبادله شده میان نانوسیمها می‌گردد و در نتیجه وادارندگی مغناطیسی آنها را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش

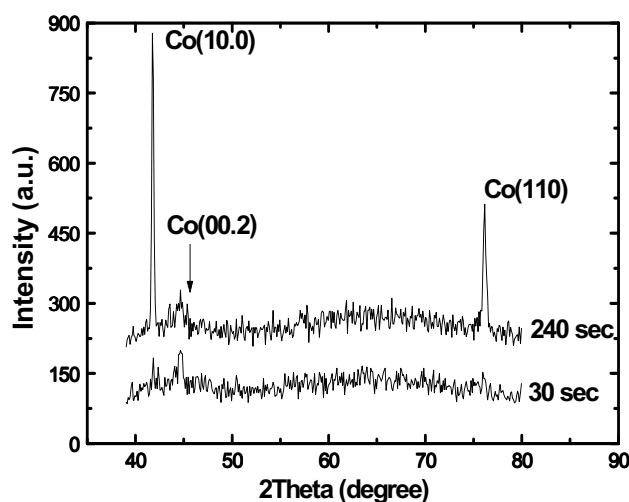
۱. Alternating Gradient Force Magnetometer



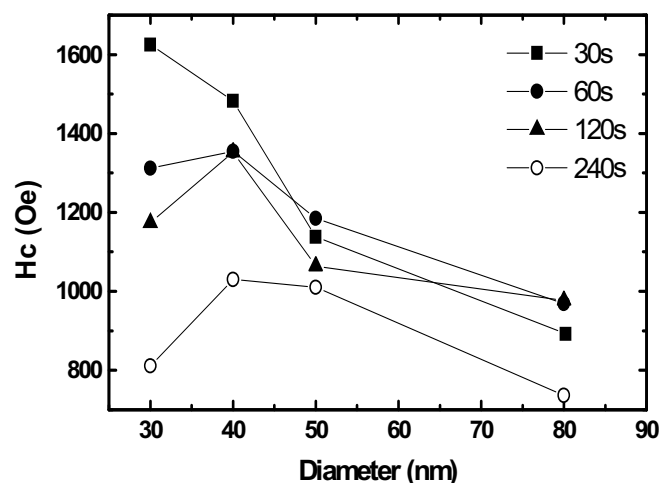
شکل ۴. حلقه‌های پسماند نانوسیمهای نیکل با قطر ۳۰ نانومتر و زمانهای انباشت مختلف.



شکل ۳. حلقه‌های پسماند نانوسیمهای کبالت با قطر ۳۰ نانومتر و زمانهای انباشت مختلف.



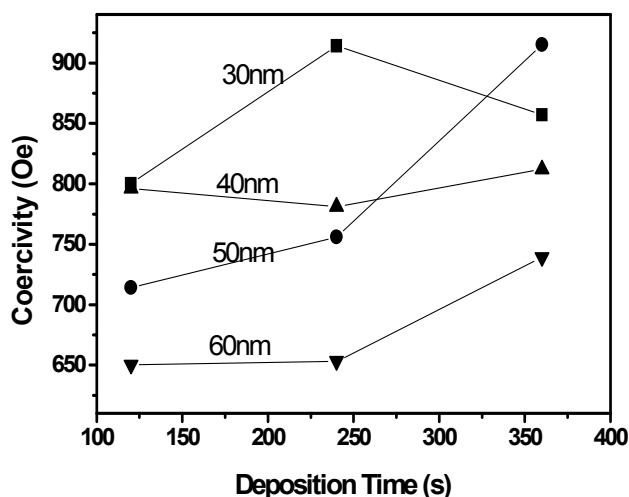
شکل ۶. الگوی پراش اشعه ایکس نانوسیمهای کبالت با قطر ۳۰ نانومتر و زمانهای انباشت ۲۴۰ و ۳۰ ثانیه.



