

## اثر جانشانی La و Ga بر ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی ترکیب بین

### فلزی $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$

پروانه ایرانمنش<sup>۱\*</sup>، سمیرا سعیدنیا<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

<sup>۲</sup> گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۰۸ ویرایش نهائی: ۱۳۹۵/۰۸/۱۷ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۳

#### چکیده

در این پژوهش ساختار بلوری و ویژگی‌های مغناطیسی ترکیب‌های  $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  ( $x = 1$  و  $y = 0$ ) با به‌کارگیری پراش پرتو  $X$ ، مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی و سیستم تداخل کوانتومی ابررسانای مغناطیس‌سنج بررسی شده است. ترکیب‌های سه‌تایی بین فلزی  $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  سنتز شدند و نتایج الگوهای پراش پرتو  $X$  نشان داد که نمونه‌های تک فاز با ساختار لوزی رخ شکل می‌گیرد. با جانشانی اتم‌های La و Ga در ترکیب، پارامتر شبکه افزایش می‌یابد و به سبب تغییر در اثرات تبادل و ناهمسانگردی، دمای کوری، رفتار مغناطیسی و مغناطش اشباع نیز تغییر می‌کند. دمای کوری نمونه‌ها با جانشانی لانتانیم که همراه با افزایش حجم یاخته یک‌ه است کاهش می‌یابد و از طرفی نشان دادن اتم گالیم به جای آهن افزایش دمای کوری به سمت دماهای بالاتر را موجب شده است. مغناطش اشباع با جانشانی La و Ga ناشی از اثرات کاهش هیبریداسیون Fe-Fe و رقیق شدگی گشتاور مغناطیسی با جانشانی یک اتم غیرمغناطیسی کاهش می‌یابد.

**کلیدواژگان:** بین‌فلزی، ویژگی مغناطیسی، دمای کوری، مغناطش اشباع

و ناهمسانگردی صفحه‌ای در صنعت آهن‌رباهای دائمی

و یخچال‌های مغناطیسی کاربرد وسیعی دارند [۶-۹].

دلیل دمای کوری پایین را می‌توان به فواصل Fe-Fe

کوچک‌تر از مقدار بحرانی  $2.45 \text{ \AA}$  که برای برهم‌کنش

تبادلی فرومغناطیس لازم است، دانست [۱۰].

وارد کردن عناصر سبک (H، C و N) در شبکه بلوری

$\text{R}_2\text{T}_{17}$  نه تنها با افزایش فواصل Fe-Fe منجر به

افزایش دمای کوری می‌شود بلکه ناهمسانگردی

صفحه‌ای آنها به محوری نیز تغییر می‌کند. از طرفی این

ترکیب‌ها از نظر ترمودینامیکی ناپایدار و در دماهای بالا

( $> 700^\circ\text{C}$ ) به کاربید و نیتريد خاکی نادر تجزیه

می‌شوند. از این رو جانشانی اتم‌های غیرمغناطیسی Si،

#### مقدمه

ترکیب‌های بین فلزی متشکل از عناصر خاکی نادر

(R) و عناصر فلزهای واسط  $3d$  (T) به سبب

ویژگی‌های مغناطیسی جالب توجه و کاربردهای

بسیارشان در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از

پژوهشگران بوده است. این رفتار و ویژگی‌های

منحصربه‌فرد ناشی از هم‌زیستی عناصر خاکی نادر و

عناصر فلزهای واسط  $3d$  با ویژگی‌های مغناطیسی

متفاوت در کنار یکدیگر است [۱-۵]. از جمله

ترکیب‌های بین فلزی با ویژگی‌های مغناطیسی ویژه

می‌توان به خانواده ترکیب‌های  $\text{R}_2\text{T}_{17}$  اشاره کرد که با

وجود گشتاور مغناطیسی بزرگ Fe، دمای کوری پایین

با نشان دادن اتم‌های La و Ga در ساختار  $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  انتظار می‌رود با تغییر ماهیت عنصر خاکی نادر و تعداد اتم‌های آهن، اثر مشترک برهم‌کنش‌های میدان بلوری، برهم‌کنش‌های تبدیلی و ناهمسانگردی مغناطوبلوری تغییر کند و پدیده‌های جالبی به وجود آید.

