

## ساخت و بررسی نمونه‌های حجمی و لایه نازک فریت استرانسیوم

احمد پوربافرانی، پرویز کاملی و هادی سلامتی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۶/۶/۱۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۷/۳/۲۰)

### چکیده

در این مقاله نمونه‌های حجمی و لایه‌های نازک فریت استرانسیوم مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بزرگ بودن مقاومت ویژه در فریت استرانسیوم، تلفات ناشی از جریانهای گردابی را کاهش داده و به همین جهت، می‌توان از آن در مدارهای مغناطیسی مخصوص فرکانسهای بزرگ، استفاده کرد. از طرف دیگر خاصیت مغناطیسی دائم فریت استرانسیوم نیز بسیار مورد توجه است. در ابتدا به فرآیند تهیه نمونه‌های حجمی فریت استرانسیوم به روش حالت جامد می‌پردازیم. برای به دست آوردن خواص مغناطیسی بهتر، در ساخت نمونه‌ها از عامل استوکیومتری (n) یعنی نسبت  $Fe_2O_3 / SrO$  به مقدار ۵/۲۵ استفاده شد. برای کنترل رشد دانه‌ها در ساختار نمونه‌ها از افزودنیهای  $CaO$  و  $SiO_2$  استفاده کردیم. نمونه‌ها به دو صورت همسانگرد و ناهمسانگرد تهیه شدند. برای تهیه نمونه‌های ناهمسانگرد از میدان مغناطیسی حدود ۱ T برای جهت دهی دانه‌ها در حین پرس نمونه‌ها، استفاده شده است. سپس به منظور بررسی و مقایسه خواص ساختاری و مغناطیسی نمونه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد از پراش پرتو x، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و تحلیل EDAX و مغناطیس سنج استفاده شد. نتایج نشان می‌دهند که در اثر اعمال میدان، خواص ساختاری و مغناطیسی نمونه‌های ناهمسانگرد به طور قابل ملاحظه، بهبود می‌یابد که دلیل آن چرخش ذرات در اثر اعمال میدان، هنگام پرس کردن نمونه است. در مرحله بعد با استفاده از نمونه‌های حجمی، لایه‌های نازک فریت استرانسیوم را به روش تپش لیزری (PLD) تهیه کردیم. در تهیه لایه نازک از زیرلایه (۱۱۱) Si استفاده شد. سپس بررسی ساختار لایه‌ها را توسط پراش پرتو x، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و تحلیل EDAX انجام دادیم. این بررسیها روی نمونه‌های مختلف نشان داد که برای تشکیل فاز بلوری فریت استرانسیوم باید دمای زیرلایه بالاتر از  $800^\circ C$  انتخاب شود. شرایط بهینه برای ساخت لایه‌های نازک فریت استرانسیوم، در دمای زیر لایه  $840^\circ C$  و فشار اکسیژن ۷۵ mtorr به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: فریت استرانسیوم، استوکیومتری، خواص ساختاری و مغناطیسی، لایه نشانی به روش تپش لیزری

### ۱. مقدمه

روش پالس لیزر، هم‌رسوبی شیمیایی و سل-ژل تولید می‌شوند که در این بین، روش پالس لیزر روش موفق‌تری به حساب می‌آید. انگیزه تولید لایه‌های نازک فریت‌های شش گوشه به روش پالس لیزر در پی رشد موفقیت آمیز ابررساناهای دمای بالا با این روش افزایش یافت، زیرا فریت‌های شش گوشه ساختاری مشابه این ابررساناها دارند [۴]. لایه‌های فریت‌های شش گوشه در ضبط مغناطیسی و ابزارهای مورد استفاده در ناحیه میکروموج نظیر آنتن‌ها و رادارها کاربرد عمده‌ای دارند [۵ و ۶]. برای کاربرد در ضبط مغناطیسی از لایه‌های نازک بس‌بلور با اندازه دانه‌های کوچک که جهت آسان مغناطیسی به موازات یا عمود بر سطح

فریت استرانسیوم ( $SrO \cdot n Fe_2O_3$ ) از فریت‌های نوع M با ساختار بلوری شش گوشه است. این گروه از فریت‌ها، به دلیل کاربرد در مغناطیسهای دائمی، حافظه‌ها و حسگرهای مغناطیسی و ابزارهای الکترونیکی مورد استفاده در ناحیه میکروموج، بسیار مورد توجه هستند. کاربرد عمده این مواد به دلیل میدان پسماندزادای بالا و هزینه پایین تهیه آنهاست. به علاوه، این مواد خیلی پایدار بوده و مقاومت ویژه الکتریکی بالایی دارند [۱-۳].

لایه‌های نازک فریت‌های شش گوشه، نظیر فریت استرانسیوم نیز اهمیت ویژه‌ای دارند. این لایه‌ها به روشهای مختلفی نظیر

