

ساختار بلوری، خواص مغناطیسی و مغناطوالاستیکی ترکیب‌های بین فلزی $Nd_xFe_{13-x}Co_xCu$

پروانه ایرانمنش^۱، ناصر تجیر^۱، محمود رضایی رکن‌آبادی^۱، دانیل فروشارت^۲، فائز پورآرین^۳ و هادی سلامتی^۴

۱. دانشگاه فرنوسی مشهد، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، آزمایشگاه تحقیقاتی حالت جامد

۲. مرکز ملی تحقیقات علوم (CNRS) گرنوبل، فرانسه

۳. دانشگاه کارنگی ملون، پیتسبورگ، آمریکا

۴. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

پست الکترونیکی: tajabor@ferdowsi.um.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۲/۲۳؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۷/۱۲)

چکیده

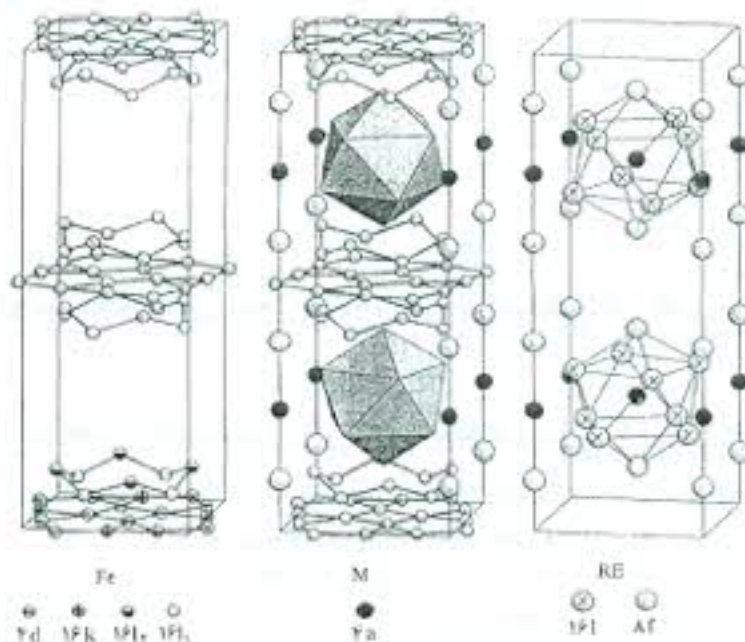
در این مقاله اثر ستاندن Co به جای Fe بر ساختار بلوری $Nd_xFe_{13-x}Co_xCu$ و خواص مغناطیسی و مغناطوالاستیکی این ترکیب‌ها بررسی شده است. ترکیب‌های سه نای خاکی نادر (۱) و $Nd_xFe_{13-x}Co_xCu$ (x = ۰, ۱) سنتز و با استفاده از پراش پرتو X بررسی شدند. نتایج نشان داد که نمونه‌ها ساختار چند فاز بی خود می‌گیرند. در اثر جانشانی اتم Co فاز دوم $Nd_xFe_{13-x}Co_xCu$ و $Nd_5Fe_8Co_5Cu$ به ترتیب در نمونه‌های ۲ و $x = ۰, ۱$ تشکیل شد. از این رو پارامتر شبکه کاهش و دمای کوری افزایش می‌یابد. در نمونه $Nd_xFe_{13-x}Co_xCu$ به سبب حضور فاز فرومغناطیسی $Nd_5Fe_8Co_5Cu$ تغییر ناهمسانگردی و افزایش اثرات تبادل مشاهده شد. اثرات نظم مغناطیسی شدت - سرد بین از دمای نیل در منحنی دمایی مغناطونگش خودمختاری مشاهده شد. اندازه‌گیری‌های مغناطونگش در راستای موازی (A) و عمود (B) بر میدان با استفاده از روش پیمانه کرنش انجام پذیرفت. در ناحیه میدان‌های کم تنش‌های مغناطونگش کوچک است و با افزایش میدان افزایش می‌یابد. در واقع مراکز قفل‌شدگی قوی اتم‌های Nd با ایجاد ناهمسانگردی مغناطوبلوری بزرگ مانع از حرکت آسان دیواره حوزها می‌شود. از طرفی در نمونه $x = ۰$ در دماهای کم میهم زیر شبکه خاکی نادر غالب است که با افزایش دما سهم زیر شبکه Fe افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ترکیب بین‌فلزی $Nd_xFe_{13-x}Co_xCu$ ، تحلیل ساختاری، خواص مغناطیسی، خواص مغناطوالاستیکی

۱. مقدمه

عناصر گروه سوم، چهارم و یا پنجم (شبه‌فلز) جدول تناوبی است [۱-۴]. از طرفی این ترکیب‌ها می‌توانند اکسیژن را به مقدار زیاد بدون تغییر در ساختارشان جذب کنند [۵]. ترکیب $Nd_xFe_{13-x}Cu$ از جمله این ترکیب‌هاست که همانند شکل ۱ دارای ساختار چارگوشی $Nd_xFe_{13-x}Si$ با گروه فضایی $I4/mcm$ است [۲-۷]. در شکل ۱ جایگاه‌های بلورنگاری اتم‌های آهن، خاکی نادر و فلز M (Si یا Cu) مشخص شده است. نظم مغناطیسی این ترکیب در دماهای کمتر از $T_N = 419K$ به صورت پادمغناطیسی است [۸].

زمینه مواد مغناطیسی پیشرفته ترکیب‌های بین فلزی خاکی نادر هم از نظر بررسی‌های بنیادی و هم کاربردهای گوناگون از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. از جمله ترکیب‌هایی که در دو دهه اخیر مورد توجه بوده‌اند می‌توان از $RE_xFe_{13-x}M$ یاد کرد. این دسته از ترکیب‌ها فاز دوم آلیاژهای مغناطیسی RE-Fe-B آلیاژ شده یا مقدار کم فلز M محسوب می‌شوند که با نفوذ در مرز دانه‌های آلیاژ افزایش میدان واگردانی را موجب می‌شوند. در این فرمول RE یکی از عناصر خاکی نادر سبک و M یکی از



شکل ۱. ساختار بلوری ترکیب $RE_2Fe_{17}M$ و جایگاه‌های بلورنگاری اتم‌های آهن، حاکی بادر و فلز M [۲].

