

خواص مغناطیسی نانو ذرات FeCo برای ذخیره سازی اطلاعات

سیدعلی سبط^۱، فرشته آذرخرمن^۲، مریم امیرحسینی^۲، سوزان ذوالریاستین^۳ و محمد اخوان^۴

۱. دانشکده فیزیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه تربیت مدرس

۳. دانشکده فیزیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی

۴. آزمایشگاه تحقیقاتی مغناطیس (MRL)، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۸۴/۹/۱۰ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۲/۹)

چکیده

دانه‌های مغناطیسی FeCo در اندازه‌های زیر میکرون با درصدهای مختلف کبالت در حضور میدانهای مغناطیسی رشد داده شده‌اند. پس از حذف یونهای اضافی و اکسیژن، عملیات گرمایی انجام گردیده و برخی از نمونه‌ها در بستر پلیمر در حضور میدان مغناطیسی جهت‌دار شدند. نتایج XRD، SEM و اندازه‌گیریهای مغناطیسی، وجود ناهمسانگردی مغناطیسی القایی در نمونه‌ها را تایید می‌کنند؛ به طوری که برای نمونه $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ حضور میدان در ضمن رشد دانه‌ها، وادارندگی را از ۸۲۰ Oe به ۱۶۰۰ Oe می‌رساند. اندازه‌گیری تغییرات زمانی مغناطش نمونه‌ها یک رابطه خطی بین ضریب پایداری مغناطیسی و وادارندگی را نشان می‌دهد. مغناطش پسماند نمونه‌های جهت‌دار به میزان ۲۵٪ افزایش یافته است. بالا بردن وادارندگی محیط برای افزایش ظرفیت ذخیره سازی مغناطیسی اطلاعات یک عامل اصلی است.

واژه‌های کلیدی: وادارندگی، مغناطش پسماند، ناهمسانگردی مغناطیسی، دانه‌های تک حوزه، ضبط مغناطیسی

۱. مقدمه

در مواد فرومغناطیس، همبستگی گشتاورهای مغناطیسی حاصل برهم‌کنش تبادلی است. از کمینه شدن مجموع انرژیهای تبادلی و مغناطواستاتیکی، ساختار حوزه‌ای نتیجه می‌شود [۱]. در لایه‌های نازک و یا دانه‌های ریز، ابعاد حوزه‌ها می‌تواند درست برابر اندازه دانه‌ها باشد [۲]. به این ترتیب، سیستمی از دانه‌های تک حوزه مغناطیسی به دست می‌آید و همبستگی تبادلی به گشتاورهای مغناطیسی درون هر حوزه محدود می‌شود. با وجود این، برهم‌کنش دو قطبیهای مغناطیسی که ضعیفتر و برد آن بلندتر است وجود دارد. ولی این برهم‌کنش مانع از کنترل موضعی مغناطش محیط نمی‌شود [۳].

ناهمسانگردی مغناطیسی دانه‌ها پایداری مغناطش موضعی را تضمین می‌کند و از این رو چنین محیطهایی برای ذخیره سازی مغناطیسی اطلاعات مناسب هستند. علاوه بر این، با افزایش ظرفیت ذخیره سازی و در نتیجه کاهش اندازه بیتها، میدان وامغناطش در ناحیه‌های گذار (بین دو بیت مجاور) موجب کاهش سیگنال می‌شود [۴] و بنابراین در ظرفیتهای بالا باید از محیطی با وادارندگی بالا استفاده کرد [۵]. در نتیجه، لازم است محیط از نظر مغناطیسی شدیداً ناهمسانگرد باشد.

برای یک دانه تک حوزه ناهمسانگرد که در یک میدان خارجی قرار دارد، انرژی به عنوان تابعی از زاویه جهت گیری بردار مغناطش، دارای دو کمینه و یک بیشینه است [۱]. اینکه

و اثر شرایط ساخت روی ناهمسانگردیهای مغناطیسی، H_c و M_r را بررسی کرده‌ایم. علاوه براین، تغییرات زمانی مغناطش این نمونه‌ها در میدانهای تابع پله‌ای و میدانهای با آهنگ تغییرات یکنواخت اندازه‌گیری شده و بین ضرایب تغییرات زمانی و پارامترهای تعادلی نمونه‌ها ارتباط برقرار می‌شود.

۲. آزمایشها

نمونه‌هایی از دانه‌های ریز $Fe_{1-x}Co_x$ با مقادیر مختلف x برای $0 < x < 1$ از ترکیبهای شیمیایی $FeSO_4$ و $CoCl_2$ با سدیم بورو هیدراید $NaBH_4$ در حضور میدانهای مغناطیسی مختلف $0, 0.5, 1, 1.5, 2$ kOe رشد داده شده‌اند. سپس، به منظور حذف یونهای اضافی، دانه‌های ریز تهیه شده با استفاده از مخلوط آب مقطر و استن شسته شدند. برای جلوگیری از اکسید شدن دانه‌ها از Na_2SO_3 در آب مقطر استفاده شده است. فرایند آب زدایی و اکسیژن زدایی با عبور گاز هیدروژن در لوله شیشه‌ای داخل کوره در دمای $200^\circ C$ به مدت ۹۰ دقیقه انجام شد. برای هر نمونه $FeCo$ شامل ۲۰ میلی گرم فلز، عبور گاز هیدروژن با آهنگ $2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ انجام شد، سپس در همان جو هیدروژن، دما تا $300^\circ C$ بالا برده شد. بعد از ۳۰ دقیقه نگهداری در این دما، نمونه‌ها در مدت ۳ ساعت تا دمای اتاق سرد شدند. چگونگی رشد شیمیایی دانه‌ها در حضور میدان مغناطیسی و عملیات گرمایی در شکل ۱ رسم شده است.

برای مشاهده ریزساختار محصول به دست آمده، تصویر SEM توسط دستگاه فیلیپس مدل XL۳۰ گرفته شده و برای تعیین ساختار بلوری نمونه‌های $FeCo$ ، طیف XRD توسط دستگاه فیلیپس مدل X-Pert تهیه شده است.