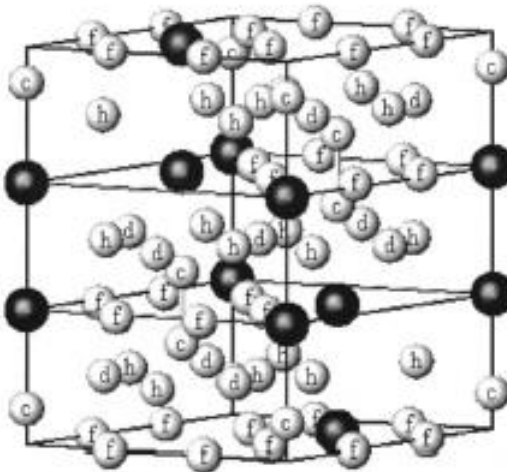
### شرح آزمایش

نمونه‌های مورد نیاز  $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  (با  $y=0$  و  $x=1$ ) با استفاده از عناصر سازنده ترکیب (Pr, La, Ga و Fe) با درجه خلوص ۹۹٫۹ درصد و حفظ موازنه عنصری به منظور حفظ و تشکیل شدن فاز اصلی  $\text{Pr}_2\text{Fe}_{17}$ ، به عنصر خاکی نادر Pr و یا La به مقدار ۲٪ وزنی اضافه شد. مرحله ذوب مخلوط عناصر با استفاده از کوره قوس آرگون و در قالب‌های مسی که با جریان آب خنک می‌شوند، انجام شد. قالب به کار برده شده در کوره قوس آرگون به شکل نیم‌کره است و عناصر به گونه‌ای در کوره قوس قرار داده شدند که ابتدا عنصری با بالاترین دمای ذوب در معرض قوس الکتریکی ذوب شود و هر نمونه چندین بار پشت و رو و دوباره ذوب شد تا فاز همگنی تشکیل شود. سپس نمونه‌ها در ورقه تانتالوم پیچیده و در لوله‌های کوارتز تخلیه شده در دمای  $800^\circ\text{C}$  به مدت ۲۵ روز بازپخت و به طور ناگهانی سرد شدند. همگنی فاز و ساختار بلوری نمونه‌های پودری با استفاده از پراش سنج پرتو X و با تابش تک فام  $\text{Cu-K}\alpha$  ( $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ ) با گام زاویه‌ای  $0,017^\circ$  بررسی و پردازش شدند.

وابستگی دمایی مغناطش با استفاده از مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی (VSM) در میدان مغناطیسی ثابت T  $0,05$  با آهنگ دمایی  $10 \text{ K/min}$  (دستگاه VSM شرکت Lake-shore واقع در آزمایشگاه MMME دانشگاه صنعتی دلفت هلند) بررسی شد. اندازه‌گیری مغناطش برحسب میدان نمونه‌های پودری در دمای  $5\text{K}$  با استفاده از مغناطیس‌سنج دارای سیستم تداخل

Ga و یا Al به جای Fe در بسیاری از ترکیب‌های  $\text{R}_2\text{T}_{17}$  به عنوان جانشین عناصر سبک منجر به افزایش دمای کوری و تغییر ناهمسانگردی مغناطیسی این ترکیب‌ها شده است [۱۱-۱۵].

جفت‌شدگی ممان‌های مغناطیسی اتم‌های آهن و خاکی نادر در ترکیب‌های  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  برای خاکی نادر سبک (R = Pr, Nd, ...) فرومغناطیس و چنانچه خاکی نادر سنگین (R = Gd, Ho, ...) باشد، فری مغناطیس است [۱۴-۱۶]. ترکیب‌های  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  با خاکی نادر سبک و سنگین به ترتیب در ساختار بلوری لوزی رخ نوع  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  (گروه فضایی R-3m) و شش‌گوشی نوع  $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$  (گروه فضایی  $P6_3/mmc$ ) شکل می‌گیرند. در این ساختار اتم‌های Fe همانند شکل ۱ واقع بر چهار جایگاه متفاوت  $18h$ ،  $18f$ ،  $9d$  و  $6c$  می‌باشند و تنها یک جایگاه  $6c$  توسط اتم R اشغال می‌شود [۱۷ و ۱۸].



شکل ۱. یاخته یک ساختار بلوری ترکیب‌های خانواده  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$ . نمادهای سیاه بزرگ اتم‌های خاکی نادر (R) و نمادهای سفید کوچک اتم‌های آهن (T) هستند. در شکل جایگاه‌های  $6c$  با  $c$ ،  $9d$  با  $d$ ،  $18f$  با  $f$  و  $18h$  با  $h$  مشخص شده‌اند [۱۶].

