

تأثیر دمای بازپخت بر خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک آهن-پلاتین

یونس جلالی‌زاده و علی قاسمی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت مقاله: ۹۳/۰۲/۲۶ - پذیرش مقاله: ۹۲/۰۷/۱۴)

چکیده

هدف اصلی این تحقیق، بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی لایه نازک FePt نسبت به دمای بازپخت است. لایه‌های نازک FePt به روش کندوپاش روی زیرلایه شیشه‌ای با نرخ $6 \frac{\text{nm}}{\text{min}}$ و با توان ۱۱۰ W رسوب داده شدند. خلأ اولیه محفظه کندوپاش برابر 5×10^{-7} Torr و فشار گاز آرگون mTorr ۳ در نظر گرفته شد. پس از تهیه نمونه‌ها، در محدوده $450-650^\circ\text{C}$ به مدت ۳۰ دقیقه بازپخت شدند. شناسایی فاز لایه نازک با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD)، انجام شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) اندازه و یکنواختی دانه‌ها بررسی و مقایسه گردید. مورفولوژی و زبری سطح با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) تعیین شد. همچنین خواص مغناطیسی لایه‌های نازک بازپخت شده با استفاده از مغناطومتر ارتعاشی (VSM) بررسی شد. نتایج XRD نشان داد که با بازپخت لایه نازک در دمای 450°C فاز FePt با شبکه منظم $L1_0$ تشکیل و با افزایش دمای بازپخت پارامتر نظم (S) افزایش یافته و در دمای بازپخت 650°C به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین نتایج SEM و AFM نشان داد که علاوه بر افزایش اندازه دانه، زبری سطح نیز در دماهای بالاتر افزایش یافته و در دمای بازپخت 650°C ساختار سوزنی شکل در داخل یک ساختار صفحه‌ای ایجاد می‌شود. خواص مغناطیسی لایه‌های نازک توسط رسم منحنی‌های پسماند ارزیابی شد. با بازپخت لایه‌های نازک FePt در دمای 550°C به دلیل افزایش پارامتر نظم، فاز فرومغناطیس سخت تشکیل شد. اما در دمای 600°C بهترین خواص ساختاری و مغناطیسی حاصل شد. واژه‌های کلیدی: لایه نازک، آهن پلاتین، فرومغناطیس، نیروی پسماندزدا.

Influence of annealing temperature on the structural and magnetic properties of nanostructured FePt thin films

Y. Jalalizadeh and A. Ghasemi

Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology

(Received 6 May 2014, accepted 6 October 2014)

Abstract

The main goal of this study is to investigate the structural and magnetic properties of FePt thin film with respect to the annealing temperature. The FePt thin films were deposited by RF magnetron sputtering on Corning glass substrates at a room temperature. Base pressure was kept constant at 2×10^{-7} Torr. The Ar pressure was 3mTorr. Thin films was sputtered with an rf power supply at 110 W, yielding a rate of $6 \frac{\text{nm}}{\text{min}}$. After deposition, samples were annealed in the range of $450-650^\circ\text{C}$ for 30 min. Phase identification of thin films was performed using X-ray diffraction (XRD). With employing SEM, the size and uniformity of grains were studied. The morphology and surface roughness was also determined using an atomic force microscopy (AFM). Moreover magnetic properties of annealed thin films were evaluated using a vibrating sample magnetometer (VSM). XRD results showed that the ordered FePt structure is formed at 450°C and with an increase in annealing temperature, ordering parameter were enhanced and at 650°C reaches at its maximum value. On the other hand surface roughness and grain size increased with increasing temperature. The topography of the film consists of two main kinds of grain: those with a needlelike shape and those in form of platelets. According to the hysteresis loops, hard ferromagnetic FePt phase is formed at 550°C due to high order parameter. However the best structural and magnetic properties were obtained at 650°C .

Keywords: Thin films, FePt, Sputtering, ferromagnetic, Coercivity.