اعمال شود. با افزایش و کاهش فرکانس القایی که باعث ذوب و اتجماد نمونه می‌شود، نمونه‌هایی با همگنی فاز بسیار بالا حاصل می‌شود. سپس نمونه‌ها در ورقه نانتالوم (Ta) پیچیده و در لوله‌های کوارتز تخلیه شده در دمای 550°C به مدت ۲۰ روز بازپخت و در دمای اتاق سرد شدند [۵]. همگنی فاز و ساختار بلوری نمونه‌ها با استفاده از پراش سیخ پرتو X و با تابش $Cu-K\alpha$ بررسی شد. تحلیل طرخ پراش پرتو X با استفاده روش ریتولد^۱ انجام شد و درصد وزنی هر فاز استخراج شد. از میکروسکپ الکترونی رویشی (۱۲۵۰ VP Leo) در مد کاری الکترون‌های برگشتی، توپولوژی سطح نمونه‌های صیقلی شده و از تحلیل EDX آن ترکیبات اتمی آنها بررسی شد. قبل از بررسی نمونه‌ها با میکروسکپ الکترونی رویشی می‌بایست با روکش طلا پوشش داده شوند تا سطحی رسانا روی آنها تشکیل شود.

دمای کوری نمونه‌های پودری با استفاده از ترازوی ترمومغناطیسی که براساس گشتاور وارد بر نمونه در حضور میدان مغناطیسی طراحی شده است در آهنگ دمایی $5^\circ\text{C}/\text{min}$ و میدان مغناطیسی ثابت ۰.۳ T اندازه‌گیری شد.

تاکنون آثار نشاندن Co به جای Fe در خواص مغناطیسی و مغناطیولاسیتی $Nd_2Fe_{17}Cu$ مورد بررسی قرار نگرفته است، انتظار می‌رود اثر مشترک برهم‌کنش‌های میدان بلوری و برهم‌کنش‌های تبادلگی تغییر کند و پدیده‌های حاصلی به وجود آید.

۲. شرح آزمایش

نمونه‌های (۲) و (۱) $Nd_2Fe_{17-x}Co_xCu$ با استفاده از عناصر سازنده ترکیب (Nd, Fe, Co, Cu) با درجه خلوص ۹۹.۹۹٪ و در حضور گاز خالص آرگون در کوره قوس آرگون ذوب شدند. هر نمونه چندین بار پشت و رو و دویاره ذوب شد تا فاز همگنی تشکیل شود. بلافاصله هر یک از نمونه‌ها در کوره القایی فرکانس بالا در یک بونه مسی که با آب خنک می‌شود در اتمسفر گاز خالص آرگون ذوب شدند (مستز نمونه‌ها در CNRS انجام شد). ایجاد جریان ادی در نمونه، هم باعث ذوب آن می‌شود و هم اینکه میدان مغناطیسی حاصل از این جریان و میدان القایی بر یکدیگر اثر کرده و باعث کنده شدن نمونه مذاب از جداره بونه مسی می‌شود. تعلیق نمونه مذاب تا وقتی ادامه دارد که فرکانس القایی میدان به بونه

حساسیت این دستگاه از مرتبه 10^{-7} emu/gr و دقت نتایج آن از مرتبه 10^{-3} emu/gr است. پذیرفتاری مغناطیسی متناوب نمونه‌ها در دماهای ۷۷ تا ۳۰۰ کلوین در میدان ۵۰۰ A/m فرکانس ۳۳۳/۳ Hz انجام شد.

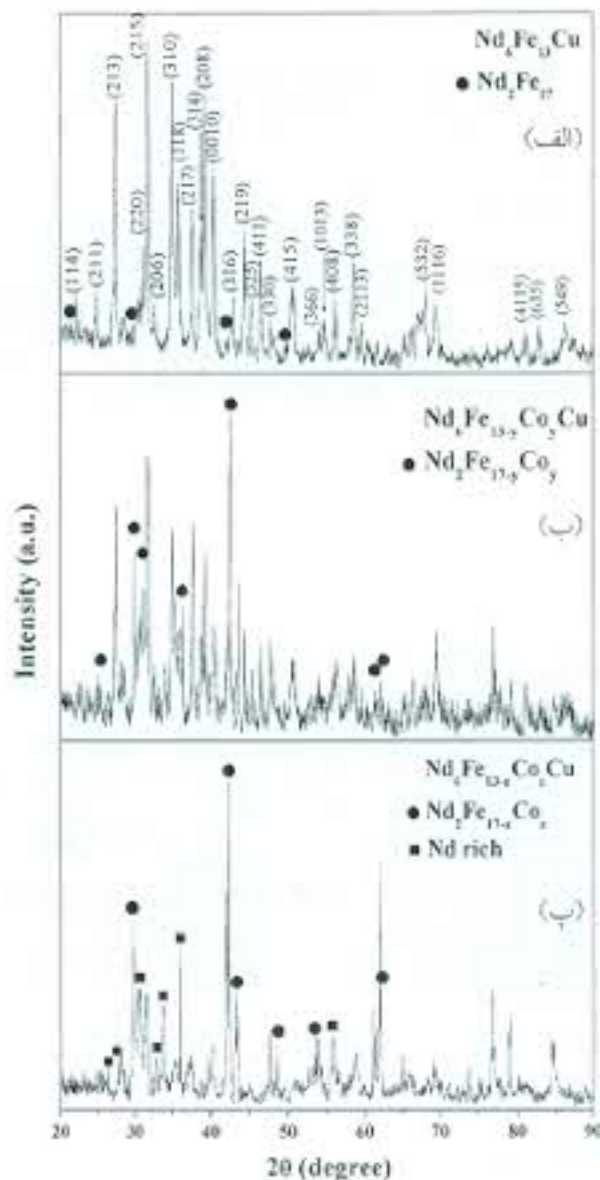
به منظور مطالعه آثار مغناطیوالاستیکی به روش پیمانه کرنشی از نمونه، قرصی به قطر ۶ mm و ضخامت ۲ mm برش داده شد. پس از نصب پیمانه کرنش سطح روی نمونه، انبساط گرمایی، $\Delta l/l = [I(T) - I(\lambda \cdot K)] / I(\lambda \cdot K)$ با استفاده از تغییر نسبی طول نمونه‌ها بر حسب دما در بازه دمایی ۸۰ تا ۲۵۰ کلوین به کمک ترموکوپل Cu-Con با دقت ۱ K، اندازه‌گیری شد. مغناطوتنگش نیز در راستای موازی (λ) و عمود (λ_۰) بر میدان در بازه دمایی ۸۰ تا ۳۰۰ کلوین و میدان‌های تا ۱/۵ T اندازه‌گیری و مغناطوتنگش ناهمسانگرد $\Delta\lambda = \lambda_{\parallel} - \lambda_{\perp}$ محاسبه شد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. ساختار بلوری