تهیه گردید. سپس به کلوخه‌های حاصل از تفجوشی به مقدار ۰/۴ درصد وزنی کلوخه‌ها، اکسید کلسیم CaO و به اندازه ۰/۸ درصد وزنی کلوخه‌ها SiO<sub>۲</sub> با خلوص بالا به عنوان مواد افزودنی اضافه شدند [۱۰]. این مواد افزودنی، فرآیند کنترل رشد دانه‌ها را برای رسیدن به خواص ساختاری و مغناطیسی بهتر انجام می‌دهند [۱۲-۱۴]. مخلوط مواد افزودنی و کلوخه‌ها به همراه آب مقطر به مدت ۲۱ ساعت توسط آسیاب گلوله‌ای، آسیاب شدند تا اینکه اندازه دانه‌ها تا حد ۱ μm کوچک شود و اکسیدهای واکنش ندادند در ترکیب، نظیر Fe<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub> نیز به طور همگن مخلوط شوند. دوغاب حاصل از مرحله قبل پس از حذف آب اضافی آن، داخل قالب استوانه‌ای شکل ریخته شده و به کمک دستگاه پرس که قابلیت اعمال فشار تا ۳۰ تن را دارد، به صورت قرصهایی به قطر ۳cm و ضخامت ۱cm درآمدند. نمونه‌های حجمی به صورت همسانگرد و ناهمسانگرد تهیه شدند. با توجه به اینکه نمونه‌های فریت استرانسیوم دارای خاصیت ناهمسانگردی هستند، لذا پیش‌بینی می‌شد که با اعمال میدان در راستای محور قالب به هنگام پرس، دانه‌ها در جهت میدان چرخیده و به صورت منظمتری در کنار هم قرار گیرند. بنابراین به نظر می‌رسید که این عامل می‌تواند پس از تفجوشی نهایی، خواص ترکیب را تغییر دهد. در ساخت نمونه‌های ناهمسانگرد، پودرهای مرطوب (دوغاب) را داخل قالب ریخته و با قرار دادن قالب در وسط پیچ و به کمک دستگاه پرس، پودرهای مرطوب را ضمن اعمال میدان مغناطیسی به اندازه ۰/۸ T به موازات محور قالب، فشرده کردیم. در نمونه‌های همسانگرد به اعمال میدان مغناطیسی نیاز نیست. اعمال میدان سبب بهبود خواص مغناطیسی در نمونه‌های ناهمسانگرد می‌شود. پس از شکل‌گیری نمونه‌ها، به منظور شرکت دادن اکسیدهای واکنش ندادند نظیر Fe<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub> در واکنشها و تبدیل آنها به فاز مورد نظر، فرآیند تفجوشی نهایی با روند گرمادهی مشابه با تفجوشی اولیه روی نمونه‌ها انجام گرفت [۱۱]. برای بررسی خواص ساختاری نمونه‌ها از طیف پراش پرتو x (تابش Cu K α<sub>۱</sub>) از دستگاه Philips Xpert با آهنگ رویش ۰/۰۵ deg/s و تصاویر SEM (دستگاه "Philips XL30") استفاده شد. منحنی پسماند نمونه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد نیز، به کمک دستگاه Magnet-physik مدل ۱۷۶۳۰۹۶ اندازه‌گیری شده است.

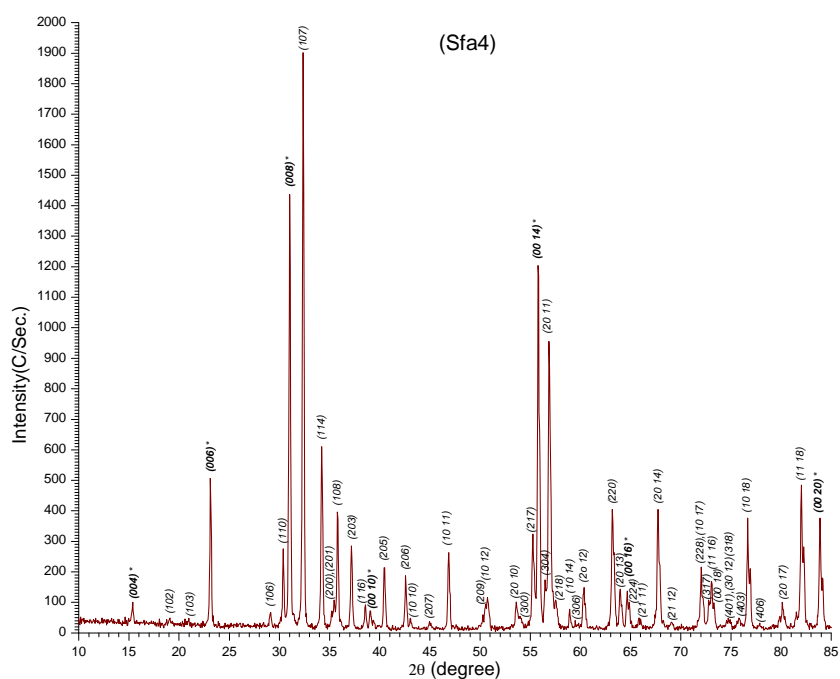
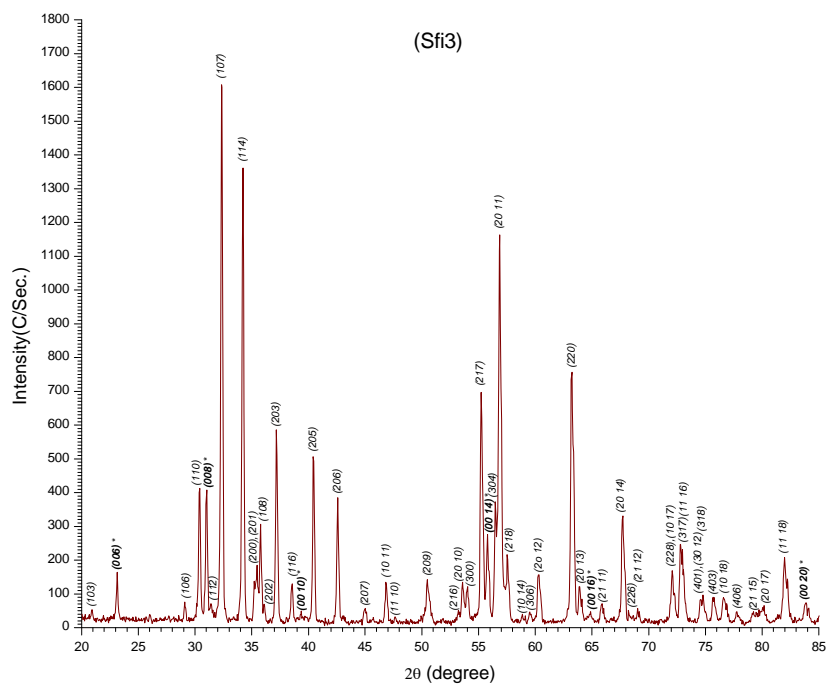
لایه است استفاده می‌شود. برای کاربرد در ناحیه میکروموج، به لایه تک بلور با رشد در جهت محور C نیاز است [۷]. ترکیب شیمیایی و ریز ساختار این لایه‌ها، رفتار مغناطیسی و الکتریکی آنها را کنترل می‌کند و از آنجایی که در روش پالس لیزر، پارامترهای مختلفی بر این گونه خواص اثر می‌گذارد، لازم است که شرایط بهینه برای ساخت این لایه‌ها حاصل شود [۸]. در این مقاله، ساخت و بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی نمونه‌های حجمی و لایه‌های نازک فریت استرانسیوم انجام شده است. با انتخاب نسبت درصد آهن به استرانسیوم در مواد اولیه به مقدار ۵/۲۵، خواص مغناطیسی نسبتاً خوبی برای نمونه‌های حجمی به دست آمد. همچنین در تهیه لایه نازک، با تغییر فشار اکسیژن محفظه لیزر و انتخاب دمای زیر لایه در حد مناسب، شرایط نسبتاً بهینه‌ای برای تشکیل لایه مورد نظر، فراهم گردید.