E-mail of corresponding authors: younes.jalalizadeh@gmail.com

مقدمه

با افزایش روز افزون سیستم های کامپیوتری نیاز به حافظه های با ظرفیت بالا در صنعت احساس می شود. ذخیره سازی اطلاعات به شکل امروزی از طریق مغناطش لایه های نازکی که دارای خواص فرومغناطیس سخت هستند، استفاده می شود و اطلاعات به صورت بخش های کوچک مغناطیسی روی آن ذخیره می شود [۴-۱]. برای افزایش ظرفیت حافظه ها باید تعداد واحدهای مغناطیسی در سطح مشخص افزایش یابد. در سابق داده ها به صورت افقی روی لایه نازک ذخیره می شد و به آن ها حافظه های ذخیره کننده طولی گفته می شود. اما با این نوع ذخیره سازی تعداد واحدهای مغناطیسی در سطح کاهش می یابد. برای حل این موضوع به تازگی تلاش های زیادی صورت گرفته است [۱۱-۵] تا اینکه در اواخر قرن بیستم حافظه های ذخیره کننده عمودی شدند [۱۲]. در این حالت بیت ها به صورت عمود بر سطح لایه نازک ذخیره می شوند؛ در نتیجه دانسیته اطلاعات ذخیره شده در واحد سطح افزایش می یابد. برای اینکه این نوع ذخیره سازی اطلاعات با موفقیت صورت گیرد، باید ضخامت لایه نازک به کمتر از ۱۰۰nm کاهش یابد تا علاوه بر ناهمسانگردی مغناطو کریستالی، ناهمسانگردی شکل ایجاد شود. در این نوع از ناهمسانگردی در ضخامت های کمتر به دلیل فاصله بسیار کم سطوح، تمایل دوقطبی های مغناطیسی برای قرار گیری در جهت عمودی افزایش می یابد.

راه حل دیگری که موجب افزایش دانسیته اطلاعات می شود، کاهش اندازه دانه های لایه نازک مغناطیسی است. اما با کاهش اندازه دانه از یک مقدار بحرانی، پدیده سوپرپارامغناطیس اتفاق افتاده و اطلاعات ذخیره شده از بین می روند. برای رفع این مشکل باید از مواد فرومغناطیس سخت با ناهمسانگردی مغناطو کریستالی بالا استفاده شود تا نیروی پسماندزدا افزایش یابد. علاوه بر ناهمسانگردی مغناطو کریستالی، نیروی پسماندزدا به اندازه

دانه، عیوب شبکه ای و رسوبات داخل لایه نازک بستگی دارد؛ بنحوی که با افزایش مرز دانه ها، عیوب و رسوبات، نیروی پسماندزدا افزایش می یابد. به همین دلیل تمایل به کاهش اندازه دانه وجود دارد. اما همانطور که اشاره شد این اندازه نباید کمتر از مقدار بحرانی باشد [۱۶-۱۳]. قبلا از آلیاژهای کبالت به عنوان حافظه مغناطیسی استفاده می شد ولی این حافظه ها تنها دانسیته اطلاعات ذخیره شده را تا $1 \frac{\text{Tbit}}{\text{in}^2}$ افزایش دادند. از این رو برای دستیابی به دانسیته بیشتر ذخیره سازی اطلاعات نیاز به آلیاژهای مغناطیسی جدیدتری است. اساس مواد مغناطیسی دایم جدید، ترکیبات بین فلزی، عناصر نادر خاکی و فلزات انتقالی می باشد. به تازگی تحقیقات زیادی روی لایه های نازک مغناطیسی نظیر SmCo، NdFeB و FePt صورت گرفته است تا علاوه بر افزایش دانسیته اطلاعات ذخیره شده به بیش از $1 \frac{\text{Tbit}}{\text{in}^2}$ ، زمان ماندگاری آن ها نیز افزایش یافته و به $3/6 \times 10^9$ سال برسد [۱۷ و ۱۸]. آهن پلاتین و ترکیبات حاوی عناصر نادر خاکی (SmCo, Nd₂Fe₁₄B) خواص مغناطیسی بهتری نسبت به آلیاژهای برپایه کبالت کروم دارند. اما پایداری شیمیایی ضعیف ترکیبات نادر خاکی، کاربرد آن ها را در لایه های نازک محدود می کند. ویژگی منحصر به فردی که آلیاژهای آهن پلاتین در مقابل ترکیبات پایه فلزات انتقالی و نادر خاکی دارند این است که از نظر شیمیایی خنثی بوده و نیز دارای نرمی مناسبی هستند [۱۹].