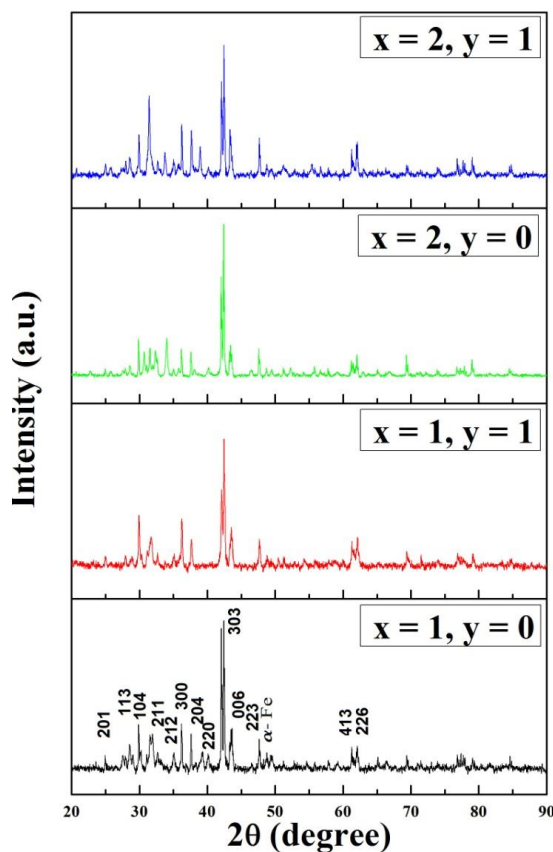
نظم مغناطیسی ترکیب  $\text{Pr}_2\text{Fe}_{17}$  به صورت فرومغناطیس با دمای کوری نزدیک دمای اتاق حدود  $295 \text{ K}$  است و جهت‌گیری آسان گشتاورهای مغناطیسی در امتداد صفحه اصلی ساختار لوزی رخ است [۱۹].

می‌دهند. با افزودن اتم لانتانیم و گالیم پارامترهای شبکه افزایش می‌یابد و این افزایش در پارامترهای یاخته یکه به سبب بزرگ‌تر بودن شعاع یونی La ( $r_{La^{3+}} = 117/2$ ) نسبت به Pr ( $r_{Pr^{3+}} = 113$ ) و Ga ( $r_{Ga^{3+}} = 76$ ) نسبت به Fe ( $r_{Fe^{3+}} = 69$ ) است. پارامترهای شبکه و حجم یاخته یکه در جدول ۱ آورده شده است که در مقایسه با نتایج دیگران هم‌خوانی خوبی دارند [۱۰-۱۶]. از آنجا که شعاع یونی La و Ga هردو نسبت به عناصر اصلی ساختار بزرگتر است، جانشانی آنها در یاخته یکه منجر به انبساط شبکه بلوری می‌شود و تقریباً هیچ‌گونه قلّه اضافی (درصد کم  $\alpha$ -Fe فاز متداول مشاهده شده در جانشانی گالیم به جای آهن در این ترکیب‌هاست [۲۰، ۲۱]) مبنی بر وجود ناخالصی در نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود.

کوانتمی ابرسانا (SQUID) و میدان مغناطیسی تا ۵T، با طراحی کوانتمی MPMS-5 واقع در مرکز تحقیقاتی RID دانشگاه صنعتی دلفت هلند به کار برده شده است، انجام شد.

## بحث

شکل ۲ الگوهای پراش پرتو X نمونه‌های  $Pr_2$ - $La_yFe_{17-x}Ga_x$  و شاخص‌های میلر این ترکیب‌ها را نشان می‌دهد. احتمالاً در این ترکیب‌ها اتم‌های La به درستی جانشین اتم‌های Pr و اتم‌های Ga به درستی نیز جانشین اتم Fe شدند ساختار لوزی رخ نوع  $Th_7Zn_{17}$  با گروه فضایی R-3m (مطابق با کارت استاندارد ۱۴۵۶-۰۴۸-۰۰) را تشکیل می‌دهند. داده‌های پراش پرتو X نمونه‌های پودری تمام پراش‌های متناظر با گروه فضایی R-3m را نشان



شکل ۲. الگوهای پراش پرتو X و شاخص‌های میلر ترکیب‌های  $Pr_{2-y}La_yFe_{17-x}Ga_x$ .