## ۲. ساخت نمونه‌ها و آزمایشها

### ۲.۱. ساخت نمونه‌های حجمی

برای ساخت نمونه‌های حجمی از روش متالورژی پودر (روش حالت جامد) استفاده کردیم. مواد اولیه برای ساخت این نمونه‌ها، اکسید آهن Fe<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub> و کربنات استرانسیوم SrCO<sub>۳</sub> با خلوص ۹۹/۹ درصد انتخاب شدند. به دلیل اینکه استوکیومتری مواد اولیه اثر زیادی بر خواص مغناطیسی نمونه‌ها دارد، بنابراین عامل استوکیومتری (n) یعنی نسبت SrO / Fe<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub> به مقدار ۵/۲۵ انتخاب شد و مواد اولیه با درصد استرانسیوم بیشتر نسبت به استوکیومتری کامل (n=۶) در نظر گرفته شدند [۹ و ۱۰]. بنابراین فرمول شیمیایی SrO. ۵/۲۵ Fe<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub> یا Sr Fe<sub>۱۰/۵</sub>O<sub>۱۶/۷۵</sub> را برای نمونه مورد نظر خواهیم داشت. سپس پودرهای مواد اولیه به همراه آب مقطر توسط آسیاب گلوله‌ای به مدت ۴ الی ۵ ساعت آسیاب شدند و بعد از آن با حذف آب مخلوط، آن را خشک کرده و فرآیند تفجوشی اولیه روی آنها انجام شد. روند گرمادهی تفجوشی به این صورت انتخاب شد که از دمای اتاق تا دمای ۶۰۰ °C با آهنگ ۶ °C/min، سپس از دمای ۶۰۰ °C تا ۱۲۱۰ °C با آهنگ ۳ °C/min و پس از آن در دمای ۱۲۱۰ °C به مدت ۰/۵ ساعت گرمادهی شد [۱۱]. به منظور اطمینان از عدم حضور ناخالصی‌ها و تشکیل فاز مورد نظر، کلوخه‌های حاصل از تفجوشی مقدماتی، به صورت پودر در آمده و طیف پرتو x از آنها





شکل ۲. طیف پراش پرتو X مربوط به نمونه‌های همسانگرد Sfi و ناهمسانگرد Sfa.

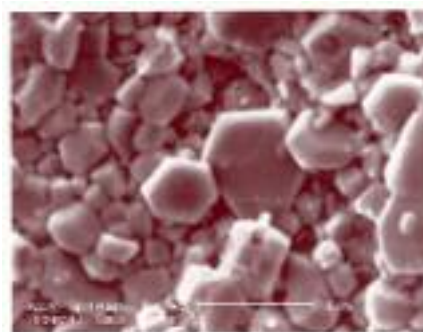
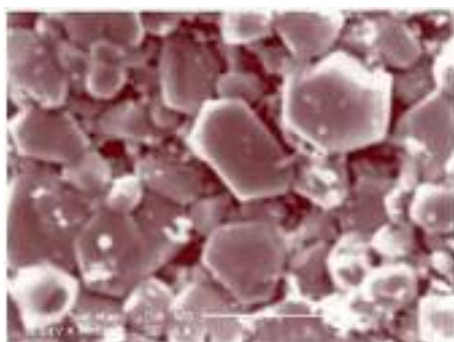
بسیار کم می‌باشد.

شکل ۲ طیف پراش پرتو X حاصل از یک نمونه همسانگرد با نام Sfi و یک نمونه ناهمسانگرد با نام Sfa را نشان می‌دهد. بررسی این دو طیف نشان می‌دهد که در هر دو نمونه پس از تفجوشی، فاز خالصی از فریت استرانسیوم تشکیل شده و

تفجوشی نهایی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که طیف شامل الگوی پراش فریت استرانسیوم به عنوان فاز اصلی و اکسید آهن ( $Fe_2O_3$ ) به عنوان فاز ثانوی است. با توجه به اینکه حتی قله‌های اصلی مربوط به اکسید آهن نظیر (۲۲۲) و (۶۲۲) دارای شدت کم هستند، بنابراین درصد این فاز در ترکیب،

جدول ۲. مقایسه شدت قله‌های ( $00L$ ) در نمونه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد.