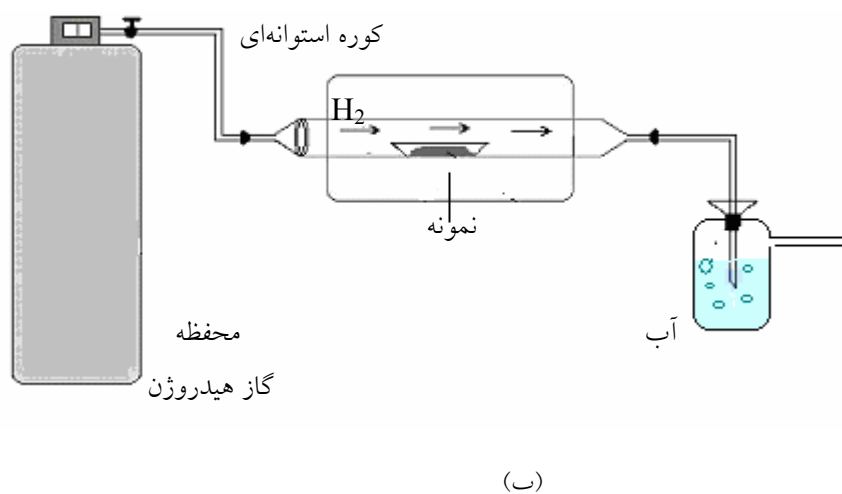
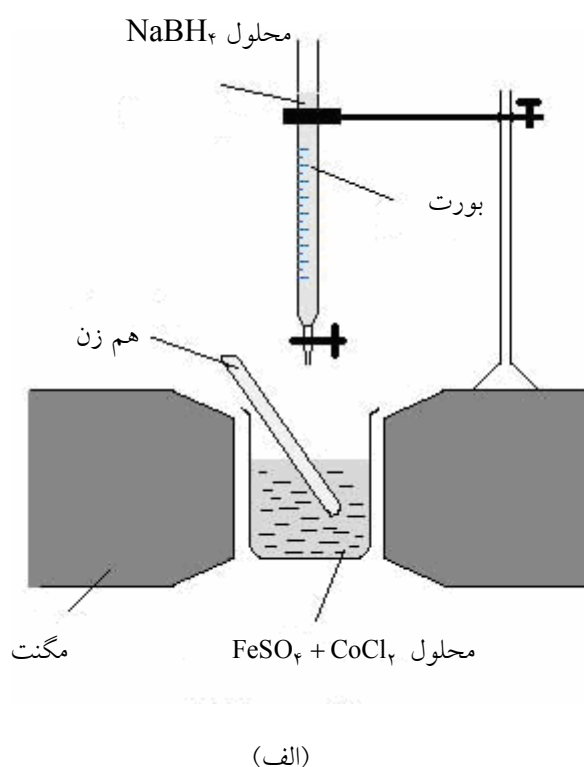
مغناطش دانه‌ها در میدانهای مغناطیسی مختلف و در جهت‌های مختلف با استفاده از دستگاه مغناطیس‌سنج با نمونه نوسانی^۱ (VSM) با حساسیت 10^{-3} emu و میدان مغناطیسی تا ۲۰ kOe با یکسانی ۱ در 10^5 اندازه‌گیری شده است. مبنای اندازه‌گیری مغناطش در این سیستم، سیگنال

جهت مغناطش متناظر با کدام یک از این دو کمینه باشد به جهت و اندازه میدان قبلی به کار رفته و نیز میدان فعلی بستگی دارد. اگر میدان معکوس شود در برابر معکوس شدن مغناطش یک سد انرژی وجود دارد. چنانچه اندازه میدان معکوس از وادارندگی بزرگتر باشد، سد انرژی به صفر رسیده و گذار انجام می‌شود. در عمل، به دلیل افت و خیز گرمایی، تعدادی از گشتاورهای مغناطیسی در میدانهای کوچکتر از مقدار فوق نیز تغییر جهت می‌دهند. در $|H| = H_c$ نیمی از گشتاورها معکوس گردیده و مغناطش محیط برابر صفر می‌شود. در مورد سیستمی از دانه‌های تک حوزه ناهمسانگرد بدون برهم‌کنش با توزیع زاویه‌ای تصادفی، وادارندگی و مغناطش پسماند برابر نصف اندازه آنها در دانه تک حوزه در جهت آسان است [۶]. تغییرات زمانی مغناطش نیز بستگی دارد به سد انرژی [۷] که حاصل ناهمسانگردی مغناطیسی و میدان به کار رفته است. این موضوع در میدانهای با تغییرات تابع پله‌ای و نیز میدانهای با آهنگ تغییرات یکنواخت قابل بررسی است.

دانه‌های تک حوزه $\gamma-Fe_2O_3$ برای ضبط مغناطیسی با ظرفیت پایین [۶]، CrO_2 و $Co-\gamma-Fe_2O_3$ در ظرفیتهای متوسط [۸] و پس از آن دانه‌های تک حوزه صفحه‌ای شش وجهی $BaFe_{12}O_{19}$ (باریوم فریت) [۹] و نیز دانه‌های تک حوزه فلزی برای ذخیره سازی مغناطیسی اطلاعات در ظرفیت بالا به کار می‌روند [۱۰]. به این ترتیب، در محیطهای دانه‌ای برای ضبط مغناطیسی، وادارندگی از ۳۰۰ Oe تا حدود ۲۰۰۰ Oe افزایش یافته است [۵]. با تهیه بافتهای جهت‌دار از این دانه‌ها می‌توان مغناطش پسماند را به حد اشباع نزدیک کرد و پهنای توزیع میدان کلیدزنی را کاهش داد [۱۱] تا نسبت سیگنال به نوفه افزایش یابد [۴]. با توجه به اهمیت کاربردی دانه‌های $FeCo$ ، مطالعه خواص مغناطیسی آنها و منشأ فیزیکی این خواص لازم به نظر می‌رسد.

در این مقاله، شرایط ساخت و خواص مغناطیسی دانه‌های تک حوزه $Fe_{1-x}Co_x$ و به ویژه $Fe_{0.7}Co_{0.3}$ را مطالعه کرده‌ایم، نتایج اندازه‌گیریها روی نمونه‌های ساخته شده را تحلیل

۱. Vibrating sample magnetometer



شکل ۱. الف) رشد دانه‌ها به روش شیمیایی در حضور میدان مغناطیسی، (ب) فرایند آب زدایی و اکسیژن زدایی با عبور گاز هیدروژن در لوله شیشه‌ای داخل کوره و عملیات گرمایی.