تحلیل طرح پراش نمونه‌های (۲) و (۱) ($x = 0, 1$) Nd₂Fe_{17-x}Co₂Cu نشان داد که سه ازای $x = 0$ ترکیب Nd₂Fe₁₇Cu با ساختار چهارگوشی و گروه فضایی I4/mcm تشکیل شده است، علاوه بر آن نمونه شامل ۵ درصد وزنی فاز Nd₂Fe₁₇ است. در نمونه $x = 1$ تقریباً ۷۲ wt% فاز Nd₂Fe_{17-x}Co₂Cu و ۲۶ wt% فاز Nd₂Fe_{17-y}Co₂ با $0 < y < 1$ تشکیل شده است و در نمونه $x = 2$ تقریباً ۵۳ wt% فاز Nd₂Fe_{17-x}Co₂Cu و ۳۰ wt% فاز Nd₂Fe_{17-z}Co₂ با $1 < z < 2$ و ۱۷ wt% فاز غنی از Nd مشاهده می‌شود. شکل ۲ طرح‌های پراش پرتو X و شاخص‌های میلر نمونه‌های (۲) و (۱) ($x = 0, 1$) Nd₂Fe_{17-x}Co₂Cu را نشان می‌دهد. داده‌های تحلیل طرح پراش پرتو X در جدول ۱ آورده شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که جانشانی اتم کبالت به جای Fe همراه با کاهش پارامترهای شبکه هر فاز مجزا است و این کاهش در یاخته بکته به سبب کوچکتر بودن شعاع اتمی Co نسبت به Fe است.

شکل ۳ تصاویر SEM و تحلیل EDX نمونه‌های



شکل ۲. طرح پراش نمونه‌های Nd₂Fe_{17-x}Co₂Cu (الف) $x = 0$ ، (ب) $x = 1$ و (پ) $x = 2$

منحنی‌های تغییرات مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی بر روی نمونه پودری در دماهای ۵ تا ۳۰۰ کلوین و در میدان مغناطیسی تا ۷ T با استفاده از دستگاه مغناطیس سطح نمونه متحرک^۱، که براساس حرکت دادن خطی نمونه در میدان مغناطیسی ثابت کار می‌کند، اندازه‌گیری شد. منحنی‌های تغییرات مغناطش بر حسب دما نیز از دمای ۵ تا ۳۰۰ کلوین و در میدان مغناطیسی ۰.۳، ۰.۷ و ۱ تسلا اندازه‌گیری شد.

۱. Extracting Sample Magnetometer

جدول ۱. پارامترهای شبکه بلوری و دمای کوری (T_c) آلیاژهای $Nd_xFe_{1-x}Co_xCu$

نمونه	ترکیب	wt%	a (Å)	c (Å)	V (Å ³)	T_c (K)
$x = 0$	$Nd_xFe_{1-x}Cu$	≈ 95	$8,962$	$22,2761$	$146,360$	
	Nd_xFe_{1-x}	≤ 5	$8,5782$	$12,2611$	$792,108$	325
$x = 1$	$Nd_xFe_{1-x}Co_xCu$	74	$8,957$	$22,2757$	$1459,963$	
	$Nd_xFe_{1-x}Co_x$	26	$8,5728$	$12,2653$	$793,232$	403
$x = 2$	$Nd_xFe_{1-x}Co_xCu$	53	$8,941$	$22,2698$	$1458,992$	
	$Nd_xFe_{1-x}Co_x$	30	$8,5737$	$12,2602$	$793,217$	482
	Nd-rich	17	*	*	*	پارامغناطیس

* به علت نامشخص بودن ساختار بلوری، محاسبه پارامترهای شبکه امکان پذیر نیست.

میدان‌های مغناطیسی بالا نیاز دارد [۸] مقدار کم گشتاور مغناطیسی ($M < 8 \mu_B/f.u.$) در دمای $300 K$ و میدان $7 T$ ساختار مغناطیسی متشکل از حداقل دو زیرشبکه مغناطیسی با سمتگیری یادموازی را تأیید می‌کند.

منحنی مغناطش نمونه $x = 1$ سرجمع مغناطش فازهای $Nd_xFe_{1-x}Co_x$ و $Nd_xFe_{1-x}Co_xCu$ است. در ناحیه میدان‌های ضعیف، نمونه ناشی از حضور ترکیب $Nd_xFe_{1-x}Co_x$ به صورت یک ساختار فرومغناطیسی رفتار می‌کند و پس آن که میدان مغناطیسی افزایش یافت سهم مغناطش ترکیب $Nd_xFe_{1-x}Co_xCu$ مهم می‌شود. به این نکته باید توجه کرد که داده‌های مغناطش بر حسب $\mu_B/f.u.$ در شکل ۵ (ب) با فرض اینکه تمام نمونه متشکل از ترکیب $Nd_xFe_{1-x}Co_xCu$ است محاسبه شده است.