قله‌های ( $00L$ )	شدت نسبی در نمونه همسانگرد (Sfi)	شدت نسبی در نمونه ناهمسانگرد (Sfa)
(۰۰۶)	۱۲/۰	۳۱/۶
(۰۰۸)	۲۴/۶	۷۸/۶
(۰۰۱۴)	۹/۴	۳۸/۷
(۰۰۱۶)	۰/۸	۳/۰
(۰۰۲۰)	۱/۴	۸/۰



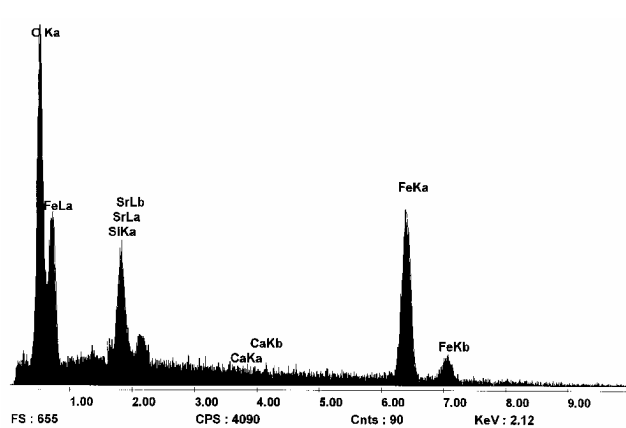
شکل ۳. تصویر SEM از نمونه همسانگرد (سمت راست) و ناهمسانگرد (سمت چپ).

همسانگرد و ناهمسانگرد را نشان می‌دهد. در هر دو تصویر، دانه‌ها به شکل شش‌گوشی منظم با تقارن شش تایی و در تطابق با سلول واحد فریت استرانسیوم، شکل گرفته‌اند. اندازه این دانه‌ها در هر دو نمونه از  $0.5 \mu m$  تا  $5 \mu m$  متغیر است. به نظر می‌رسد که شکل‌گیری دانه‌ها در نمونه ناهمسانگرد نسبت به نمونه همسانگرد، تا حدودی منظم‌تر شده و در راستای میدان مغناطیسی جهت‌گیری کرده‌اند. این نتایج تاییدی بر نتایج حاصل از پراش پرتو x است.

برای پی بردن به چگونگی استوکیومتری نمونه‌ها و اطلاع از درصد وزنی عناصر مختلف موجود در هر نمونه و مقایسه آن با درصد وزنی استفاده شده در مراحل ساخت و به خصوص مطالعه چگونگی اثر مواد افزودنی در رشد دانه‌ها، توسط میکروسکوپ الکترونی، تحلیل EDAX بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. انجام تحلیل EDAX بر روی منطقه سطحی از نمونه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد (تصاویر ۴ و ۵)، بیانگر تطابق نسبی استوکیومتری نمونه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد با مقدار انتخاب شده در مواد اولیه بود. انجام

قله‌های ناخالصی  $Fe_2O_3$  نیز در حد حساسیت دستگاه پراش پرتو x، قابل ردیابی نیستند. قله‌های غالب در فریت استرانسیوم همسانگرد (۱۰۷)، (۱۱۴) و (۲۰۱۱) هستند در حالی‌که در نمونه‌های ناهمسانگرد علاوه بر این قله‌ها، قله‌های ( $00L$ ) نیز به طور قابل ملاحظه‌ای تقویت شده‌اند. در جدول ۲ شدت قله‌ها با هم مقایسه شده‌اند. تقویت این قله‌ها ناشی از اعمال میدان مغناطیسی در حین پرس کردن نمونه است که منجر به چرخش ذرات پودر در اثر اعمال میدان شده و سبب می‌شود که راستای c یا جهت  $<00L>$  از صفحات بلوری در ساختار شش‌گوشی فریت استرانسیوم (جهت آسان مغناطیسی بلوری) به موازات میدان مغناطیسی قرار گیرند [۶].

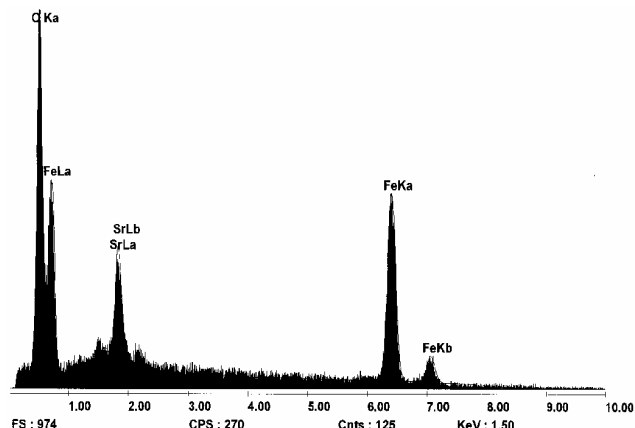
برای گرفتن تصویر مناسب از ساختار نمونه‌ها توسط SEM ابتدا سطح نمونه‌ها تا حد  $1 \mu m$  به کمک دستگاه پولیش صاف و هموار شدند و سپس فرآیند اچ کردن نمونه‌ها در محلول مناسب شامل  $10\% HF$ ،  $10\% HNO_3$  و  $20\% H_2O$  که دمای آن در مدت  $20\ min$  از  $25\ ^\circ C$  به  $70\ ^\circ C$  افزایش داده شد، انجام گرفت. شکل ۳ تصاویر SEM مربوط به نمونه‌های



Standardless, Elements  
Psi Default Set : 1

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
O K	0.1664	16.637	41.513
Si K	0.0669	0.691	0.982
Sr L	0.0668	6.681	3.044
Ca K	0.0050	0.502	0.500
Fe K	0.7549	75.489	53.961
Total		100.000	100.000

شکل ۵. تحلیل EDAX انجام شده بر روی یک منطقه سطحی از نمونه ناهمسانگرد.