مدار، حذف می‌گردد. به منظور رسم حلقه‌های هیستریزس نمونه‌ها، میدان مغناطیسی به طور یکنواخت در ناحیه بین ۵/۰ kOe و ۵/۰ kOe- با آهنگهای ۶۶۰، ۳۳۰، ۱۳۳، ۶۶ تغییر داده شده است و سپس از روی حلقه‌های هیستریزس،

حاصل از نوسانات مکانیکی نمونه است. این سیگنال که با گشتاور مغناطیسی نمونه رابطه خطی دارد، در یک سری سیم لوله حساس القا می‌شود. اثر تغییرات احتمالی در دامنه یا فرکانس نوسانات، با استفاده از یک تقویت کننده تفاضلی در

خواص مغناطیسی نمونه‌ها تحلیل شدند.

به منظور بررسی تغییرات زمانی مغناطش هر یک از نمونه‌های ساخته شده $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ ، ابتدا نمونه را در میدان $12/5 \text{ kOe}$ به اشباع می‌رسانیم. سپس با اعمال یک میدان (معکوس) پله‌ای بر نمونه، روند کاهش زمانی مغناطش آن با استفاده از مگتومتر اندازه‌گیری شد. نتیجه این بررسی، برای نمونه‌های $\text{Fe}_{1/3}\text{Co}_{2/3}$ و Fe به ازای میدانهای پله‌ای $0, 0/5, -0/5, -1, -1/25 \text{ H}$ به دست آمده است.

تعدادی از نمونه‌ها را با پلیمر آلی PVC و حلال دی‌متیل فرم آمید مخلوط کرده و حاصل را در مدت ۸ ساعت آسیاب کردیم. آنگاه نمونه‌ها در بستر پلیمر در حضور میدان مغناطیسی خشک و جهت‌دار شدند. در این نمونه‌ها مقادیر دانه‌های $\text{Fe}_{1/3}\text{Co}_{2/3}$ را ۲، ۴، ۶ و ۲۰ میلی‌گرم و حجم پلیمر پلی‌وینیل کلراید (PVC) و محلول دی‌متیل فرم آمید اولیه هر کدام سه قطره با دو قطره استن برای هر نمونه بوده است. میدان مغناطیسی به کار رفته روی نمونه‌ها در مرحله جهت‌دار نمودن 2 kOe است.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. ناهمسانگردی و وادارندگی

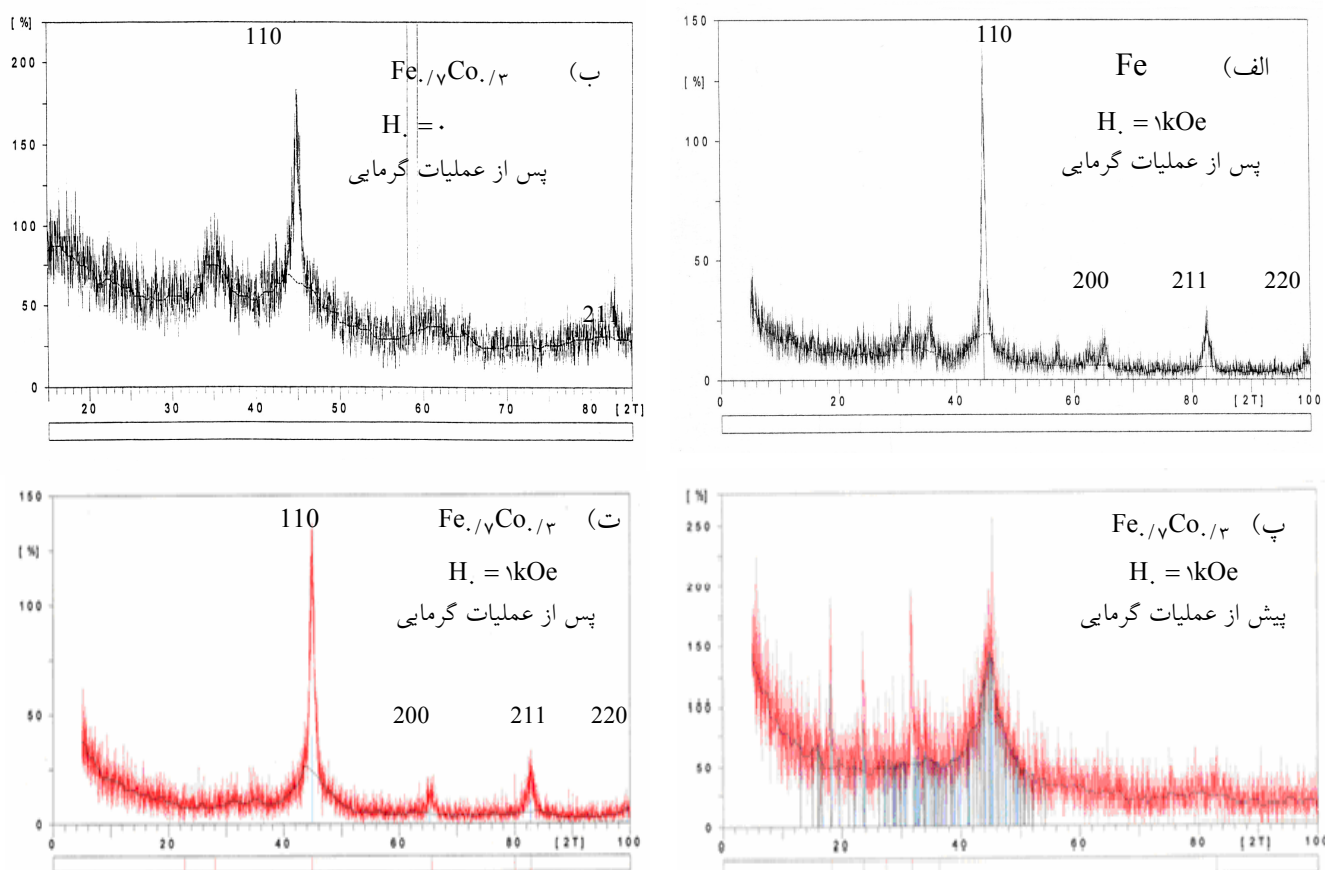
نتایج پراش پرتو X برای نمونه‌های $\text{Fe}_{1/3}\text{Co}_{2/3}$ و Fe که در میدانهای $H_c = 0$ و $H_c = 1 \text{ kOe}$ رشد داده شده‌اند، تحت شرایط مختلف عملیات گرمایی در شکل ۲ نشان داده شده است. نتیجه XRD در مورد نمونه‌های ساخته شده Fe و $\text{Fe}_{1/3}\text{Co}_{2/3}$ ساختار مکعبی bcc با ثابت شبکه $2/86 \text{ \AA}$ را نشان می‌دهد. از مقایسه شکل‌های (۲-الف) و (۲-ت) معلوم می‌شود که حضور ۳۰٪ کبالت، ساختار شبکه bcc آهن را تغییر نمی‌دهد. وجود اتمهای کبالت در بعضی از نقاط شبکه آهن در حضور میدان مغناطیسی و در هنگام رشد دانه‌ها و یا در ضمن عملیات گرمایی، ناهمسانگردی مغناطیسی القایی را در نمونه ایجاد می‌نماید که در نتیجه آن وادارندگی $\text{Fe}_{1/3}\text{Co}_{2/3}$ به میزان بیش از دو برابر Fe یعنی نزدیک به $1/6 \text{ kOe}$ می‌رسد (جدول ۱).