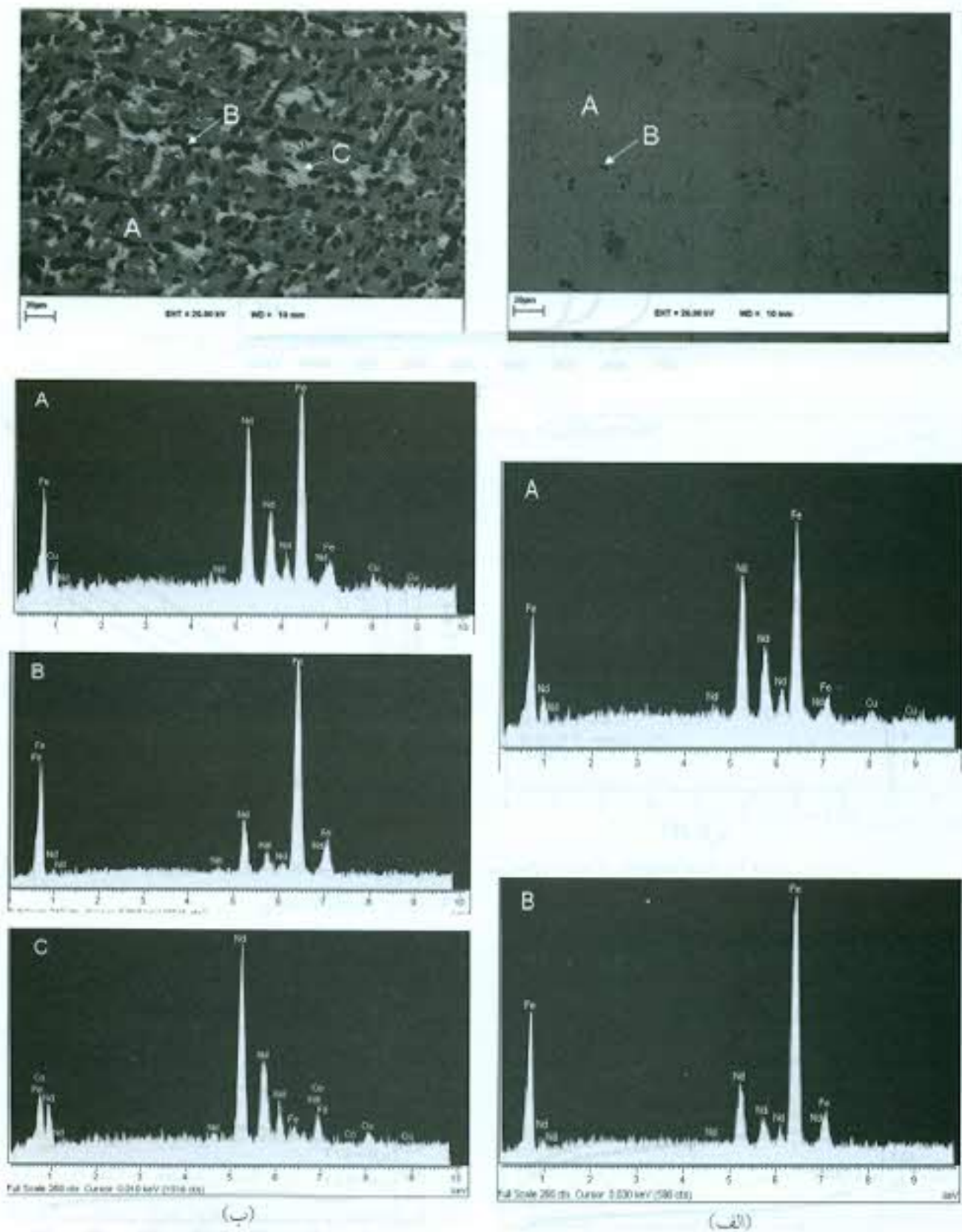
وابستگی دمایی مغناطش نمونه‌های $x = 0$ و $x = 1$ در میدان‌های انتخابی در شکل ۶ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که منحنی مغناطش نمونه $x = 0$ وابسته به شدت میدان مغناطیسی در گستره‌ای از دما دارای برآمدگی پهن است. افزایش ناهنجار مغناطش با افزایش دما در گستره 30 تا 150 کلوین را می‌توان به پیکربندی کج شده گشتاور زیرشبکه‌های آهن و خاکی‌سادر که افزایش مغناطش کل را نتیجه می‌دهد نسبت داد. این گونه رفتار برای ترکیب $Pr_xFe_{1-x}Sn$ نیز گزارش شده است [۳] در نمونه $x = 1$ مغناطش رفتار کاهشی از خود نشان می‌دهد که ناشی از افت و خیزهای دمایی است. ناهنجاری مشاهده شده در گستره 20

($x = 0$ و 1) $Nd_xFe_{1-x}Co_xCu$ را نشان می‌دهد. تحلیل EDX نقاط (A)، (B) و (C) در سطح نمونه‌ها نشان می‌دهد که زمینه خاکستری (A) شامل عناصر Nd-Fe-Cu (نماینده فاز اصلی $Nd_xFe_{1-x}Cu$)، نقاط تیره (B) Nd-Fe (نماینده فاز Nd_xFe_{1-x}) و نقاط روشن (C) Nd-Fe-Co-Cu است.