آلیاژ آهن پلاتین در دهه های گذشته به خاطر کاربرد در قطعاتی که باید مغناطیس دایم داشته باشند و نیز به خاطر مقاومت به خوردگی بسیار مناسب، توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. طبق دیگرام فازی آهن-پلاتین، این آلیاژ با ترکیب شیمیایی Fe₅₀Pt₅₀ در دمای بیش از ۱۳۰۰°C به صورت محلول جامد مکعبی مرکز سطح نامنظم با شبکه AI است. پارامتر شبکه این فاز برابر ۳/۸۰۷Å است. به خاطر پایین بودن ناهمسانگردی مغناطو کریستالی آن، برای حافظه های مغناطیسی مفید

بهبود انتخاب و مشخص شد که لایه نازک آهن پلاتین با شبکه $L1_0$ می تواند در آینده به منظور افزایش دانسیته و ماندگاری اطلاعات ذخیره شده در حافظه های مغناطیسی مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش آزمایش ها

در این پژوهش Corning glass با قطر ۱ اینچ انتخاب شد. قبل رسوب دهی لایه های نازک، سطح زیرلایه ها توسط استون و الکل و به صورت التراسونیک و سپس توسط آب دیونیزه شده تمیز شدند و با هوای فشرده خشک شدند. روش اعمال لایه های نازک آهن پلاتین، استفاده از کندوپاش مگنترون با امواج رادیویی بود. هدف مورد استفاده آلیاژ $Fe_{50}Pt_{50}$ با خلوص ۹۹/۹٪ و با ضخامت ۱/۵mm بوده و فاصله آن تا زیرلایه حدود ۱۸۵mm بود. قبل از شروع عملیات کندوپاش برای تمیز کردن سطح هدف، کندوپاش اولیه به مدت ۲۰ دقیقه انجام شد. قبل از رسوب دهی لایه نازک $FePt$ ، لایه میانی پلاتین - ایریدیم با ضخامت ۲nm رسوب داده شد. نرخ رسوب دهی آن $0.05 \frac{nm}{s}$ و فشار درون محفظه برابر Torr^{-۸} بود. همچنین توان رسوب دهی ۴۵W بود.

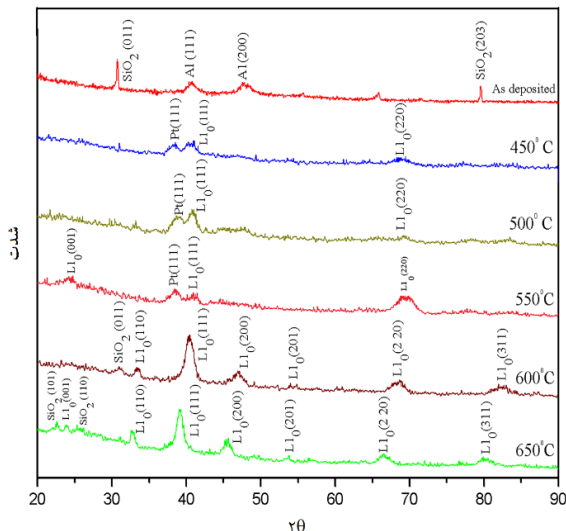
خلاً اولیه داخل محفظه Torr^{-۷} 5×10^{-7} و فشار گاز آرگون ۳ mTorr در نظر گرفته شد. عملیات رسوب دهی لایه نازک با نرخ رسوب دهی $6 \frac{nm}{min}$ به مدت ۱۵ دقیقه، با توان رسوب دهی ۱۱۰W و در دمای محیط انجام شد. با شروع به کار لایه نشانی، برای به وجود آمدن پوشش یکنواخت، صفحه زیرین زیرلایه ها با سرعت ۱۵ rpm می چرخید.