مقایسه نتایج XRD در شکل‌های (۲-پ) و (۲-ت) نشان می‌دهند که عملیات گرمایی باعث تکمیل ساختار بلوری می‌شود. در مقایسه با دانه‌های کبالت با شکل کروی (شکل ۳-ب) و ساختار fcc [۱۲] به نظر می‌رسد که حضور گشتاورهای مغناطیسی در نقاط شبکه bcc موجب می‌شود دانه‌های تک حوزه Fe و FeCo به شکل سوزنی رشد نمایند (شکل ۳-الف). به این ترتیب ناهمسانگردی شکلی تقویت و H_c افزایش می‌یابد.

تشکیل جفت اتمهای $\text{Fe} - \text{Co}$ در یک آرایش بلوری جهت‌دار منشأ این نوع ناهمسانگردی است. برای $\text{Fe}_{1/3}\text{Co}_{2/3}$ با رشد دانه‌ها در میدان حدود $H_c = 1 \text{ kOe}$ تعداد جفت‌های FeCo که در صفحات عمود بر میدان تشکیل می‌شوند، به بیشینه خود می‌رسد؛ زیرا با توجه به جدول ۲ در این میدان حداکثر وادارندگی برای نمونه به دست می‌آید.

میکروگرافهای SEM نمونه‌های $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ برای دو x مختلف در حضور دو میدان مغناطیسی H_c در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. این شکل‌ها به مرور در هر مورد در زیر به بحث گذاشته خواهند شد. دانه‌های مغناطیسی فلزی در اندازه‌های زیر میکرون تک حوزه هستند. ناهمسانگردی شکلی منجر به تشکیل زنجیره‌هایی از دانه‌های سوزنی شده است. دانه‌های تک حوزه سوزنی شکل دارای خاصیت ناهمسانگردی مغناطیسی شکلی می‌باشند، به گونه‌ای که بردار مغناطش در غیاب میدان خارجی، بر اساس کمترین انرژی مغناطواستاتیکی، در راستای آسان قرار می‌گیرد که موازی با طول دانه است. این بر اساس مدل Stoner - Wohlfarth (SW) و نیز نتایج تجربی منجر به وادارندگی (نسبتاً بالا در حلقه پسماند نمونه شامل این دانه‌ها می‌شود [۱۲]. وادارندگی دانه‌های سوزنی آهن که با روش بوروهیدراید ساخته شده‌اند، بدون انجام عملیات گرمایی 470 Oe [۱۱] و با انجام این عملیات به 750 Oe رسیده است (جدول ۱).

دانه‌های تک حوزه 100 نانومتری کبالت با شکل کروی که در تصویر SEM (شکل ۳-ب) مشاهده می‌شوند، فاقد



شکل ۲. طیف XRD برای نمونه Fe پس از رشد در حضور میدان $H_c = 1 \text{ kOe}$ و با عملیات گرمایی، (ب) نمونه $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ پس از رشد در غیاب میدان و با عملیات گرمایی، (پ) نمونه $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ پس از رشد در حضور میدان $H_c = 1 \text{ kOe}$ و بدون عملیات گرمایی، (ت) نمونه $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ پس از رشد در حضور میدان $H_c = 1 \text{ kOe}$ و با عملیات گرمایی. برای تمام نمونه‌ها طول موج اشعه ایکس به کار رفته $1.54 \text{ \AA}$ می‌باشد.

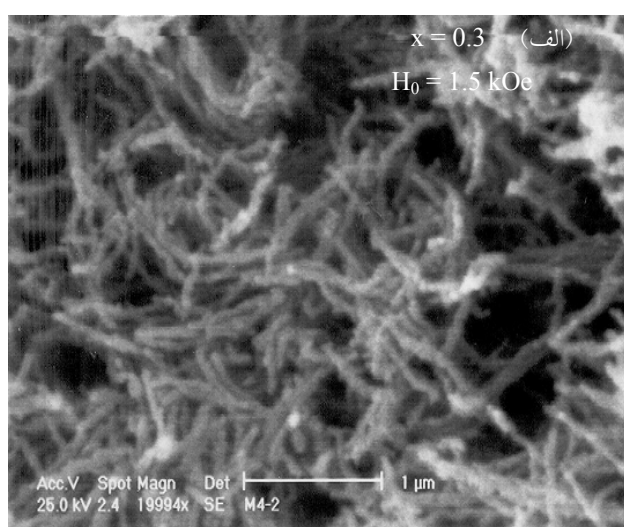
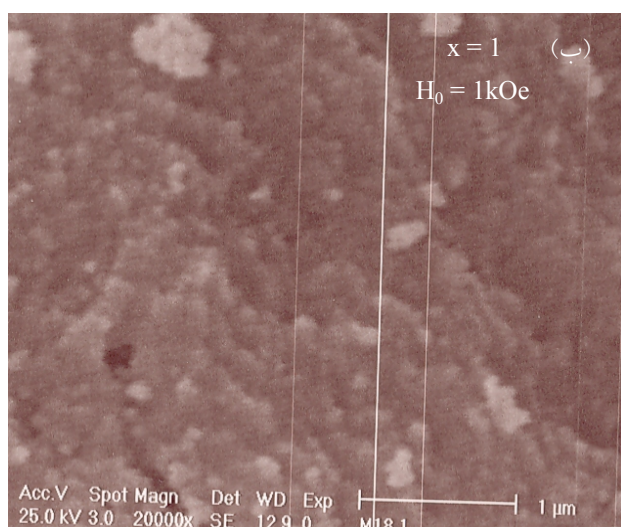
و نیز جهت‌دار کردن بافت، مغناطش پسماند نمونه‌ها را افزایش می‌دهند. شکل ۴ حلقه‌های پسماند بافت جهت‌دار نمونه $x = 0.3$ را در دو جهت آسان و سخت نشان می‌دهد. مغناطش پسماند در جهت آسان به میزان ۳۴ درصد نسبت به جهت سخت و ۲۵ درصد نسبت به نمونه جهت‌دار نشده بالاتر است. ملاحظه می‌شود که علاوه بر ناهمسانگردی دانه‌ها، ناهمسانگردی محیط نیز موجب بالا رفتن مغناطش پسماند می‌شود. اگر بافت مغناطیسی شامل دانه‌های تک حوزه ناهمسانگرد، یک بافت جهت‌دار باشد که در آن محورهای آسان دانه‌ها با یکدیگر موازی هستند، مغناطش پسماند در جهت بافت افزایش می‌یابد.