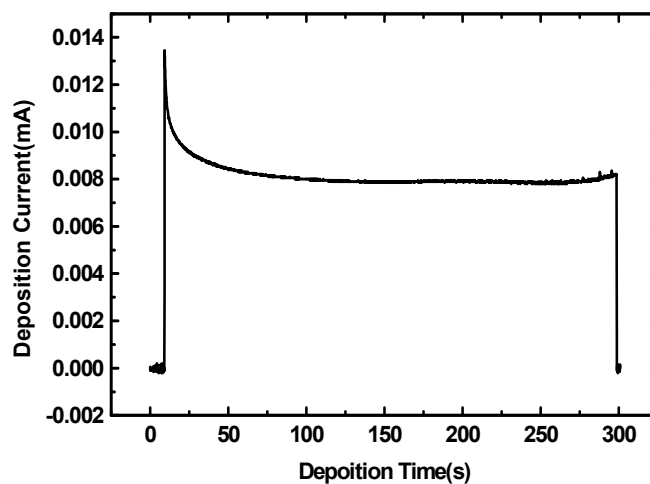
شکل ۵. نیروی وادارندگی در امتداد طول نانوسیمهای کبالت برحسب قطر سیمها برای زمانهای انباشت مختلف.

ترجیحی می‌باشد که بیانگر توازی محور آسان با محور نانوسیمها می‌باشد و لذا ناهمسانگردی بلوری و ناهمسانگردی شکلی در یک راستا بوده و اثر سازنده روی یکدیگر دارند و بدین دلیل وادارندگی در این نمونه بیشینه مقدار را دارد. برای نمونه با زمان انباشت ۲۴۰ ثانیه خط طیفی (۱۰۰) خط ترجیحی اصلی است در حالی که خط طیفی (۰۰۲) دارای شدت کمی می‌باشد. بدین لحاظ با آنکه نانوسیمها در این نمونه دارای بیشترین اثر ناهمسانگردی شکلی در راستای محور سیم می‌باشند ولی به علت آنکه محور آسان ساختار شش گوشه

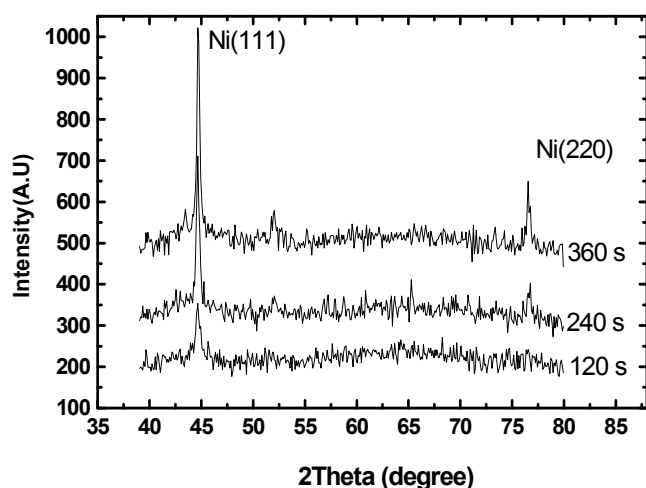
از الگوهای پراش نانوسیمهای کبالت آشکار است که فاز ساختاری نانوسیمها شش گوشه تنگ پکیده می‌باشد که دارای خطوط طیفی در زوایای $41/7^\circ$ ، $44/6^\circ$ و $76/1^\circ$ درجه به ترتیب مربوط به صفحات بلوری با جهات (۱۰۰)، (۰۰۲) و (۱۱۰) است. چنانکه می‌دانیم خطوط طیفی (۱۰۰) و (۱۱۰) بیانگر حضور محور آسان عمود بر محور نانوسیم می‌باشد در حالی که حضور خط طیفی (۰۰۲) بیانگر چرخش محور شش گوشه موازی محور نانوسیم است [۲۴]. در نمودار پراش می‌توان دید که برای نمونه با زمان انباشت ۳۰ ثانیه، خط طیفی (۰۰۲) خط