بعد از ساخت، نمونه ها با کوره مقاومتی لوله ای کوآرتزی و کنترل کننده دقیق ($\pm 3^{\circ}C$) بازپخت شدند. نرخ گرمایش نمونه ها $15 \frac{^{\circ}C}{s}$ بود. در حین بازپخت جریانی از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹٪ و با فشار ۱ اتمسفر عبور می کرد. دماهای انتخابی ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰ و $650^{\circ}C$ و زمان بازپخت برای تمام نمونه ها ۳۰ دقیقه بود. برای شناسایی فاز از آزمون تفرق اشعه ایکس (XRD) از نوع

نیست و از جمله مواد مغناطیس نرم به شمار می آید. ثابت ناهمسانگردی مغناطو کریستالی (K_{II}) و نیروی پسماندزدای مغناطیسی (H_c) کم این نوع ساختار باعث می شود که در استفاده به عنوان حافظه مغناطیسی مناسب نباشد. در دمای کمتر از $1300^{\circ}C$ یک استحاله نامنظم به منظم در این آلیاژ رخ داده و طی آن از شبکه مکعب مرکز سطح AI به ابر شبکه تتراگونال با ساختار $L1_0$ تبدیل می شود. این فاز ساختاری شبیه $CuAu$ دارد و ثوابت شبکه a و c آن به ترتیب برابر $3/85$ و $3/71 \text{ \AA}$ است. بنابراین تتراگونالیتیه ($\frac{c}{a}$) شبکه به $0/96$ کاهش می یابد. در این ساختار اتم های پلاتین در مکان های $(0,0,0)$ و $(1/2, 1/2, 0)$ و اتم های آهن در مکان های $(0, 1/2, 1/2)$ و $(1/2, 0, 1/2)$ قرار گرفته و نظم بلند برد (LRO) در شبکه ایجاد می شود. با انجام این استحاله این آلیاژ به یکی از بهترین مواد فرومغناطیس سخت تبدیل می شود به طوری که K_{II} آن در حالت بالک به $7 \times 10^7 \frac{erg}{cm^3}$ می رسد. برای لایه های نازک این مقدار برابر $6 \times 10^7 \frac{erg}{cm^3}$ بوده و مغناطش اشباع فاز منظم در $298K$ برابر $114 \frac{emu}{cm^3}$ است. در این حالت می توان از لایه نازک $FePt$ در حافظه مغناطیسی مورد استفاده کرد [۲۱ و ۲۰].

در این پژوهش لایه نازک آهن پلاتین بر زیرلایه Corning glass به روش کندوپاش مگنترون با امواج رادیویی اعمال شد. ضخامت لایه های نازک برابر ۱۰۰nm است. سپس نمونه ها در کوره مقاومتی در دماهای مختلف به مدت ۳۰ دقیقه بازپخت شدند. نرخ گرمادهی $15 \frac{K}{s}$ و دمای بازپخت $450^{\circ}C$ تا $650^{\circ}C$ انتخاب گردید. هدف از بازپخت لایه های نازک به دست آوردن ناهمسانگردی مغناطو کریستالی، افزایش نیروی پسماندزدا و در نتیجه افزایش زمان ماندگاری اطلاعات ذخیره شده است. منحنی های پسماند لایه های نازک توسط مغناطومتر ارتعاشی رسم گردید و افزایش نیروی پسماندزدا با دمای بازپخت، به افزایش پارامتر نظم و ثابت ناهمسانگردی مغناطو کریستالی نسبت داده شد. با در نظر گرفتن مورفولوژی و زبری سطحی لایه های نازک، دمای بازپخت

از این پیک‌ها Pt(۱۱۱) است و نشان از وجود پلاتین خالص در نمونه‌های لایه‌نازک است. پیک دیگر مربوط به اندیس صفحات مختلف SiO₂ است. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اشعه ایکس به درون زیرلایه نیز نفوذ کرده است.