بستگی میدان و دارندگی و مغناطش پسماند نسبی به تراکم دانه‌های مغناطیسی در بستر پلی‌مر برای نمونه $x = 0.3$ با اعمال $H_c = 1 \text{ kOe}$ در شکل ۵ نشان داده شده است.

ناهمسانگردیهای شکلی و القایی می‌باشند و آنها (جدول ۱) که برابر 550 Oe است حاصل از ناهمسانگردیهای بلوری و سطحی است. منشأ ناهمسانگردی سطحی، در برهم‌کنش تبدیلی بین اسپینهای اتمی موجود در حجم و سطح ذرات تک‌حوزه مغناطیسی است. با کاهش اندازه ذرات در حد نانومتری، نسبت سطح به حجم، افزایش یافته و اثر ناهمسانگردی سطحی برجسته‌تر می‌شود [۱۳ و ۱۴].

۲.۳. مغناطش پسماند

شکل ۳- الف یک نمونه از زنجیره‌های شامل دانه‌های Fe-Co را نشان می‌دهد که رشد آنها در حضور میدان مغناطیسی $H_c = 1/5 \text{ kOe}$ انجام شده است و طول زنجیره‌ها در حدود $0.5 \mu\text{m}$ است ولی در میدانها و x های مختلف تا $1/5 \mu\text{m}$ هم دیده شده است [۱۲]. تشکیل زنجیره‌های دانه‌ها



شکل ۳. میکروگراف SEM برای (الف) نمونه $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ پس از رشد در حضور میدان $H_0 = 1.5 \text{ kOe}$ و (ب) نمونه Co پس از رشد در حضور میدان $H_0 = 1 \text{ kOe}$.

جدول ۱. مغناطش پسماند نسبی و میدان وادارندگی دانه‌های $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ بر حسب x .

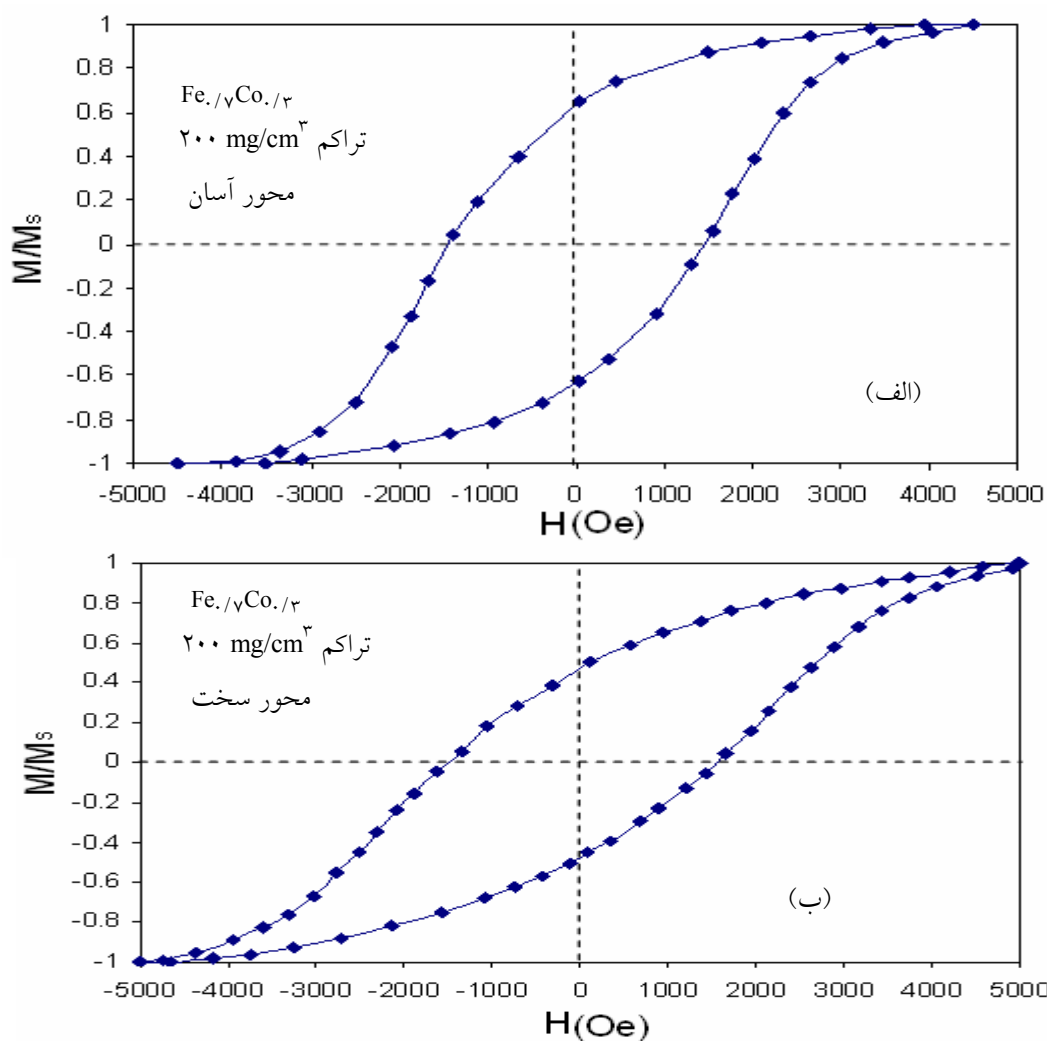
x	۰	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵	۰/۶	۱
M_r / M_s	۰/۴۴۷	۰/۵۱۷	۰/۵۳۷	۰/۵۶۳	۰/۵۳۶	۰/۵۲۷	۰/۵۳۴	۰/۴۸۹	۰/۳۲۴
$H_c(\text{Gauss})$	۷۵۴	۱۱۸۳	۱۳۶۲	۱۵۸۶	۱۳۱۶	۱۰۳۰	۱۲۹۷	۸۰۰	۵۵۰

جدول ۲. مغناطش پسماند نسبی و میدان وادارندگی دانه‌های $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ بر حسب H_0 .