Standardless, Elements  
Psi Default Set : 1

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
O K	0.1643	16.430	41.476
Sr L	0.0729	7.292	3.361
Fe K	0.7628	76.278	55.163
Total		100.000	100.000

شکل ۴. تحلیل EDAX انجام شده بر روی یک منطقه سطحی از نمونه همسانگرد.

جدول ۳. درصد وزنی Ca و Si در نمونه همسانگرد و ناهمسانگرد بر طبق تحلیل EDAX.

نوع نمونه	وضعیت	درصد وزنی Si	درصد وزنی Ca
Sfi (همسانگرد)	روی یک دانه از نمونه همسانگرد	۰/۲۲۰	۰/۰۹۴
	روی یک مرز دانه از نمونه همسانگرد	۰/۷۱۳	۰/۵۴۳
Sfa (ناهمسانگرد)	روی یک دانه از نمونه ناهمسانگرد	۰/۴۶۹	۰/۰۰۰
	روی یک مرز دانه از نمونه ناهمسانگرد	۰/۹۰۵	۰/۴۳۷

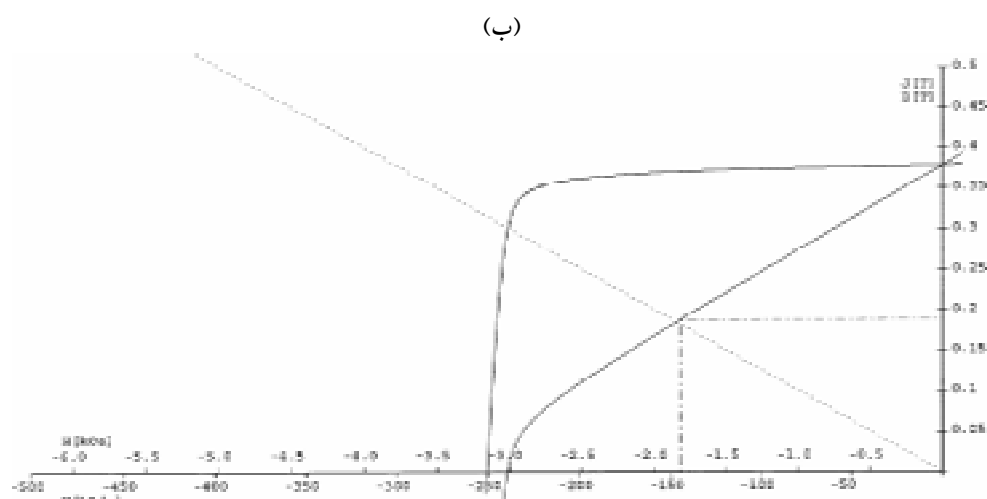
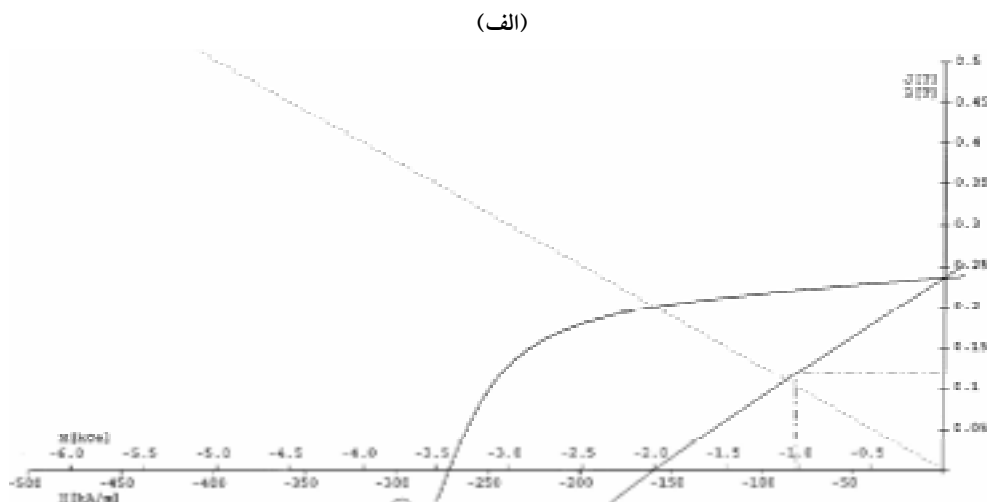
ناهمسانگرد افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به نمونه همسانگرد دارد. این افزایش ناشی از اعمال میدان مغناطیسی قوی به نمونه ناهمسانگرد و جهت گیری دانه‌ها در اثر این میدان است.

نمونه‌های لایه نازک، تحت شرایط تقریباً یکسان تهیه شدند. فشار اکسیژن در محفظه لایه نشانی به عنوان تنها عامل متغیر انتخاب شد. در نمونه اول Sfi<sup>۳</sup>, tf فشار اکسیژن محفظه ۱۰۰ mtorr در نظر گرفته شد. بررسی طیف پرتو X مربوط به این نمونه (شکل ۷) نشان می‌دهد که علاوه بر فاز غالب فریت استرانسیوم، فازهای اکسیدی دیگری نظیر FeO, SrO, Fe<sub>۳</sub>O<sub>۳</sub> نیز با درصد کم تشکیل شده است، که به نظر می‌رسد ناشی از فشار اکسیژن نسبتاً بالا در محفظه لایه نشانی است [۱۵ و ۱۶]. همچنین قله‌های حاصل شده از فریت استرانسیوم نشان می‌دهد

تحلیل EDAX به‌طور نقطه‌ای روی دو نمونه، یکبار در روی دانه‌ها و بار دیگر در مرز دانه‌ها و مقایسه بین آنها (جدول ۳)، نشان داد که مواد افزودنی CaO و SiO<sub>۲</sub> به‌طور قابل ملاحظه‌ای در مرز دانه‌ها قرار گرفته است که بیانگر تجمع مواد افزودنی در مرز دانه‌ها به منظور کنترل اندازه دانه‌ها در حین فرآیند تفجوشی است.