شکل ۱. الگوی تفرق اشعه ایکس لایه های FePt آئیل شده در دماهای مختلف.

با بررسی‌های دقیق‌تر مشاهده می‌شود که با افزایش دمای بازپخت موقعیت پیک‌های (۱۱۱) و (۲۲۰) ابرشبه FePt تترائگونال به سمت زوایای کم جابجا شده است. پارامترهای شبکه FePt با استفاده از روابط زیر و با در نظر گرفتن پیک‌های (۱۱۱) و (۲۲۰) محاسبه گردید:

$$\frac{n\lambda}{2d} = \sin\theta \quad (1)$$

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2+k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2)$$

در رابطه ۱، d فاصله صفحات بلوری، λ طول موج اشعه ایکس فرودی و θ زاویه براگ، $n=1$ مرتبه پراش و همچنین در رابطه ۲، h و k و l اندیس‌های میلر و a ، c ، ثابت‌های شبکه است.

طبق رابطه براگ جابجایی موقعیت پیک‌های (۱۱۱) و (۲۲۰) به سمت زوایای کم نشان دهنده افزایش فاصله صفحات نامبرده است. بنابراین این نتیجه حاصل می‌شود که در حین انجام استحاله منظم شدن، با نفوذ اتم‌های آهن

Grazing و از دستگاه مدل D8ADVANCE مجهز به گونیمتر θ - θ با فیلتر نیکلی و آند مسی با طول موج $1/\lambda_{CuK\alpha}$ ، با ولتاژ ۴۰kV و جریان ۴۰ mA استفاده شد. در این آزمون زمان روبش هرگام ۱ ثانیه و اندازه گام 0.039° درجه در محدوده 2θ برابر ۲۰ تا ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. فازشناسی الگوهای تفرق اشعه ایکس توسط نرم افزار Xpert Highscore انجام شد. به منظور مشاهده دانه‌ها و تحلیل دقیق‌تر ریزساختار نمونه‌های لایه نازک، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی (SEM) با بزرگنمایی ۶۰ هزار برابر از نمونه‌ها تهیه شد. ولتاژ مورد استفاده در تفنگ الکترونی برابر ۱۵KV، شرکت سازنده دستگاه TESCAN و مدل آن VEGA است. زبری و توپوگرافی سطح توسط میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) با مدل دستگاه CP-Research که شرکت سازنده آن Veeco است، انجام شد. تصاویری که به وسیله پروب این میکروسکوپ گرفته شد در حالت غیر تماسی قرار داشت. برای اندازه‌گیری نیروی پسماندزدا و دیگر خواص مغناطیسی لایه‌های نازک FePt، از دستگاه مغناطومتر ارتعاشی نمونه (VSM) استفاده شد. این آزمون در دمای محیط انجام شد.

نتایج و بحث

اثر دمای بازپخت بر خواص ساختاری لایه نازک

با بررسی‌های نرم افزاری که بر روی طیف‌های اشعه نمونه‌ها صورت گرفت، این نتیجه حاصل می‌شود که با بازپخت لایه نازک FePt در دمای 450°C ، استحاله منظم شدن $\text{Al-FePt} \rightarrow \text{Li}_0\text{-FePt}$ اتفاق افتاده است. در شکل ۱ طیف‌های XRD نمونه بدون بازپخت و نمونه‌های بازپخت شده در دماهای مختلف نشان داده شده است. در نتایج طیف تفرق اشعه ایکس تمام نمونه‌های بازپخت شده دارای پیک‌های صفحات مختلف $\text{Li}_0\text{-FePt}$ هستند. با این حال در تعدادی از نمونه‌ها پیک‌هایی ظاهر شده است که مربوط به FePt نیست. یکی