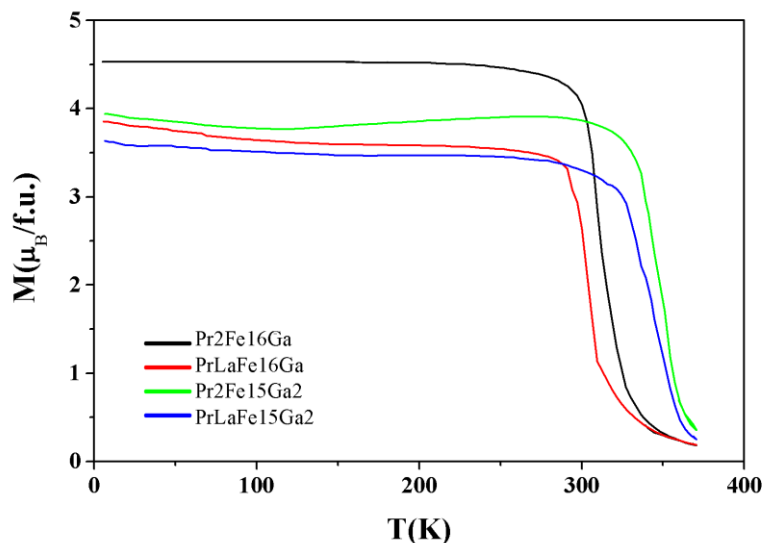
جدول ۱. پارامترهای شبکه و حجم یاخته یک  $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$ 

$V (\text{\AA}^3)$	$c (\text{\AA})$	$b (\text{\AA})$	$a (\text{\AA})$	$\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$
۷۸۹٫۴	۱۲٫۴۷۳	۸٫۵۸۳	۸٫۵۸۳	$y = 0$ و $x = 0^*$
۷۹۹٫۱	۱۲٫۴۴۰	۸٫۶۱۳	۸٫۶۱۳	$y = 0$ و $x = 1$
۸۱۰٫۳	۱۲٫۵۱۷	۸٫۶۴۶	۸٫۶۴۶	$y = 0$ و $x = 2$
۸۰۶٫۹	۱۲٫۵۰۶	۸٫۶۲۹	۸٫۶۲۹	$y = 1$ و $x = 1$
۸۱۰٫۶	۱۲٫۵۸۷	۸٫۶۶۱	۸٫۶۶۱	$y = 1$ و $x = 2$

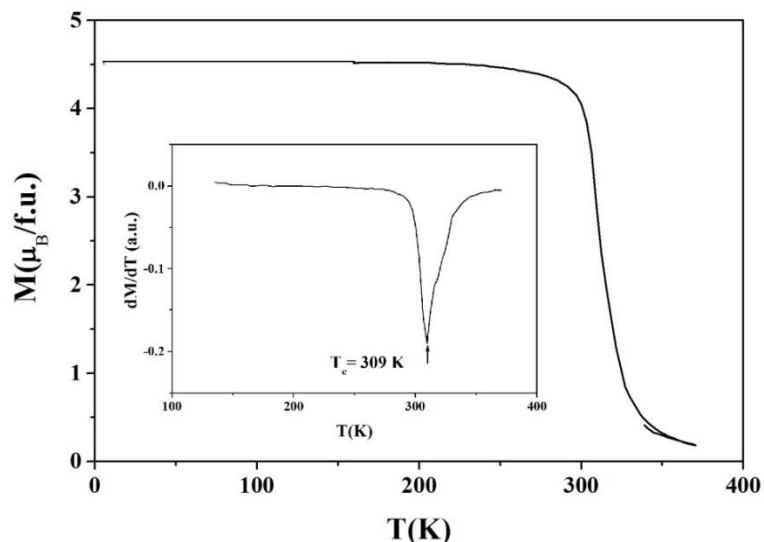
\* برگرفته از مرجع [۱۹].

همراه با افزایش حجم یاخته یکه است ناشی از کاهش برهم‌کنش تبدلی R-Fe کاهش یابد. از طرفی نشانندن اتم گالیم به‌جای آهن افزایش دمای کوری به‌سمت دماهای بالاتر را موجب شده است. انتظار می‌رود دمای کوری نمونه‌ها با جانمایی گالیم که همراه با افزایش حجم یاخته یکه است، کاهش یابد. اما این رفتار تنها نباید با در نظر گرفتن اثرات هندسی افزایش یاخته یکه بررسی کرد، بلکه اشغال ترجیحی جایگاه‌های اتم Fe توسط اتم غیرمغناطیسی Ga را نیز می‌بایست در نظر گرفت که می‌توان به کاهش برهم‌کنش تبدلی مثبت ۳d-۳d ناشی اشغال ترجیحی جایگاه‌های اتم Fe توسط اتم غیرمغناطیسی Ga نسبت داد. جانمایی ترجیحی اتم غیرمغناطیسی Ga در جایگاه‌های ۱۸h و ۱۸f [۲۱] آهن همراه با کاهش برهم‌کنش‌های تبدلی مثبت است که منجر به کاهش تعداد پیوندهای پادرومغناطیسی Fe-Fe و افزایش دمای کوری می‌شود. فواصل بین‌اتمی Fe-Fe (کمتر از  $2,45 \text{\AA}$ ) با جانمایی گالیم افزایش یافته‌اند که منجر به قویتر شدن برهم‌کنش تبدلی منفی می‌شود و شکل‌گیری فرومغناطیسی گشتاورهای مغناطیسی را فراهم می‌آورد. افزایش دمای کوری ناشی از جانمایی Ga اثری مغناطوحجمی است.