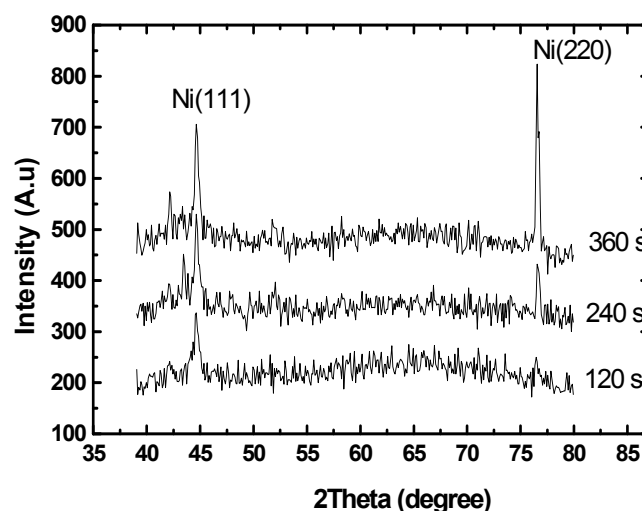
شکل ۸. میدان وادارندگی بر حسب زمان انباشت برای نانوسیمهای نیکل با قطرهای مختلف.



شکل ۷. منحنی جریان انباشت بر حسب زمان انباشت.



شکل ۱۰. الگوی پراش پرتو ایکس از نانوسیمهای نیکل با قطر ۶۰ نانومتر و زمانهای انباشت مختلف.



شکل ۹. الگوی پراش پرتو ایکس از نانوسیمهای نیکل با قطر ۳۰ نانومتر و زمانهای انباشت ۲، ۴ و ۶ دقیقه.

می‌تواند به رشد بلورها با جهتگیری محور آسان هم راستا با طول نانوسیمها منجر شود. اما با گذشت زمان نرخ رشد کاهش یافته و جهت قرارگیری محور آسان به سمت امتداد عمود بر محور نانوسیمها تغییر می‌نماید. همچنین در الگوی پراش نانوسیمهای با زمان انباشت ۳۰ و ۲۴۰ ثانیه (شکل ۶) شدت خط طیفی (۰۰۲) تقریباً یکسان می‌باشد که بیانگر رشد نانوسیمها با جهت ترجیحی محور آسان در امتداد محور سیم در آغاز انباشت در هر دو نمونه می‌باشد. عامل دیگری که تأثیر تغییرات آن روی وادارندگی

کاملاً به سمت جهت عمود بر محور نانوسیم متمایل گردیده است میدان وادارندگی به کمترین مقدار خود در حدود ۸۱۰ اورستد می‌رسد. همین روند میدان وادارندگی برای نانوسیمهایی با قطرهای بزرگتر نیز برقرار است. به نظر می‌رسد تفاوت جهتگیری محور آسان در زمانهای انباشت کوتاه و بلند به چگونگی انباشت در شروع فرایند الکتروانباشت مرتبط باشد. شکل ۷ تغییرات جریان الکتروانباشت نسبت به زمان را نشان می‌دهد. جریان نسبتاً زیاد الکتروانباشت در آغاز فرایند بیانگر نرخ انباشت بیشینه بوده که

زمانهای انباشت مختلف نشان می‌دهد. برای نانوسیمهای با زمان انباشت ۱۲۰ ثانیه جهت (۱۱۱) جهت ترجیحی است در حالی که بعد از ۲۴۰ ثانیه انباشت، رشد بلور در جهت (۲۲۰) بیشتر می‌گردد و در نهایت در ۳۶۰ ثانیه جهت (۲۲۰) جهت ترجیحی رشد بلور در نانوسیمها می‌شود. البته چرخش جهت رشد بلوری در شکل ۱۰ نیز برای نانوسیمهای ۶۰ نانومتری به خوبی مشاهده می‌شود با این تفاوت که در مورد این نانوسیمها جهت (۱۱۱) همچنان جهت ترجیحی باقی می‌ماند.