$$S = \frac{(1 - (c/a)_{cal})^{1/2}}{1 - (c/a)_{sf}} \quad (3)$$

در رابطه بالا $(c/a)_{cal}$ و $(c/a)_{sf}$ به ترتیب تترائگونالیتیه محاسبه شده و تترائگونالیتیه ابرشبکه کاملاً منظم است. برای نمونه‌های بازپخت شده علاوه بر نسبت $\frac{c}{a}$ ، پارامتر نظم نیز محاسبه شده است.

در جدول ۱ این اطلاعات آورده شده است و روند افزایش پارامتر نظم به صورت نمودار در شکل ۳ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای بازپخت از 450°C به 650°C پارامتر نظم از ۰/۵ به ۱ در افزایش یافته است. همانطور که گفته شد پارامتر نظم ابر شبکه با نظم بلند برد برابر ۱ است. بنابراین در این نمونه نیز نظم بلند برد ایجاد شده و تمام اتم‌های آهن و پلاتین در مکان‌های صحیح خود قرار گرفته‌اند. در این شبکه ناهمسانگردی مغناطو کریستالی در جهت محور c حداکثر مقدار بوده و در صورتی که میدان مغناطیسی در این جهت اعمال شود بالاترین نیروی پسماندزدا به دست می‌آید.

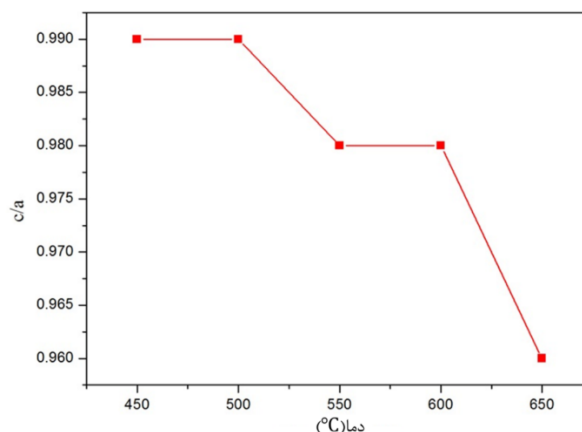
جدول ۱. اطلاعات کریستالوگرافی شبکه منظم FePt نسبت به دمای آنیل.

دمای آنیل ($^{\circ}\text{C}$)	c/a	S
۴۵۰	۰/۹۹	۰/۵
۵۰۰	۰/۹۹	۰/۵
۵۵۰	۰/۹۸	۰/۷۱
۶۰۰	۰/۹۹	۰/۵
۶۵۰	۰/۹۶	۱

شکل‌های ۴ تا ۹ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی لایه‌های نازک قبل از بازپخت و بازپخت شده در دماهای مختلف را نشان می‌دهد.

و پلاتین در داخل شبکه تترائگونال FePt، پارامتر نظم افزایش یافته است. علاوه بر این باید تنش حاصل از اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین زیرلایه شیشه‌ای و لایه نازک نیز در نظر گرفته شود.

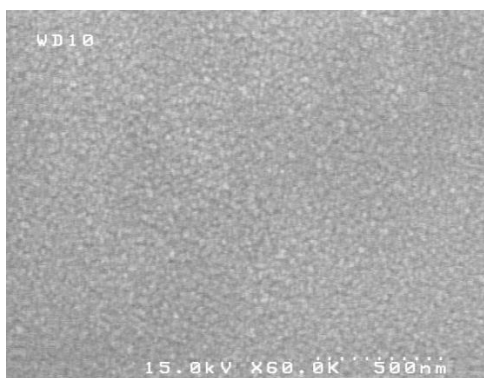
نسبت $\frac{c}{a}$ برای ساختار تترائگونال L1₀ با نظم کامل ۰/۹۶ است ولی در ساختارهایی با نظم کمتر، این مقدار بیشتر است [۹]. با افزایش دمای بازپخت، ضریب نفوذ اتم‌ها افزایش یافته و اتم‌های آهن و پلاتین بیشتری در موقعیت‌های مشخص خود در شبکه FePt قرار می‌گیرند. در نتیجه تترائگونالیتیه شبکه منظم FePt کاهش می‌یابد. زیاد بودن نسبت $\frac{c}{a}$ در دمای 450°C دلیلی بر کم بودن نظم ابرشبکه است. با افزایش دما از 450°C به 650°C ، نسبت $\frac{c}{a}$ از ۰/۹۹ به ۰/۹۶ کاهش یافته است (شکل ۲).