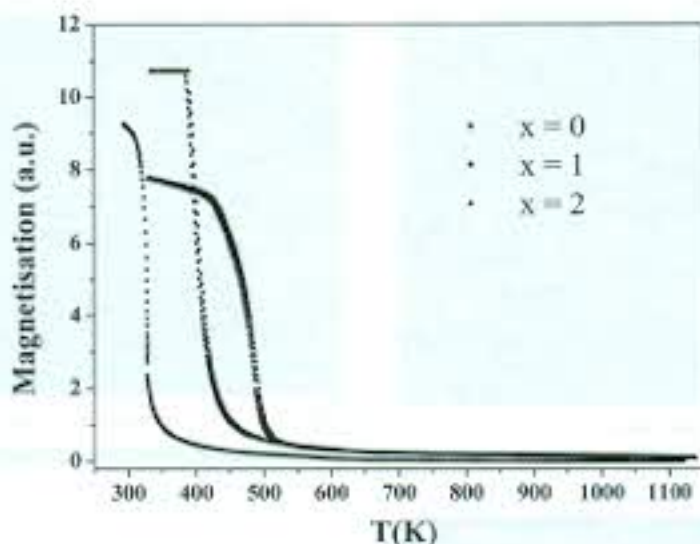
۲.۳. خواص مغناطیسی

نتایج اندازه‌گیری‌های ترمومغناطیسی نمونه‌ها در میدان اعمالی ضعیف بر حسب دما در شکل ۴ نشان داده شده است. دمای کوری نمونه‌های $x = 0, 1$ و 2 که از مشتق دوم منحنی مغناطش بر حسب دما به دست آمده است، به ترتیب $325, 403$ و 482 کلوین است. مقایسه دماهای کوری با نتایج گزارش شده برای $Nd_xFe_{1-x}Co_x$ که به ترتیب برای $x = 0$ و 2 عبارتند از $333,5$ و 558 کلوین [۹] نشان داد که نمونه‌های تهیه شده ($x = 0, 1$ و 2) $Nd_xFe_{1-x}Co_xCu$ به ترتیب شامل فازهای $Nd_xFe_{1-x}Co_x$ ($0 < x < 1$) و $Nd_xFe_{1-x}Co_x$ ($1 < x < 2$) است. این نتیجه در توافق با ریزساختار مشاهده شده با میکروسکپ الکترونی روبشی و طرح‌های پراش پرتو X چند فازی نمونه‌هاست.

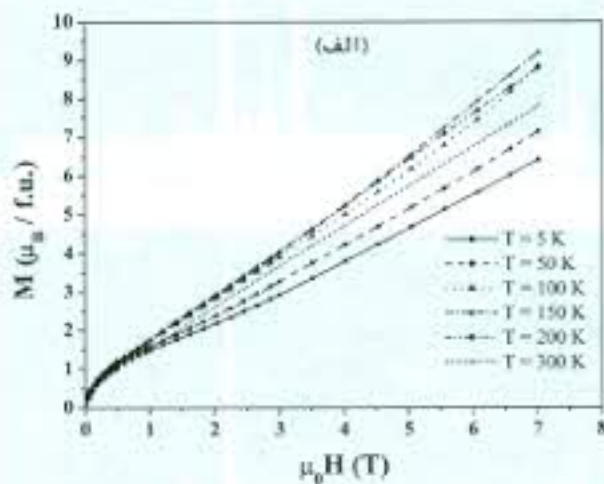
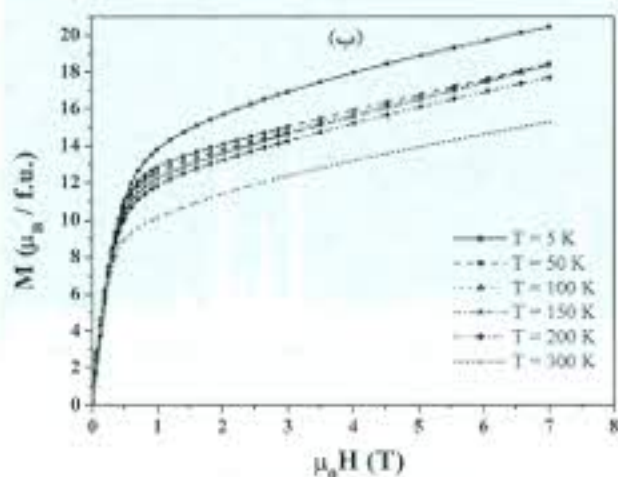
منحنی‌های مغناطش بر حسب میدان نمونه‌های ($x = 0$ و 1) $Nd_xFe_{1-x}Co_xCu$ در شکل ۵ نشان داده شده است. واضح است که نمونه $Nd_xFe_{1-x}Cu$ برای رسیدن به رفتار اشباع به



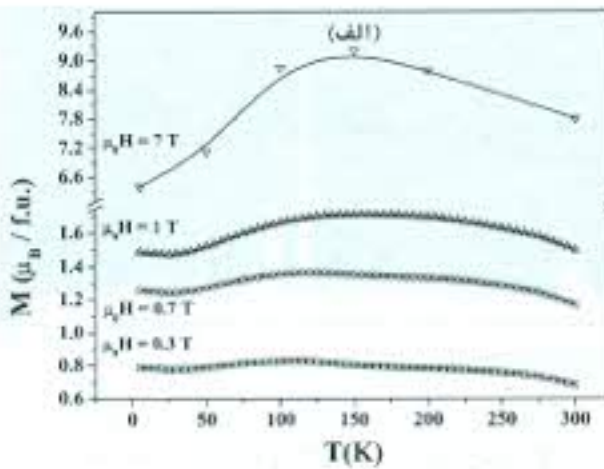
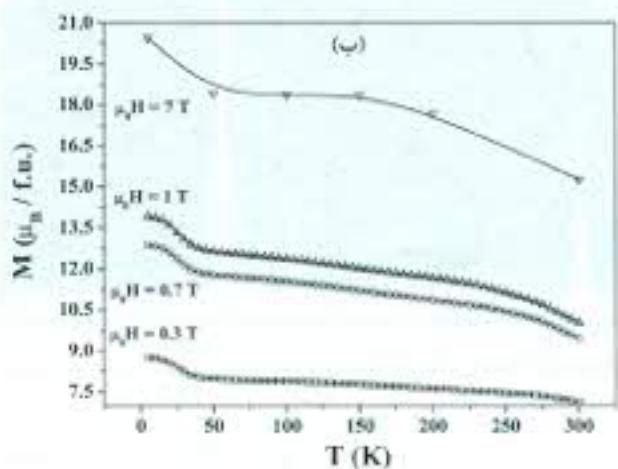
شکل ۳. تصاویر SEM و آنالیز EDX نمونه‌های $Nd_{0.9}Fe_{0.1}CoCu$ (الف) $x = 0$ (ب) $x = 1$ (ب) آنالیز EDX زمینه خاکستری (A) عناصر Nd-Fe-Co، نقاط تیره (B) Nd-Fe و روشن (C) Nd-Fe-Co-Cu را نشان می‌دهد.