شکل ۶ منحنی پسماند نمونه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد را نشان می‌دهد. خواص مغناطیسی این نمونه‌ها در جدول ۴ مقایسه شده است.

در شکل ۶ علاوه بر منحنی پسماند، منحنی J بر حسب H که  $J = \mu_M = B - \mu_H$ ، نیز رسم شده است و بنابراین دو منحنی مشاهده می‌شود. مقادیر B<sub>r</sub> و (BH)<sub>max</sub> و H<sub>c</sub> در نمونه



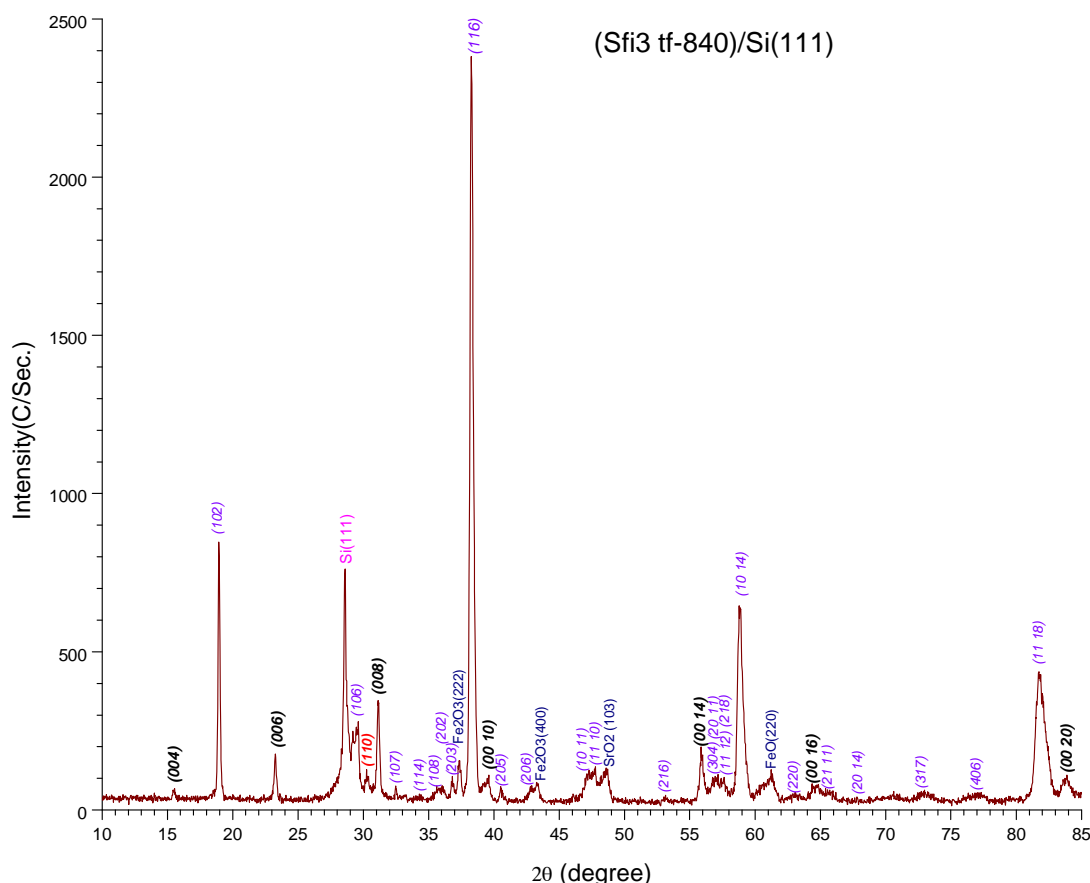
شکل ۶. منحنی پسماند در ربع دوم مربوط به نمونه همسانگرد (الف) و نمونه ناهمسانگرد (ب).

جدول ۴. تغییر خواص مغناطیسی در نمونه همسانگرد و ناهمسانگرد.

نوع نمونه	$B_r$ (T) پسماندگی	میدان پسماند زدا $H_c$ (kA / m)	$(BH)_{max}$ ( $\text{kJ} / \text{m}^2$ )
(همسانگرد) Sfi	۰/۲۳۶	۱۵۹/۲	۹/۷
(ناهمسانگرد) Sfa	۰/۳۷۸	۲۳۹/۷	۲۷/۴

که در اثر عدم تطابق پارامتر شبکه لایه و زیر لایه به وجود می‌آید در تصویر SEM (شکل ۸) مشخصتر می‌شود. به دلیل کوچک بودن اندازه دانه‌ها در ساختار لایه، برای گرفتن تصاویر SEM به بزرگنمایی نسبتاً بالا نیاز است. اندازه متوسط دانه‌ها کمتر از  $1 \mu\text{m}$  است و دانه‌ها هنگام تطابق ساختار با زیر لایه به شکل شش گوشه تمایل یافته‌اند. ترکهایی در حد چند ده  $\mu\text{m}$

که علاوه بر قله‌های  $(0^\circ L)$ ، قله‌های قوی نظیر  $(116)$ ،  $(102)$ ،  $(104)$ ،  $(1118)$  نیز وجود دارند که بیانگر رشد لایه به صورت بس بلور است. رشد نیافتن لایه در جهت  $(0^\circ L)$  ناشی از تنشهای مختلفی است که بین لایه و زیر لایه وجود دارد که از مهمترین آنها، تنش ناشی از عدم تطابق پارامتر شبکه و ضریب انبساط گرمایی لایه و زیر لایه است. اثر تنشهای بزرگی