شکل ۲. تغییرات پارامتر $\frac{c}{a}$ ابرشبکه FePt نسبت به دمای آنیل.

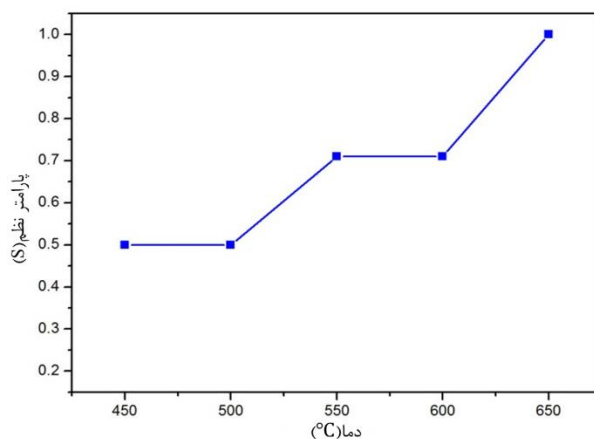
اما برای اینکه دید بهتری درباره منظم شدن در این شبکه به دست آید پارامتر نظم (S) تعریف می‌شود و می‌توان منظم شدن را به صورت کمی و با عدد نشان داد [۲۱]. در شبکه با نظم کامل این مقدار برابر ۱ است و با کاهش نظم شبکه مقدار آن کاهش می‌یابد. برای به دست آوردن پارامتر نظم روابط مختلفی وجود دارد اما برای لایه‌های نازک، نسبت $\frac{c}{a}$ تجربی و نسبت $\frac{c}{a}$ ابرشبکه کاملاً منظم که توسط شنگ ارایه شده است، مناسب است:

تا حدودی کاهش یافته است. اندازه گیری‌های کمی دانه‌ها این موضوع را تأیید می‌کند زیرا میانگین اندازه دانه محاسبه شده برای تصویر ۵ حدود 33nm است. با توجه به الگوی تفرق اشعه ایکس دو نمونه، مشاهده می‌شود که در دمای 450°C استحاله منظم شدن $\text{Al-FCC} \rightarrow \text{L1}_0\text{-FCT}$ در لایه نازک آهن-پلاتین اتفاق افتاده شده است و به دلیل اینکه این استحاله همراه با جوانه‌زنی و رشد است، در دمای بازپخت 450°C دانه‌های مشاهده شده مربوط به جوانه‌های فاز جدید است. بنابراین میانگین اندازه دانه کاهش یافته است. اما به خاطر شرایط ترمودینامیکی و سینتیکی اتم‌ها و جهت‌گیری دانه‌ها نسبت به یکدیگر، سرعت رشد بعضی از جوانه‌ها نسبت به دیگر جوانه‌ها بیشتر بوده و محدوده توزیع اندازه دانه‌ها نسبت به تصویر ۴ تا حدودی افزایش پیدا کرده است.