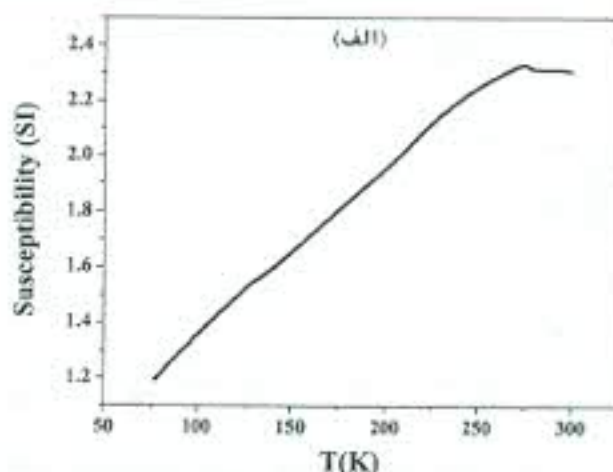
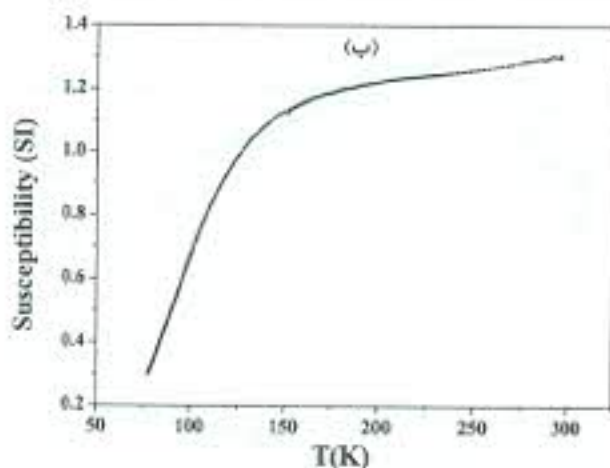
شکل ۴. داده‌های ترمومغناطیسی بر حسب دما برای مقادیر متفاوت x نمونه‌های $\text{Nd,Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Cu}$.



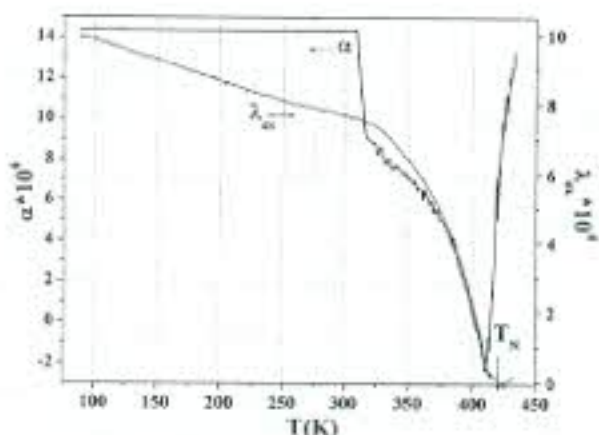
شکل ۵. تغییرات مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی در دماهای مختلف نمونه‌های $\text{Nd,Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Cu}$ (الف) $x=0$ و (ب) $x=1$.



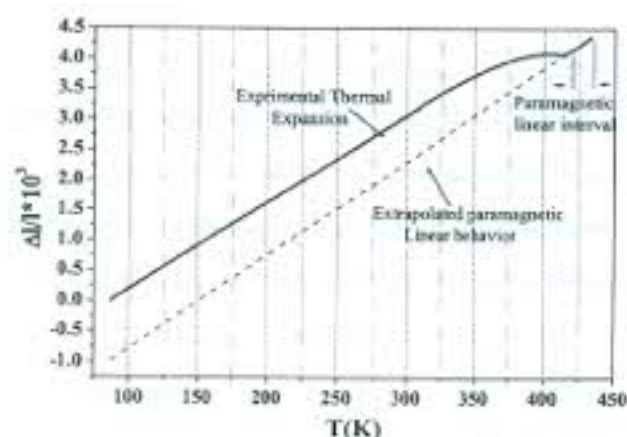
شکل ۶. تغییرات مغناطش بر حسب دما در چند میدان مغناطیسی انتخابی برای نمونه‌های $\text{Nd,Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Cu}$ (الف) $x=0$ و (ب) $x=1$.



شکل ۷. پذیرفتاری متناوب نمونه‌های $Nd_2Fe_{1-x}Co_xCu$ (الف) $x=0$ و (ب) $x=1$ در میدان $500 A/m$ و فرکانس $333.3 Hz$.



شکل ۸. وابستگی دمایی مغناطیساتگی خودبه‌خودی و ضریب انبساط گرمایی نمونه $Nd_2Fe_{1-x}Co_xCu$.



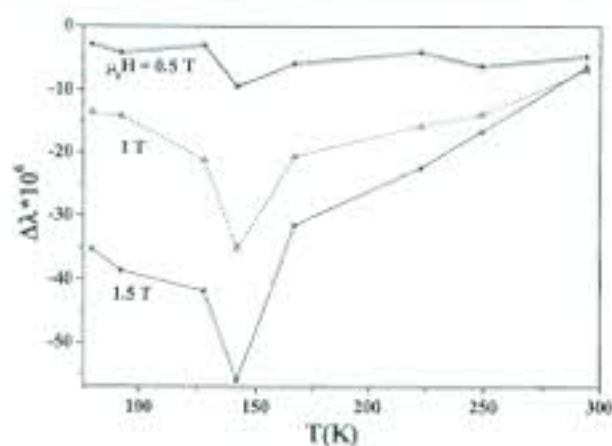
شکل ۹. منحنی انبساط گرمایی تجربی نمونه $Nd_2Fe_{1-x}Co_xCu$ در گستره دمایی 80 تا 450 کلوین. خط چین، برون‌یابی رفتار پارامغناطیسی به کمتر از دمای نیل ($T_N = 419 K$) را نشان می‌دهد.