در نانوسیمهای با قطر ۳۰ نانومتر، در زمان انباشت ۱۲۰ ثانیه با توجه به اینکه جهت (۱۱۱) همان جهت آسان نانوسیم است بنابراین تنها ناهمسانگردی شکلی عامل موثر است. با زیادتر شدن زمان انباشت به ۲۴۰ ثانیه و یا به عبارتی افزایش طول نانوسیمها اگر چه ناهمسانگردی بلوری (با توجه به آنکه سیمها در جهت (۲۲۰) نیز رشد می‌کنند) تأثیر بیشتری پیدا می‌کند اما تأثیر ناهمسانگردی شکلی به دلیل افزایش طول همچنان غالب است و بنابراین وادارندگی نسبت به زمان انباشت ۱۲۰ ثانیه افزایش می‌یابد. سرانجام در زمان انباشت ۳۶۰ ثانیه هر چند طول نانوسیمها افزایش پیدا کرده است ولی به دلیل آنکه جهت (۲۲۰) جهت رشد ترجیحی می‌باشد و یا به عبارت دیگر محور آسان به سمت محور عمود بر نانوسیم می‌چرخد، به کاهش نیروی وادارندگی می‌انجامد حتی اگر طول نانوسیمها و به تبع آن ناهمسانگردی شکلی افزایش یابد.

در مورد نانوسیمهای با قطر ۶۰ نانومتر تحلیل مشابهی صادق است اما باید توجه داشت که در این قطر در زمان ۳۶۰ ثانیه جهت (۲۲۰) دیگر جهت ترجیحی نیست و بنابراین همچنان افزایش طول موجب افزایش ناهمسانگردی شکلی و در نتیجه افزایش وادارندگی می‌شود. با در نظر گرفتن این مشاهدات به نظر می‌رسد که رفتار چهار منحنی در شکل ۸ بر اساس رقابت بین تأثیر ناهمسانگردی شکلی و ناهمسانگردی بلوری قابل توجیه است.

مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته، تغییر قطر سیمها می‌باشد که نتایج آن در شکل ۵ دیده می‌شود. از منحنیهایی که وابستگی وادارندگی به قطر سیم (برای سیمهایی با طولهای متفاوت) را نشان می‌دهد آشکار است که برای نانوسیمهای ساخته شده با زمان انباشت ۳۰ ثانیه، با افزایش قطر سیمها میدان وادارندگی کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد با افزایش قطر نانوسیمها تعداد حوزه‌های مغناطیسی که در عرض سیم قرار می‌گیرند افزایش یافته و لذا کاهش وادارندگی مغناطیسی در میدان اعمال شده به موازات محور سیم را در پی خواهد داشت. همچنین این پدیده می‌تواند در اثر نزدیکتر شدن سیمها به یکدیگر باشد که موجب افزایش اثر نیروهای مغناطواستاتیک سیمها شده و در نتیجه میدان وادارندگی کاهش می‌یابد.

۵. خواص مغناطیسی نانوسیمهای نیکل

برای نانوسیمهای نیکل با استفاده از حلقه‌های پسماند، میدان وادارندگی مغناطیسی به صورت تابعی از زمان انباشت برای قطرهای متفاوت به دست آمده است که در شکل ۸ دیده می‌شود.

در شکل ۸ می‌توان دید که تغییرات نیروی وادارندگی بر حسب زمان انباشت برای نانوسیمهای به قطر ۳۰ نانومتر در مقایسه با دیگر قطرهای روند متفاوتی از خود به نمایش می‌گذارد به طوری که میدان وادارندگی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، اما برای دیگر قطرهای میدان وادارندگی با افزایش زمان انباشت روند تقریباً صعودی دارد. به منظور تحلیل و بررسی این موضوع از الگوهای پراش پرتو ایکس برای نانوسیمهای با قطر ۳۰ و ۶۰ نانومتر استفاده شد که این الگوها در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند.