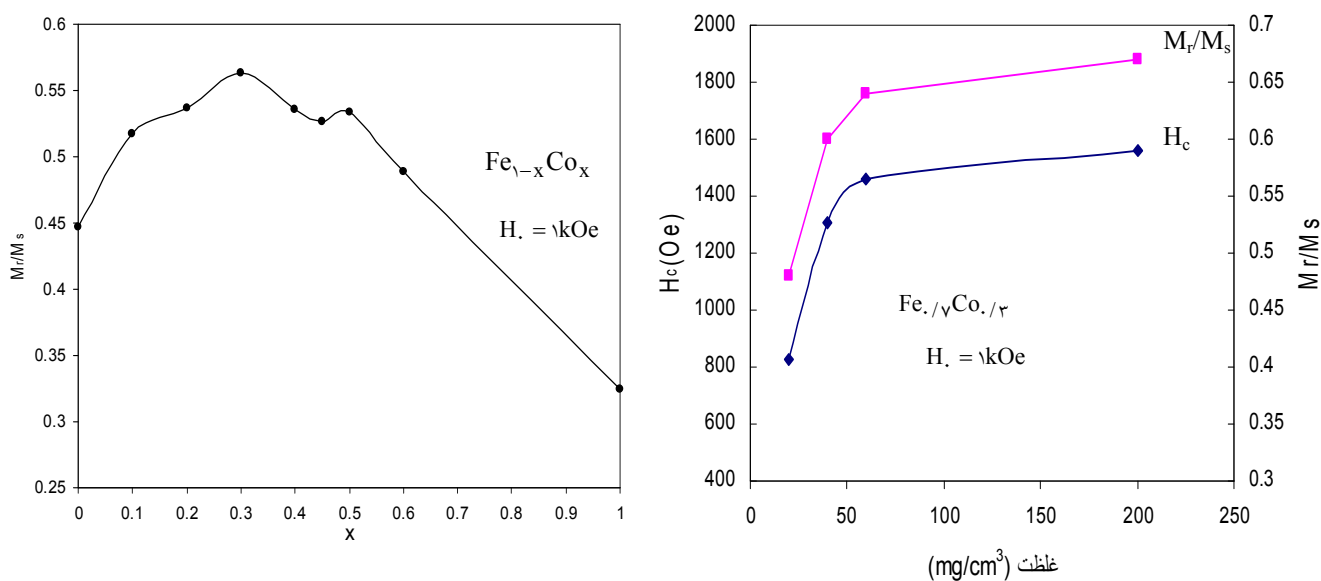
H_0	۰	۰/۵	۱	۱/۵	۲
M_r / M_s	۰/۴۳۸	۰/۴۸	۰/۵۶۳	۰/۵۵	۰/۵۶۵
$H_c(\text{Gauss})$	۸۲۰	۱۱۵۰	۱۵۸۶	۱۵۳۰	۱۲۹۵

مختلفی در میدان $H_0 = 1 \text{ kOe}$ رشد داده شده و مورد اندازه‌گیری مغناطیسی قرار گرفتند. به همین ترتیب، اندازه‌گیری‌های مغناطیسی روی نمونه‌های دیگری که با $x = 0.3$ و H_0 های مختلف ساخته شده‌اند نیز انجام گردید. M_r/M_s و H_c این دو دسته نمونه به ترتیب در جدولهای ۱ و ۲ آمده است. نمودار مغناطش پسماند دسته اول بر حسب x مطابق شکل ۶ است. ملاحظه می‌شود که در $x = 0.3$ و $H_0 = 1 \text{ kOe}$ اندازه‌های وادارندگی و

با افزایش تراکم اثر برهمکنش‌ها شدیدتر می‌شود و این امر M_r را افزایش می‌دهد. در مورد H_c ، با توجه به ثابت بودن تقریبی مقدار اکسیژن در یک محلول، انتظار می‌رود در تراکم‌های پایین کسر بزرگتری از دانه‌های فلزی موجود در محیط اکسید شوند. بنابراین ناهمسانگردیهای شکلی و القایی آنها کاهش یافته و در نتیجه H_c در تراکم پایین کاهش می‌یابد. با تغییر درصد کبالت (x) در $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ ، نمونه‌های

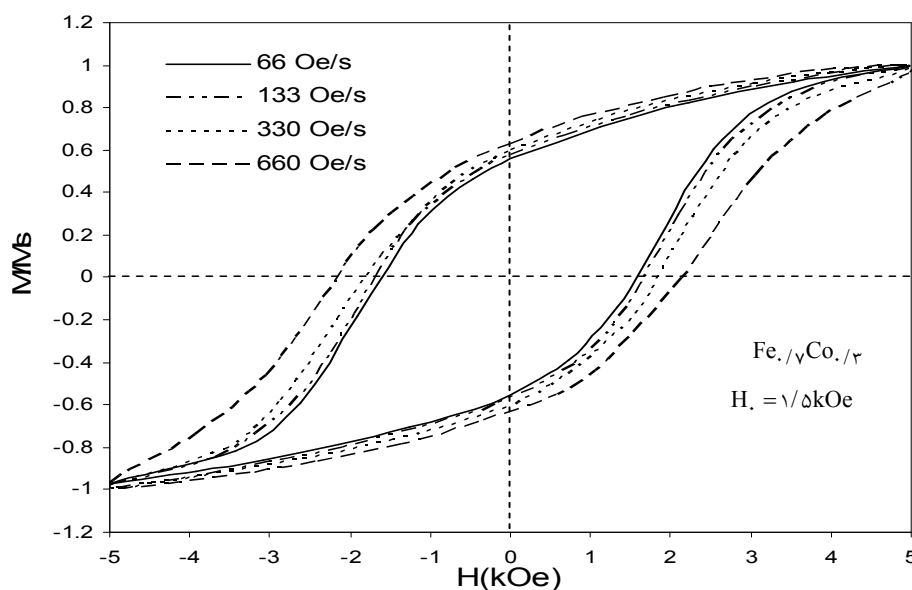


شکل ۴. منحنی پسماند نمونه با چگالی ۲۰۰ میلی گرم در سانتی متر مکعب (الف) در راستای محور آسان، (ب) در جهت محور سخت.