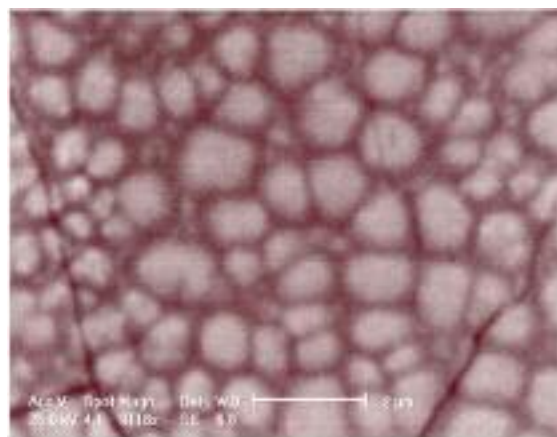


شکل ۷. طیف پرتو x مربوط به لایه نازک Sfi<sub>3</sub>, tf.

وجود دارد.

از آنجایی که حدس می‌زدیم فشار بالای اکسیژن منجر به تولید فازهای اکسیدی ثانویه می‌شود، در نمونه دوم Sfi<sub>4</sub>, tf، برای جلوگیری از تولید فازهای اکسیدی ثانویه، دمای زیرلایه ثابت و فشار اکسیژن را به ۷۵ mtorr کاهش دادیم. بررسی طیف پرتو x تهیه شده از سطح نمونه (شکل ۹)، نشان می‌دهد که فاز خالص فریت استرانسیوم تشکیل شده و تقریباً اغلب فازهای اکسیدی ظاهر شده در نمونه قبل از بین می‌روند. حضور قله‌هایی نظیر (۱۱۶)، (۱۰۲)، (۱۰۱۴) با شدت بالا نشان می‌دهد که لایه به صورت بس‌بلور رشد کرده ولی تقویت شدت قله‌های (۰۰L) نسبت به حالت قبل بیانگر تمایل رشد لایه به رشد جهتمند است.

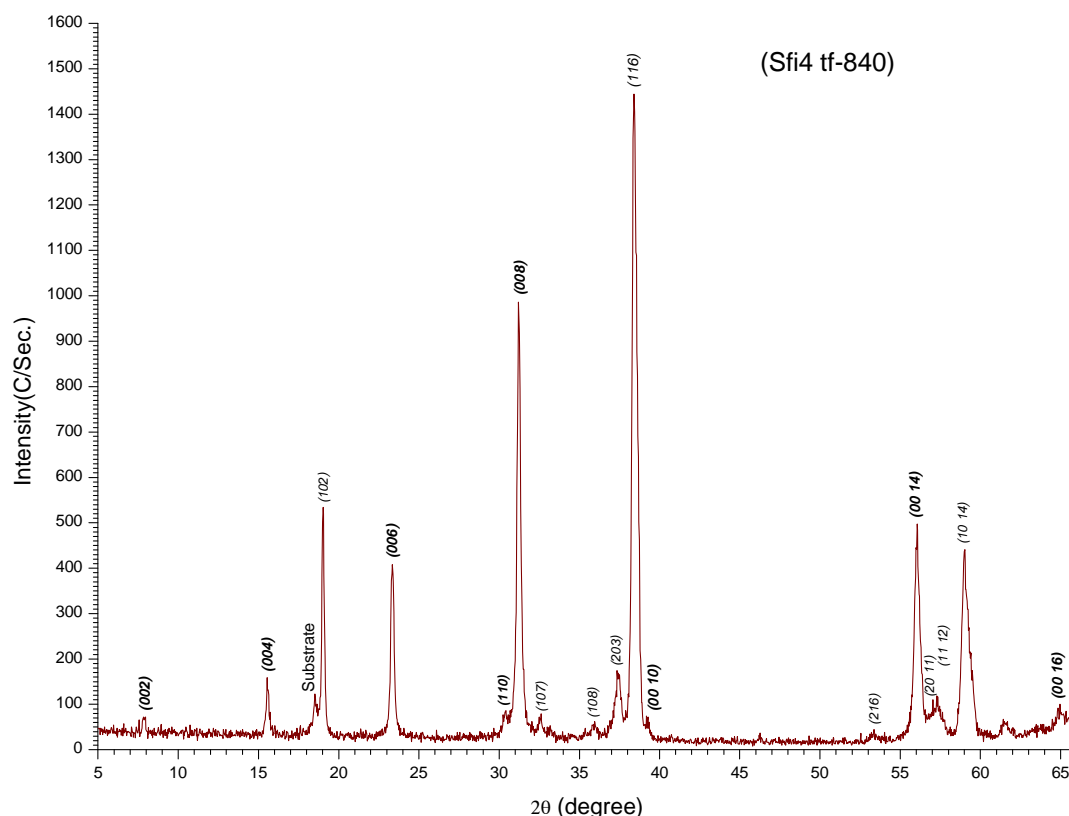
تصویر SEM (شکل ۱۰) و تحلیل EDAX از سطح نمونه، نشان می‌دهند که توزیع دانه‌ها به طور کاتوره‌ای بوده و شکل‌های



شکل ۸. تصویر SEM مربوط به لایه نازک Sfi<sub>3</sub>, tf.