در شکل ۳ گذار فرومغناطیس به پارامغناطیس به‌خوبی خود را به‌صورت کاهش ناگهانی مغناطش به صفر نشان می‌دهد. دمای کوری (از نوع گذار فاز مغناطیسی مرتبه دوم است، یعنی دمای گذار خود را به‌صورت نقاط کمینه در مشتق اول مغناطش برحسب دما و یا صفر شدن مشتق دوم مغناطش برحسب دما نشان می‌دهد). ترکیب‌ها که از مشتق اول مغناطش برحسب دما ( $dM/dT$ ) [۱۰] به‌دست آمده در جدول ۲ آورده شده است. شکل ۴ منحنی مغناطش برحسب دما به‌همراه مشتق اول آن برای نمونه  $\text{Pr}_7\text{Fe}_{16}\text{Ga}$  نشان می‌دهد. مقدار دمای کوری نمونه‌ها با جانمایی La کاهش یافته است در حالی که با جانمایی Ga افزایش یافته است. از آنجایی که دمای کوری رابطه مستقیمی با برهم‌کنش‌های تبدلی دارد و برهم‌کنش‌ها وابسته به فواصل اتمی است. دمای نظم مغناطیسی در ترکیب‌های بین فلزی حاکی نادر فلز واسط به‌طور کلی با برهم‌کنش‌های تبدلی زیرشبکه گشتاور مغناطیسی Fe، حاکی نادر و بین زیرشبکه‌ای (۳d-۳d، ۴f-۴f و ۴f-۴f) تعیین می‌شود [۲۲]. نشانندن اتم لانتانیم به‌جای آهن کاهش دمای کوری به‌سمت دماهای پایین‌تر را موجب شده است. انتظار می‌رود دمای کوری نمونه‌ها با جانمایی لانتانیم که



شکل ۳. وابستگی دمایی مغناطش نمونه‌های  $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  در میدان مغناطیسی ثابت  $T = 0.05$ .



شکل ۴. منحنی مغناطش برحسب دما به همراه مشتق اول آن برای نمونه  $\text{Pr}_7\text{Fe}_{13}\text{Ga}$ .

در منحنی مغناطش نمونه‌ها دیده می‌شود. با رسم منحنی مغناطش برحسب  $1/H^2$  (منحنی ضمیمه شده در شکل ۴) می‌توان مغناطش اشباع نمونه‌ها و همچنین ناهمسانگردی مغناطیسی از قانون روش اشباع [۲۳] (روابط ۱ و ۲) را که در جدول ۲ آورده شده است، در دمای ۵ K به دست آورد.

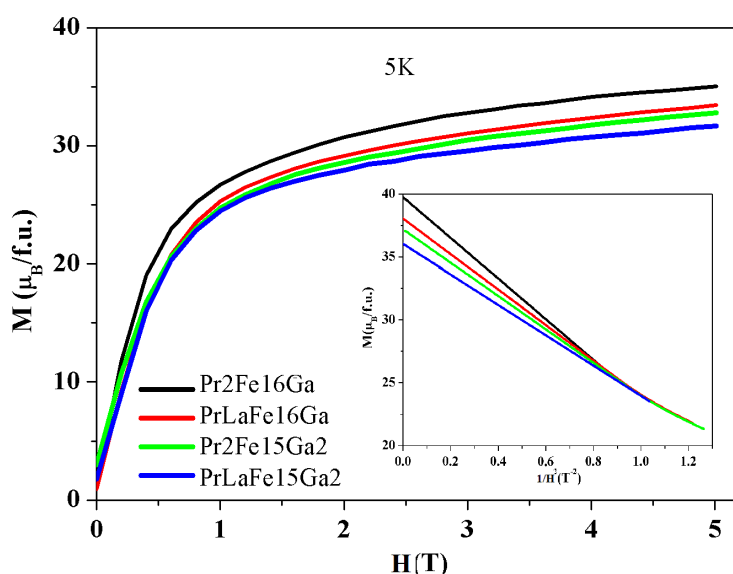
$$M = M_s \left( 1 - \frac{a}{H^2} \right) \quad ۱$$