شکل ۶. مغناطش پسماند نسبی ذرات برحسب x .

شکل ۵. وادارندگی و مغناطش پسماند نسبی برحسب تراکم دانه‌های مغناطیسی در محیط.



شکل ۷. حلقه های پسماند نمونه $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ و $H_c = 1/5 \text{ kOe}$ در شرایط تغییر میدان با آهنگهای زمانی متفاوت.

رسانیده است.

هرگاه زمان سوئیچینگ خودبه خودی مغناطش قابل مقایسه با زمان اندازه گیری باشد، مغناطش اندازه گیری شده به صورت لگاریتمی وابسته به زمان خواهد بود [۱۶-۱۵].

$$M(t) = C - S \log(t/\tau_c); t > \tau_c. \quad (1)$$

به طوری که $\tau_c \approx 10^{-9} \text{ s}$ است و C ثابتی است که معرف مقدار مغناطش در شروع اندازه گیری است. معکوس S معیاری از پایداری سیستم است.

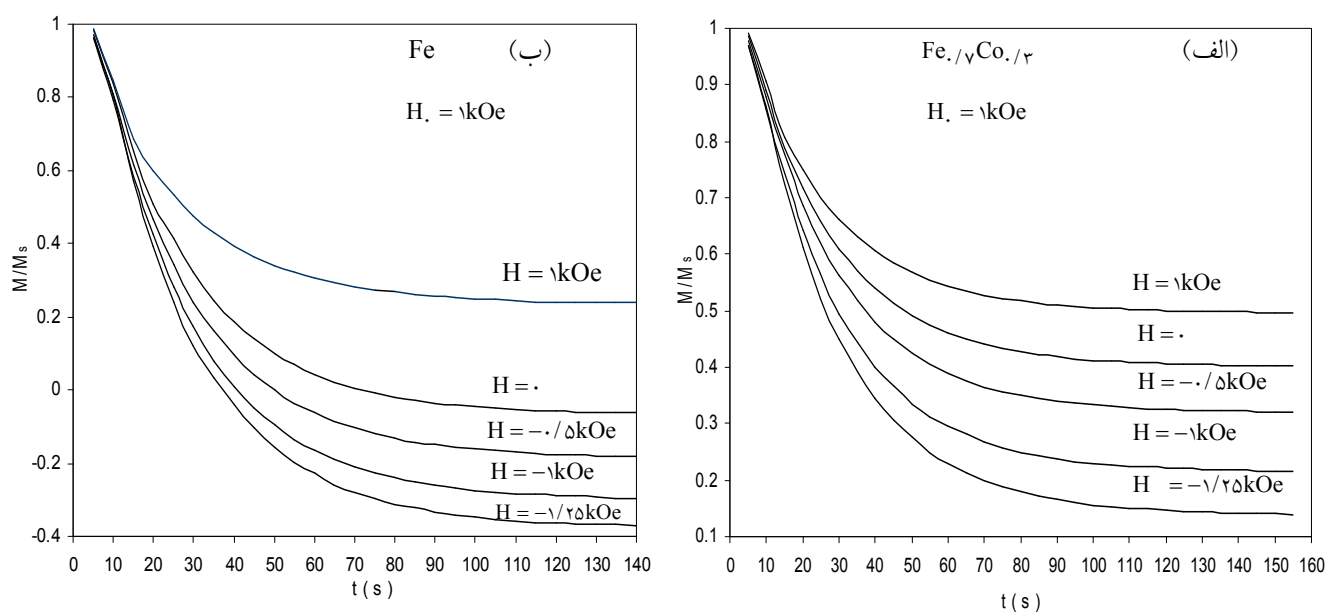
به منظور تعیین تغییرات زمانی مغناطش، $M(t)$ ابتدا نمونه ها را در میدان مغناطیسی $H_s = 5 \text{ kOe}$ به اشباع رساندیم. سپس میدان را به صورت پله ای به مقدار معین H کاهش دادیم و تغییرات زمانی مغناطش در این میدان را اندازه گرفتیم. نتیجه حاصله برای دو نمونه $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ و Fe، که در حضور میدان $H_c = 1 \text{ kOe}$ ساخته شده به ازای پنج مقدار مختلف H در شکل ۸ نشان داده شده است که سازگاری نسبتاً خوبی با رابطه (۱) دارد.

شکل ۹ نمودار $1/S$ بر حسب H_c را برای نمونه های $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ نشان می دهد که در میدانهای مختلف H ساخته شده اند. رابطه تجربی خطی بین پایداری مغناطیسی و وادارندگی این نمونه ها به خوبی در این شکل مشهود است.

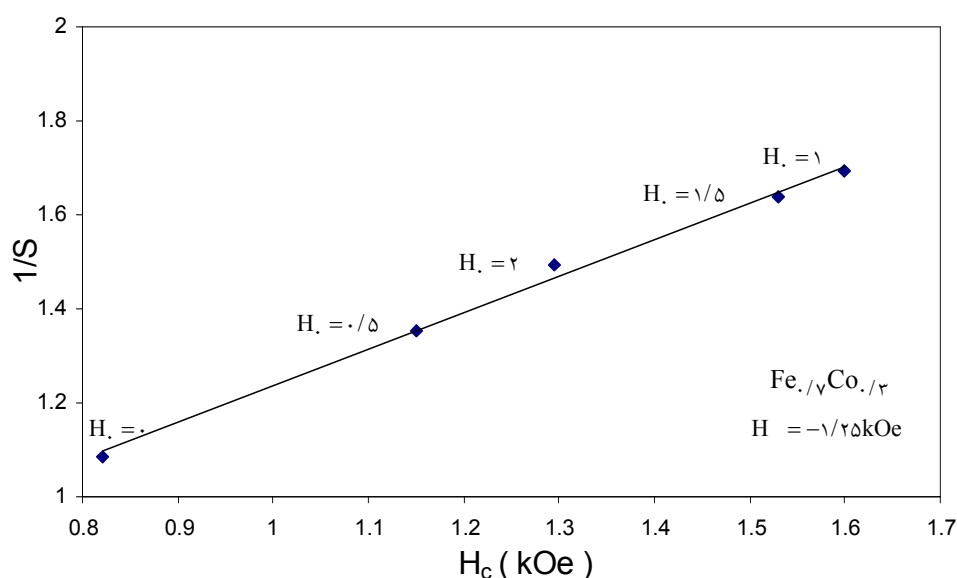
مغناطش پسماند نسبی حداکثر است و به ترتیب $1/6 \text{ kOe}$ و $0/56$ می باشند.