در صورتی که بلورهای نیکل به صورت شبکه مرکز وجهی با جهت آسان (۱۱۱) در راستای محور نانوسیم رشد کند موجب افزایش میدان وادارندگی در جهت طول نانوسیم می‌گردد. شکل ۹ چرخش جهت ترجیحی رشد بلوری از (۱۱۱) به (۲۲۰) را برای نانوسیمهای با قطر ۳۰ نانومتر و

۶. نتیجه گیری نهایی

ناهمسانگردی بلوری بر ناهمسانگردی شکلی میدان وادارندگی روند نزولی دارد. برای نانوسیمهای نیکل از آنجا که ناهمسانگردی بلوری و ناهمسانگردی شکلی از مرتبه تقریباً یکسانی برخوردارند رقابت بین آنها به یک نقطه بیشینه میدان وادارندگی در زمان انباشت ۲۴۰ ثانیه منجر می شود. در هر دو مورد کبالت و نیکل با افزایش قطر نانوسیم و در نتیجه میل سیستم به سمت توده‌ای شدن، نقش عواملی نظیر برهمکنش حوزه‌های مغناطیسی و برهمکنش مغناطواستاتیک بین نانوسیمها افزایش می یابد و منجر به کاهش میدان وادارندگی می گردد.

ناهمسانگردی شکلی و ناهمسانگردی بلوری نقش عمده‌ای را در تعیین میدان وادارندگی نانوسیمهای کبالت و نیکل ایفا می کنند و اصولاً رقابت بین این دو در تعیین خواص مغناطیسی بسیار مؤثر است.

نتایج بررسیها بر روی نانوسیمهای کبالت نشان داد که با افزایش طول، میدان وادارندگی برای قطر ۳۰ نانومتر کاهش می یابد. این موضوع با توجه به رقابت دو ناهمسانگردی فوق قابل تفسیر است. با افزایش طول، ناهمسانگردی شکلی افزایش می یابد در حالی که محور آسان بلوری به جهت عمود بر محور نانوسیم می چرخد. با توجه به نقش غالب

مراجع

1. D Natelson, *Cond. Mat.* **1** (2003) 1.
2. J Martin, J Nogues and K Schullerc, *J. Magn. and Magn. Mate.* **256** (2003) 449.
3. A Baski, *Advanced Semiconductor and Organic Nano-techniques*, Part 3, Academic Press (2002).
4. Y Chen, J Hsu and H Lin, *Nanotechnology* **16** (2005) 1112.
5. Y Chen, A Douglas and A Ohlberg, *Appl. Phys. Lett.* **82** (2003) 1610.
6. H He and N Tao, *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology X*, **1** (2003).
7. K Nielsch, R Wehrspohn and S Fischer, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 705, Y. 9. 3. 1 (2002).
8. S Yang, H Zhu and G D L Yu, *J. Appl. Phys. D* **33** (2000) 2388.
9. H Wang, J Wang, and Y Liu, *J. Appl. Phys. Lett.* **98** (2004) 5171.
10. A Mukenga and J Rivas, *J. Appl. Phys.* **89** (2001) 3393.
11. T Albrecht, J Schotter and N Emley, *Science* **290** (2000) 2126.
12. H Masuda and K Fukuda, *Science* **268** (1995) 1466.
13. O Jessensky, F Muller and U Gosele, *J. Appl. Phys.*
14. S Shigubara, O Okino and Y Sayama, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36** (1997) 7791.
15. M Almasi Kashi and A Ramazani, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** (2005) 2396.
16. H Masuda, K Yada and A Osaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** (1998) L1340.
17. K Nielsch, F Müller and A Li, *Adv. Mater.* **12** (2000) 582.
18. S Yang, H Zhu and G Ni, *J. Appl. Phys. D* **33** (2000) 2388.
19. H Zeng, M Zheng and D J Sellmyer, *J. Appl. Phys.* **87** (2000) 4718.
20. G Shihui, L Chao and M Xiao, *J. Appl. Phys.* **90** (2001) 509.
21. L Tao, *Chin Appl. Phys. Lett.* **21** (2004) 729.
22. S Kato, H Kitazawa and G Kido, *J. Magnetism and Magnetic Matt.* **36** (2004) 272.
23. M Vazquez, K Pirota and M Prida, *J. Appl. Phys.* **95** (2004) 6642.
24. M Almasi Kashi, A Ramazani and A Khayyatian, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** (2006) 4130.