$$a = \frac{8}{105} \left( \frac{k}{M_s} \right)^2 \quad ۲$$

شکل ۵ رفتار وابسته به میدان منحنی‌های مغناطش را در دمای ۵ K را نشان می‌دهد. رفتار منحنی‌های مغناطش برحسب میدان به همراه رفتار دمایی آنها و مشاهده دمای کوری نمونه‌ها با افزایش دما (شکل ۳)، نظم فرومغناطیسی این ترکیب‌ها تأیید می‌شود (در دمای K ۵ در نبود میدان مغناطیسی، مغناطش نمونه‌ها صفر نیست و همچنین با افزایش میدان رفتار اشباعی مغناطش مشاهده می‌شود). همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود با افزایش میدان، ناشی از جهت‌گیری گستاورهای مغناطیسی در راستای میدان رفتار اشباعی

افزایش مقدار عناصر غیرمغناطیسی (Ga) است. اثرات مغناطوحجمی در مقادیر کم جاننشانی مهم است در حالی که رقیق شدگی گشتاور مغناطیسی با افزایش جاننشانی مهم‌تر خواهد شد. همانند این رفتار در جاننشانی Ga به جای آهن در ترکیب  $\text{Nd}_7\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  مشاهده شده است [۲۴].

در این روابط  $M$  مغناطش برحسب  $\mu_B/\text{f.u.}$ ،  $M_s$  مغناطش اشباع و  $k$  ناهمسانگردی مغناطوبلوری است. مغناطش اشباع با جاننشانی Ga نیز کاهش یافته است. مغناطش اشباع در دمای کم محاسبه می‌شود تا مغناطش اشباع نتیجه‌ای از رقابت میان اثر مغناطوحجمی ناشی از انبساط یاخته یک‌ه با جاننشانی اتمی خاص (La) که کاهش میانگین هیبریداسیون Fe-Fe را منجر می‌شود و



شکل ۵. منحنی مغناطش برحسب میدان نمونه‌های  $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  در دمای ۵ K. منحنی ضمیمه شده در شکل، منحنی مغناطش برحسب  $1/H^2$  را برای محاسبه مغناطش اشباع نمونه‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج مشخصه‌یابی‌های مغناطیسی  $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$ : دمای کوری، مقدار میانگین مغناطش اشباع در واحد فرمولی در دمای ۵ K و ناهمسانگردی مغناطوبلوری.

$k$ ( $10^4 \text{ T}^* \text{f.u.} * \text{gr}^{-1}$ )	$M_s$ ( $\mu_B/\text{f.u.}$ )	$T_C$ (K)	$\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$
-	-	۲۹۵	$y = 0$ و $x = 0^*$
۱,۷۹	۳۹,۶	۳۰۹	$y = 0$ و $x = 1$
۱,۶۱	۳۷,۹	۳۴۸	$y = 0$ و $x = 2$
۱,۵۲	۳۷	۳۰۳	$y = 1$ و $x = 1$
۱,۴۳	۳۶	۳۴۱	$y = 1$ و $x = 2$

\* برگرفته از مرجع [۱۹].

کاهش مشاهده شده است. در واقع گالیم یک اتم غیرمغناطیسی با گشتاور مغناطیسی صفر است که با جاننشانی آن برای آهن، گشتاور مغناطیسی کل را کاهش می‌دهد و منجر به کاهش مغناطش اشباع می‌شود.

مغناطش اشباع با افزایش مقدار La و Ga کاهش می‌یابد. با جاننشانی La انبساط شبکه بلوری و کاهش هیبریداسیون Fe-Fe به وجود خواهد آمد و با جاننشانی Ga ناشی از اثرات رقیق شدگی گشتاور مغناطیسی

intermetallic compounds and their carbides: Structure and magnetic behaviors, *Journal of Magnetism and magnetic materials* **322** (2010) 224-229.

[5] J. Pospisil, J.P. Vejpravova, D. Niznansky, V. Sechovsky, Magnetic properties Mössbauer study and MCE in compounds  $RE_2Fe_{17-x}Cr_x$  (RE=Pr, Gd), *Journal of Magnetism and magnetic materials* **310** (2007) e629-e631.