نیز در ساختار وجود دارد که می‌تواند ناشی از بالا بودن تنش یا ناشی از سرد کردن سریع زیر لایه باشد. تحلیل آنالیز EDAX روی این لایه، نشان می‌دهد که تطابق نسبتاً خوبی بین استوکیومتری لایه و نمونه حجمی استفاده شده به عنوان هدف،



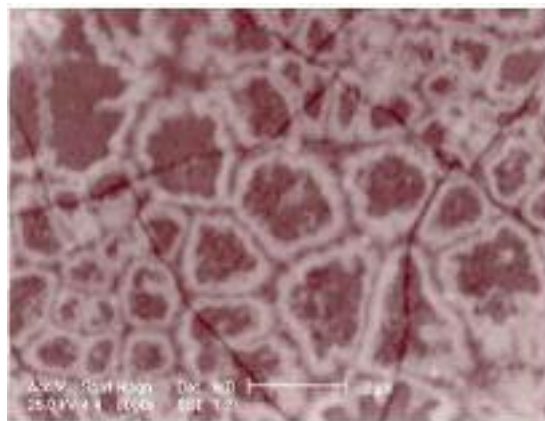


شکل ۹. طیف پرتو x مربوط به لایه نازک Sfi4, tf.

(تنش)، دیده می‌شود.

#### ۴. نتیجه گیری

طیف پراش پرتو x و تصاویر SEM از نمونه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد، رشد ساختارهای شش گوشه منظم با ابعاد در حد  $\mu\text{m}$  را تایید می‌کند. تفاوت نمونه‌های همسانگرد و ناهمسانگرد به صورت افزایش شدت قله‌های (۰۰L) در نمونه ناهمسانگرد مشخص می‌شود که ناشی از اعمال میدان مغناطیسی به نمونه در حین پرس و چرخش دانه‌ها در این میدان در اثر گشتاور اعمال شده است. تحلیل EDAX از مناطق سطحی نمونه‌های حجمی، نه تنها استوکیومتری نسبتاً خوب نمونه‌ها را در مقایسه با مواد اولیه، تایید می‌کند بلکه با اعمال این تحلیل به مرز و روی دانه‌های مختلف و مقایسه آن با مناطق سطحی، قرار گرفتن افزایش‌دهنده‌های CaO و SiO<sub>2</sub> در مرز دانه‌ها حین فرآیند رشد دانه و تشکیل فاز ثانویه در مرزها را



شکل ۱۰. تصویر SEM مربوط به لایه نازک Sfi4, tf.

نامنظم و اندازه‌های در حدود ۱ تا  $2\mu\text{m}$  دارند و بعضی از آنها به شکل شش‌گوشه تمایل پیدا کرده‌اند. مقدار عامل استوکیومتری حاصل از نمونه، نشان می‌دهد که توافق بهتری با استوکیومتری هدف نسبت به نمونه قبل دارد. در این نمونه نیز ریزترکهای ناشی از عدم تطابق پارامترهای شبکه لایه و زیر لایه

محور لایه، لازم است زیرلایه‌های  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (۰۰۱) و  $\text{MgO}$  (۱۱۱) که حداقل تنش را با لایه مورد نظر دارند استفاده شوند. ترک برداشتن سطح لایه می‌تواند ناشی از تنش بالای بین لایه و زیرلایه باشد. این تنشها به طور عمده از عدم تطابق پارامتر شبکه و ضریب انبساط گرمایی بین لایه و زیرلایه ناشی می‌شوند.

### تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان به خاطر حمایت در انجام این کار تشکر می‌کنیم. همچنین از همکاران عزیز دکتر قاسمی و مهندس علیایی که در ساخت نمونه‌های حجمی و تحلیل نمودارها ما را یاری کردند، نهایت تشکر را داریم.

نشان می‌دهد. مطابق منحنی پسماند اعمال میدان مغناطیسی سبب بهبود برخی از خواص نظیر پسماندگی و میدان پسماندزدا می‌شود.

برای تشکیل فاز بلوری فریت استرانسیوم در نمونه‌های لایه نازک، باید دمای زیرلایه بالاتر از  $800^\circ\text{C}$  انتخاب شود. فازهای اکسیدی اضافی به دلیل فشار نامناسب اکسیژن در ساختار لایه شکل می‌گیرند و بر روی خواص مغناطیسی لایه اثر منفی می‌گذارند. شرایط بهینه برای رشد فاز خالص فریت استرانسیوم، دمای زیرلایه  $840^\circ\text{C}$  و فشار اکسیژن ۷۵ mtorr به دست آمد. زیر لایه  $\text{Si}(111)$  برای حالتی که رشد لایه فریت استرانسیوم به صورت بس بلور مورد نظر است، استفاده می‌شود. برای رشد C

### مراجع

1. M Koleva, et al., *Applied Surface Science*, **154-155** (2000) 485-491.
  2. S K Koul, B Bhat, *Microwave and millimeter wave phase shifters*, **1** Artech House, Inc., (1991).
  3. B L Lax, K J Button, *Microwave ferrites and ferrimagnetics*, McGraw-Hill Book Company, Inc. (1962).
  4. X Y Zhang, et al., *Applied Surface Science*, **143** (1999) 323-327.
  5. S A Oliver, et al., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **213** (2000) 326-334.
  6. S R Shinde, et al., *Applied physics Letters*, **74**, 4 (1999) 594-596.
  7. P Papakonstantinou, et al., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **152** (1996) 401-410.
  8. O Heczko, R Gerber and Z Simsa, *Thin Solid Films*, **358** (2000) 206-214.
  9. C Surig, K A Hempel and Ch Sauer, *Journal of*
11. حسین‌پور، ا.، نظریه مغناطیسهای سرامیکی، تز کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه شیراز (۱۳۷۲).
12. Y J Oh, et al., *Journal of Applied physics*, **76**, 10. (1994) 6877-6879.
13. R H Arendt, *Journal of Applied physics*, **44**, 7 (1973) 3300-3305.
14. C. S. Liu, et al., *IEEE Transactions on Magnetics*, **28**, 5 (1992) 2771-2443.
15. D B Chrisey, G K Hubler, *Pulsed laser deposition of thin films*, John wiley & Sons, Inc., New york (1994).
16. R G Welch, T J Jackson and S B Palmer, *IEEE Transactions on Magnetics*, **31**, 6 (1995) 2752-2754.