۳.۳. خواص مغناطیساتیکی

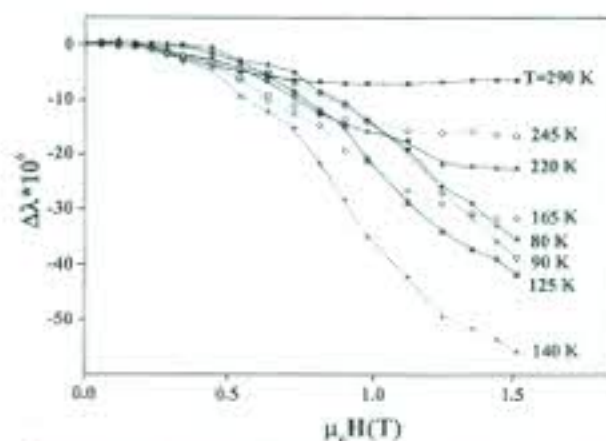
منحنی انبساط گرمایی نمونه $Nd_2Fe_{1-x}Co_xCu$ ($x=0$) در شکل ۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که این منحنی با افزایش دما به‌طور تقریباً خطی تا دمای $310 K$ صعود می‌کند و ناهنجاری رفتاری پس از این دما (منحنی α در شکل ۹) مشاهده می‌شود که دمای گذار ساختار مغناطیسی $T_N = 419 K$ را نشان می‌دهد. ضریب انبساط گرمایی متوسط نمونه نیز که از شیب میانگین منحنی انبساط گرمایی استخراج شده است، در شکل ۹ نشان داده شده است. در واقع رفتار مشاهده شده در انبساط گرمایی، ترکیبی از انبساط گرمایی فونونی و اثر مغناطیسی است که سهم مغناطیسی را می‌توان با برون‌یابی رفتار

تا 30 کلوین را می‌توان به برهم‌کنش‌های مغناطیسی بین ذرات با اثرات قوی‌تر، در میدان‌های مغناطیسی ضعیف، نسبت داد. در واقع در میدان‌های ضعیف، همه حوزهای مغناطیسی درون ذرات با هم به‌طور همبسته رفتار نمی‌کنند. به عبارت دیگر ذراتی با میانگین گشتاور مغناطیسی قوی‌تر بر ذرات دیگر تأثیر دارند.

هیچ‌گونه ناهنجاری در پذیرفتاری مغناطیسی متناوب دو ترکیب در گستره دمایی اندازه‌گیری مشاهده نشده است (شکل ۷). رفتار مشاهده شده در نمونه $x=1$ ناشی از میانگین برهم‌کنش‌های تبادلی زیرشبه‌ها، ناهمسانگردی مغناطیبلوری و اثرات مغناطیساتیکی حضور ترکیب ناخواسته فرومغناطیس $Nd_2Fe_{1-x}Co_xCu$ در فاز اصلی پادفرومغناطیس $Nd_2Fe_{1-x}Co_xCu$ است.



شکل ۱۱. وابستگی دمایی منحنی‌های مغناطونگش ناهمسانگرد $Nd_5Fe_{13}Cu$ ($\Delta\lambda$)



شکل ۱۰. وابستگی به میدان منحنی‌های مغناطونگش ناهمسانگرد $Nd_5Fe_{13}Cu$ ($\Delta\lambda$)

آستانه (کمتر از ۰.۵ T) کوچک است و سپس با افزایش میدان اعمالی افزایش می‌یابد. از آنجایی که در این ناحیه جابه‌جایی دیواره حوزه‌ها در فرایند مغناطش نمونه سهم عمده دارند، نتایج حضور مراکز قفل‌شدگی قوی اتم‌های حاکی نادر (اینجا، Nd) که از جابه‌جایی آسان دیواره حوزه‌ها معانعت می‌کنند را تأیید می‌کند [۱۰]. علاوه بر جابه‌جایی دیواره حوزه‌ها، با افزایش میدان مغناطیسی به بیشتر از میدان آستانه گشتاورهای مغناطیسی به تدریج در راستای میدان مغناطیسی فرار می‌گیرند. این مغناطش القا شده همراه با ثابت جفت‌شدگی مغناطوالاستیکی منفی زیرشیکه Nd(16f) تا دمای حدود ۱۴۰ کلون است. جایی که منحنی‌های $\Delta\lambda$ در شکل ۱۱ دارای مقادیر کمینه است. سپس با افزایش دما، سهم ثابت‌های جفت‌شدگی مغناطوالاستیکی مثبت دیگر زیرشیکه‌ها در منحنی $\Delta\lambda$ باعث افزایش آن می‌شود. هنگامی که مغناطونگش ناهمسانگرد به سمت صفر میل می‌کند ثابت‌های جفت‌شدگی زیرشیکه‌ها اثرات همدیگر را جبران کرده‌اند. که همانند این رفتار برای ترکیب $Nd_5Fe_{13}Si$ در دمای بازجهت‌گیری اسپینی گزارش شده است [۱۱].