[6] X.C. Kou, F.R. de Boer, R. Grossinger, G. Wiesinger, H. Suzuki, H. Kitazawa, T. Takamasu, G. Kido, Magnetic anisotropy and magnetic phase transitions in  $R_2Fe_{17}$  with R = Y, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm and Lu, *Journal of Magnetism and magnetic materials* **177-181** (1998) 1002-1007.

[7] K. Takeda, T. Maeda, T. Katayama, Temperature dependence of the magneto-crystalline anisotropy in  $R_2Fe_{17}$  (R=Y, Gd, Tb, Dy, Er), *Journal of Alloys and Compounds* **281** (1998) 50-55.

[8] L. Bessais, K. Younsi, S. Khazzan, N. Mliki, X-ray and intrinsic magnetic properties of nanocrystalline  $Sm_2(Fe,M)_{17}$  (M=Si, Ga, Co, Cr, Zr or Mo), *Intermetallics* **19** (2011) 997-1004.

[9] K. Mandal, A. Yan, P. Kershl, A. Handstein, O. Gutfleisch, K.-H. Muller, The study of magnetocaloric effect in  $R_2Fe_{17}$  (R=Y, Pr) alloys, *Journal of Physics D: Applied Physics* **37** (2004) 2628.

[10] R. Guetari, R. Bez, A. Belhadj, K. Zehani, A. Bezerghéanu, N. Mliki, L. Bessais, C.B. Cizmas, Influence of Al substitution on magnetocaloric effect of  $Pr_2Fe_{17-x}Al_x$ , *Journal of Alloys and Compounds* **588** (2014) 64-69.

[11] J.M.D. Coey, H. Sun, Improved magnetic properties by treatment of iron-based rare earth intermetallic compounds in ammonia, *Journal of Magnetism and magnetic materials* **87** (1990) 251-254.

[12] J.M.D. Coey, H. Sun, Y. Otani, D.P.F. Hurley, Gas-phase carbonation of  $R_2Fe_{17}$ ;

ناهمسانگردی مغناطیبلوری با جانشانی La و Ga کاهش یافته است.

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه ساختار بلوری و ویژگی‌های مغناطیسی  $Pr_{2-y}La_yFe_{17-x}Ga_x$  (y=۰ و ۱ و x=۱ و ۲) بررسی شد. نتایج نشان داد که با جانشانی لانتانیم و گالیم، پارامتر شبکه افزایش می‌یابد. دمای کوری نمونه‌ها با جانشانی لانتانیم که همراه با افزایش حجم یاخته بکه است، ناشی از کاهش برهم‌کنش تبدلی مثبت R-Fe کاهش می‌یابد و از طرفی نشان‌دهنده اتم گالیم به جای آهن افزایش دمای کوری به سمت دماهای بالاتر را موجب شده است که ناشی از افزایش برهم‌کنش تبدلی منفی  $3d-3d$  و جفت شدگی فرومغناطیس گشتاورهای مغناطیسی است. مغناطش اشباع با جانشانی La و Ga کاهش می‌یابد که ناشی از اثرات کاهش هیبریداسیون Fe-Fe و رقیق‌شدگی گشتاور مغناطیسی با جانشانی یک اتم غیرمغناطیسی است.

## مرجع‌ها

[1] X.P. Zhong, R.J. Radwanski, F.R. De Boer, T.H. Jacobs, K.H.J. Buschow, Magnetic and crystallographic characteristics of rare-earth ternary carbides derived from  $R_2Fe_{17}$  compounds, *Journal of Magnetism and magnetic materials* **86** (1990) 333-340.

[2] L. Bessais, C. Djega-Mariadassou, A. Nandra, M.D. Appay, E. Burzo, Hard magnetic  $Sm(Fe,Si)_9$  carbides: Structured and magnetic properties, *Physical Review B* **69** (2004) 64402-64409.

[3] L. Bessais, E. Dorolti, C. Djega-Mariadassou, High coercivity in nanocrystalline carbides  $Sm(Fe,Ga)_9C$ , *Applied Physics Letter* **87** (2005) 192503-192511.