۳.۳. بستگی زمانی مغناطش

رفتار مغناطش یک ذره با ناهمسانگردی تک محوری در راستای آسان آن مانند یک سیستم اسپینی با دو حالت انرژی است و مغناطش پسماند بر اساس مکانیک آماری بستگی به این انرژیها دارد و به این ترتیب بستگی مغناطش به میدان یک مشخصه تعادلی نمونه است و حلقه پسماند تعادلی را تشکیل می دهد. با وجود این، در شرایط دینامیکی پیروی M از H با یک تأخیر زمانی همراه است. این به دلیل وجود سد انرژی ΔE بین دو حالت تعادلی است. بنابراین، در لحظه ای مغناطش در میدان معکوس به مقدار صفر باز می گردد که اندازه این میدان متغیر از مقدار H_c تعادلی بزرگتر شده است. به این ترتیب وادارندگی دینامیکی به آهنگ تغییرات زمانی میدان بستگی دارد. این موضوع در شکل ۷ نشان داده است. در این شکل، حلقه های هیستریزس یک نمونه $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ با $x = 0/3$ رسم شده که در آنها میدان H با آهنگهای متفاوتی به طور پیوسته تغییر داده شده است. تغییری به اندازه یک مرتبه بزرگی در آهنگ تغییر میدان، H_c را از $1/6 \text{ kOe}$ به $2/15 \text{ kOe}$



شکل ۸. تغییرات زمانی مغناطش برای دو نمونه (الف) $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ و (ب) Fe که در حضور میدان $H_i = 1/0$ kOe رشد یافته‌اند.



شکل ۹. نمودار $1/S$ (پایداری مغناطیسی) بر حسب میدان وادارندگی مربوط به نمونه‌های $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ که در میدانهای اولیه مختلف H_i ساخته شده‌اند.

۴. نتیجه‌گیری

هستند. حضور گشتاورهای مغناطیسی در ساختار bcc منجر

به تشکیل دانه‌های سوزنی می‌شود.

در ترکیب $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ میدان وادارندگی بیشینه می‌شود که بیانگر حداکثر ناهمسانگردی مغناطیسی است و این ظرفیت ذخیره سازی اطلاعات را بالا می‌برد. حضور میدان در ضمن رشد دانه‌ها، وادارندگی و مغناطش پسماند را افزایش

ساخت نانو ذرات مغناطیسی $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x$ در شکلهای

سوزنی و کروی به روش شیمیایی بوروهیدراید امکان پذیر است و در این روش ریز بودن ابعاد دانه‌ها نتیجه سرعت زیاد واکنش است. اندازه دانه‌ها و نیز حلقه‌های پسماند نمونه‌ها نشان می‌دهند که دانه‌های رشد یافته، تک حوزه مغناطیسی

بلوری به صورت جهت‌دار منجر می‌شود. این منشأ ناهمسانگردی مغناطیسی القایی است و در ترکیب $\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3}$ وادارندگی را به میزان بیش از دو برابر افزایش داده است. در این شرایط بالاترین ضریب پایداری مغناطیسی نیز به دست می‌آید. نکته حائز اهمیت در مورد پایداری مغناطیسی این ترکیب، رابطه خطی آن با وادارندگی است.

می‌دهد و اگر رشد در میدان 1 kOe انجام شود، این اندازه‌ها به حداکثر می‌رسند. مقدار M_r/M_s نمونه‌های جهت‌دار تا 0.67 و مقدار H_c نمونه‌ها تا $1/6 \text{ kOe}$ به دست آمده است. با جهت‌دار نمودن نمونه‌های ساخته شده، M_r به میزان 25% افزایش یافته است.

حضور میدان H در هنگام رشد دانه‌ها و نیز انجام عملیات گرمایی، به تشکیل جفت اتمهای Fe-Co در ساختار

مراجع

1. R C O'Handley, *Modern Magnetic Materials: Principles and Applications* (John Wiley & Sons, 2000), 274.
2. K H J Buschow, G J Long, F Grandjean, *Ed. High Density Digital Recording* (Kluwer Academic Publishers, London, 1993) 59.
3. M El Hilo, K. O'Grady, RW Chantrell *IEEE Trans. Magn.* **27** (1991) 4666.
4. Sh X Wang, A M Taratorin, *Magnetic Information Storage Technology*, (Academic Press, 1999) 65.
5. K O'grady, H Laidler, *J. Magn. Magn. Mater* **200** (1999) 616.
6. R W Chantrell and K O' Grady, *J. Phys. D* **25** (1992) 1.
7. M P Sharrock, *IEEE Trans. Magn.* **26** (1990) 193.
8. M Kishimoto, T Nakazumi, M Amemiya, T Kawai and S Kawai, *IEEE Trans. Magn.* **23** (1987) 2868.
9. W Zhong, W Ding, Y Jiang, L Wang, N Zhang, S Zhang, Y Du, Q Yan, *J Appl. Phys.* **85** (1999) 5552.
10. S Saitoh, H Inaba and A Kashiwagi, *IEEE Trans. Magn.* **31** (1995) 2859.
11. A Sebt, M Akhavan, *J. Magn. Magn. Mater.* **237** (2001) 111.
12. S Zoriasatain, F Azarkharman, S A Sebt, M. Akhavan, *J. Magn. Magn. Mat.* **300** (2006) 525.
13. M Dimian, H Kachkachi, *J. Appl. Phys.* **91** (2002) 7625.
14. F Luis, J M Torres, L M Garcia, J Bartolome, J Staniewicz, F Petrott, F Fettar, J L Maarice, A Vaures, *Phys. Rev. B* **65** (2002) 094409.
15. M el- Hillo, S H Uren, K O' Grady and P Level, *IEEE* **26** (1990) 244.
16. X Batlle, A Labarta, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **35** (2002) R15.