۴. جمع‌بندی

ساختار بلوری، خواص مغناطیسی، انبساط گرمایی و مغناطونگش ناهمسانگرد نمونه‌های (۱) و (۲) ($x = ۰.۱$)

خطی پارامغناطیسی (بالای دمای نیل) به ناحیه پادفرومغناطیسی تخمین زد. تفاوت میان منحنی تجریمی و خط بیرون‌یابی شده مغناطونگش خودبه‌خودی (به شکل ۹) است که تغییر یاخته یکذ بلورنگاری با دما را نشان می‌دهد. در ترکیبات خانواده $RE_5Fe_{13}M$ خواص نگاه نظم مغناطیسی کوتاه-برد از برهم‌کنش‌های تبادل Fe-Fe است. این برهم‌کنش‌های مغناطیسی معمولاً اولین گام برای گسترش ماکروسکپی فاز مغناطیسی در کل حجم نمونه محسوب می‌شوند. با در نظر گرفتن ساختار ترکیب، نظم‌های مغناطیسی کوتاه-برد اولیه از برهم‌کنش‌های تبادل فرومغناطیسی درون لایه‌ای n_{Fe} و نظم بلند-برد نیز از برهم‌کنش‌های تبادل فرومغناطیسی بیرون لایه‌ای $Fe(16f)_xNd(y)$ آغاز می‌شود و با پیکربندی پادفرومغناطیسی میان لایه‌های مجزا شده با صفحات M کامل می‌شود [۱۰]. این مقدار مثبت مغناطونگش خودبه‌خودی پیش از دمای $T_N = 419 K$ را می‌توان به آرایش تدریجی نظم بلند-برد گشتاورهای مغناطیسی که همراه با نظم پادفرومغناطیسی دمای کم $Nd_5Fe_{13}Cu$ است نسبت داد. مقدار کوچک λ پس از دمای نظم مغناطیسی ناشی از نظم کوتاه-برد میان Fe-Fe است.

شکل ۱۰ رفتار هم‌دمای مغناطونگش ناهمسانگرد ($\Delta\lambda$) نمونه $x = ۰$ را نشان می‌دهد. وابستگی دمایی $\Delta\lambda$ نیز در شکل ۱۱ آمده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ دیده می‌شود که نش‌های مغناطونگشی نمونه $x = ۰$ کمتر از میدان مغناطیسی

جایگاه‌های بلورنگاری اتم Nd باشد که با افزایش میدان اثرات آن تضعیف می‌شود. در نمونه $x = 0$ سهم مغناطوتنگش زیر شبکه خاکی نادر (Nd) در دماهای کم غالب است و با افزایش دما سهم زیر شبکه Fe به طور فزاینده‌ای مهم می‌شود.

به طور کلی حضور جزئی اتم‌های کبالت در ترکیب‌های بین فلزی فرومغناطیس و فری مغناطیس باعث افزایش دمای کوری، میدان وادارتندگی و افزایش مغناطس اشباع در آنها می‌شود. هم‌چنین در ترکیب‌های پادفرومغناطیسی باعث افزایش دمای نیل و ناهمسانگردی آنها می‌شود. نتایج حاصل در این زمینه در دست بررسی است و به زودی گزارش خواهد شد.

قدردانی

بخشی از هزینه‌های این تحقیق از محل طرح پژوهشی شماره ۱۲۴۲/ب مورخ ۸۶/۷/۱۹ معاونت محترم پژوهشی دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد تأمین گردیده است، که بدین وسیله سپاسگزاری می‌گردد.

$Nd_0.7Fe_{1-x}Co_xCu$ مطالعه شد. نتایج نشان داد که:

با جانشانی کبالت، پارامتر شبکه هر فاز مجزا کاهش می‌یابد و همراه با آن دمای گذار افزایش پیدا می‌کند. منحنی‌های مغناطس نمونه $x = 0$ برآمدگی پهنی را نشان می‌دهد که می‌توان آن را به پیکربندی کج شده گشتاورها که افزایش مغناطس کل را به همراه دارد نسبت داد. در میدان‌های ضعیف، رفتار مغناطیسی فاز $Nd_0.7Fe_{1-x}Co_x$ در نمونه $x = 1$ غالب است.

منحنی ضریب انبساط گرمایی با افزایش دما به‌طور خطی تا دمای 310 K صعود می‌کند و سپس دمای گذار ساختار مغناطیسی $T_N = 219\text{ K}$ را نشان می‌دهد. افزایش مغناطوتنگش خودبه‌خودی α همراه با کاهش دما را می‌توان به نظم بلند-برد گشتاورهای مغناطیسی که همراه با نظم پادفرومغناطیسی $Nd_0.7Fe_{1-x}Cu$ است نسبت داد. مغناطوتنگش نمونه $x = 0$ در میدان‌های ضعیف کوچک است که این می‌تواند ناشی از مراکز قفل‌شدگی قوی دیواره حوزه‌ها در

مراجع

1. F Weitzer, A Leithe-Jasper, P Rogl, K Hiebl, A Rainbacher, G Wiesinger, W Steiner, J Fried, F E Wagner, *J. Appl. Phys.* **75** (1994) 7745.
2. A Leithe-Jasper, P Rogl, G Wiesinger, A Rainbacher, R Hatzl, M Forsthuber, *J. Magn. Magn. Mater.* **170** (1997) 189.
3. Q F Xiao, T Zhao, Z D Zhang, M H Yu, X G Zhao, W Liu, D Y Geng, X K Sun, F R de Boer, *J. Magn. Magn. Mater.* **184** (1998) 330.
4. O Isnard, G J Long, D Hautot, K H J Buschow, F Grandjean, *J. Phys. Condens. Matter* **14** (2002) 12391.
5. K G Knoch, A Le Calvez, Q Qi, A Leithe-Jasper, J M D Coey, *J. Appl. Phys.* **73** (1993) 5878.
6. F Wang, J Wang., P Zhang., BG Shen, Q Yan, L Zhang, *Physica B* **269** (1999) 17.
7. P S Papamantellos, K H J Buschow, C H de Groot, F R de Boer, C Ritter, F Fauth, Grit Boettger, *J. Alloys Comp.* **280** (1998) 44.
8. C H de Groot, K H J Buschow, F R Boer, *Phys. Rev. B* **57**(1998)11472.
9. Radhakrishna, P Umarji, A M Murthy, V G Narasimha, *Modern Physics Letters B* **6**(1992)1449.
10. M R Alinejad, N Tajabor, F Pourarian, *J. Magn. Magn. Mater.* **320**(2008)2140.
11. N Tajabor, M R Alinejad, F Pourarian, *Physica B* **321**(2002)60.