[4] S. Khazzan, N. Mliki, L. Bessais, C. Djega-Mariadassou, Rare-earth iron-based

- [21] J.P. Liu, F.R. de Boer, P.F. de Châtel, R. Coehoorn, K H J Buschow, On the 4f-3d exchange interaction in intermetallic compounds, *Journal of Magnetism and magnetic materials* **132** (1994) 159-179.
- [22] L. Néel, La loi d'approche en a: H et une nouvelle théorie de la dureté magnétique, *Journal de Physique et Le Radium* **9** (1948) 184-192.
- [23] I.A. Al-Omari, Y. Radzyner, Y. Yeshurun, S.S. Jaswal, D.J. Sellmyer, Annealing effects on the magnetic properties of  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$ , *Journal of Magnetism and magnetic materials* **208** (2000) 93-96.
- R = Y, Sm, *Journal of Magnetism and magnetic materials* **98** (1991) 76-78.
- [13] J.L. Wang, F.R. De Boer, X.F. Han, N. Tang, C. Zhang, D. Zhang, E. Bruck, F.M. Yang, Structural and magnetic properties of  $\text{R}_2(\text{Fe},\text{Si})_{17}$  compounds with R=Tb and Er, *Journal of Alloys and Compounds*. **284** (1999) 289-294.
- [14] E. Girt, Z. Altounian, J. Yang, Structural and magnetic properties of  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17-\delta}\text{Cr}_\delta$  ( $\delta=0, 0.5, 1, 1.9$ ), *Journal of Applied Physics* **81** (1997) 5118-5122.
- [15] R. Srilatha, V.S. Muty, G. Markandeyulu, Magnetic properties of  $\text{YGd}_2\text{Fe}_{17-x}(\text{Ga},\text{Al})_x$  ( $x=0-8$ ), *Journal of Applied Physics* **97** (2005) 10M503-10M509.
- [16] W.B. Yelon, W.J. James, J.B. Yang, K. Kamaraju, Q. Cai, Z. Chu, S.K. Malik, Observation of novel disordered rhombohedral  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  (R=rare earth) based compounds, *Journal of Applied Physics* **91** (2002) 8486-8492.
- [17] F. Pourarian, R. Obermyer, Y. Zheng, S.G. Sankar, W.E. Wallace, Crystal structure and magnetic characteristics of alloys based on R-Fe-Si (R=Y, Nd, Gd, Dy, Ho, Er), *Journal of Applied Physics* **73** (1993) 6272.
- [18] F. Pourarian, R. Obermye, S.G. Sankar, Effect of cobalt substitution on magnetic properties of  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  silicides (R=Y, Gd, Tb, Er, and Tm), *Journal of Applied Physics* **75** (1994) 6262.
- [19] W.C. Chang, S.H. Tsai, L.J. Chao, Z.B. Hu, H. Luo, W.B. Yelon, Magnetic and neutron diffraction studies of  $\text{R}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Al}_x\text{C}$  (R=Y, Pr, Tb and Ho) intermetallic compounds with  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ -type crystal structure, *Journal of Magnetism and magnetic materials* **172** (1997) 277-284.
- [20] M. Venkatesan, K.V.S. Rama Rao, U.V. Varadaraju, Structural, magnetic and exchange interaction studies on  $\text{R}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  (R=Tm, Er and Sm) compounds, *Physica B* **291** (2000) 159-172.



## Effect of La and Ga substitution on the structural and magnetic properties of $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$ Intermetallic Compound

Parvaneh Iranmanesh<sup>1</sup>, Samira Saeednia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, 77139-36417 Rafsanjan, Iran.

<sup>2</sup> Department of Chemistry, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, 77139-36417 Rafsanjan, Iran.

Received: 28.06.2016    Final revised: 07.11.2016    Accepted: 23.11.2016

### Abstract

In this study, the crystalline structure and magnetic properties of  $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  polycrystalline compound are investigated by means of powder X-ray diffraction, vibrating Sample Magnetometer (VSM) and Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) magnetometer. The ternary intermetallic compounds  $\text{Pr}_{2-y}\text{La}_y\text{Fe}_{17-x}\text{Ga}_x$  have been synthesized and the results show that the single phase sample with the expected rhombohedral structure is formed. Upon La and Ga substitution, the lattice parameters are increased and due to the change of the anisotropy and exchange effects, the Curie temperature, magnetisation behavior and saturation magnetization is changed. The Curie temperature is decreased due to the increasing of unit cell by La substitution whereas; the Ga substitution for Fe in the samples causes the increases of Curie temperature. The La and Ga substitution leads to the decrease of saturation magnetisation as a result of reduction of the average Fe-Fe hybridization and the increase of the content of the non-magnetic element.

**Keywords:** Intermetallic, Magnetic property, Curie temperature, Saturation magnetism

---

\* Corresponding author: p.iranmanesh@vru.ac.ir