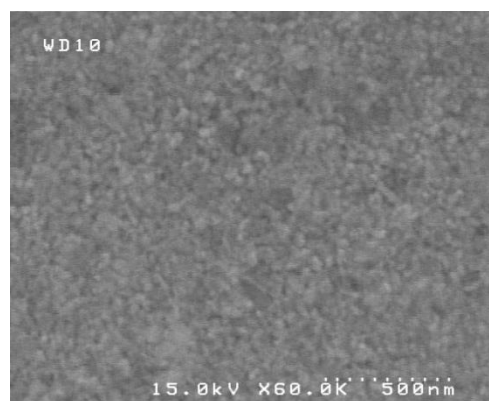
شکل ۵. تصویر SEM لایه نازک FePt بازپخت شده در دمای 450°C .

با افزایش دمای بازپخت به 500°C مورفولوژی سطح نمونه تغییر کرده است و از حالت دانه‌ای به حالت پیوسته تبدیل شده است. این مورفولوژی در تصویر ۶ به وضوح قابل مشاهده است و بیشتر از اینکه دانه‌بندی مشخص باشد مورفولوژی سطح لایه نازک مشهود است. همچنین با دقت در این تصویر متوجه می‌شویم که سطح لایه نازک دارای پستی و بلندی است و مناطق بلندتر حالت پیوسته‌ای دارند. در این دما سرعت رشد دانه‌ها بیشتر از سرعت جوانه‌زنی فاز جدید بوده و به همین دلیل میانگین



شکل ۳. تغییرات پارامتر S ابرشبکه FePt نسبت به دمای آنیل.

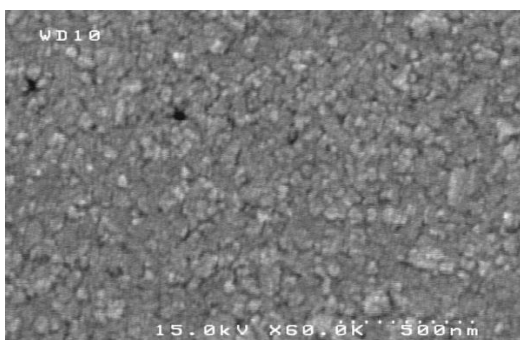
با افزایش دمای بازپخت علاوه بر رشد دانه، مورفولوژی سطحی تغییر یافته است. در تصویر ۴ دانه‌ها به صورت مجزا و با اندازه تقریباً یکسان دیده می‌شود. محدوده توزیع اندازه دانه‌ها بسیار کم است، بنحوی که اکثر دانه‌ها در محدوده $30\text{--}50\text{nm}$ قرار دارند و درصد کمی از اندازه دانه‌ها در محدوده $10\text{--}20\text{nm}$ و $50\text{--}60\text{nm}$ قرار دارند. میانگین اندازه دانه در این نمونه حدود 35nm است.



شکل ۴. تصویر SEM لایه نازک FePt بدون بازپخت.

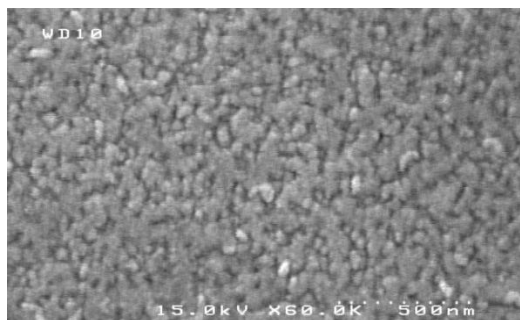
در دمای بازپخت 450°C همانند تصویر نمونه قبل از بازپخت دانه‌ها به صورت مشخص و مجزا از یکدیگر دیده می‌شوند. اندازه دانه‌ها در این نمونه نیز همانند نمونه قبل نزدیک به هم است. اما با بررسی دقیق‌تر مشاهده می‌شود که علیرغم بازپخت نمونه در این دما، اندازه دانه

رشد غیرعادی برخی از دانه‌ها است. به خاطر تنش در فصل مشترک لایه نازک با لایه میانی PtIr، مکان‌های مرجحی برای جوانه‌زنی فاز جدید یافت می‌شود. به عبارت دیگر جوانه‌زنی فاز منظم FePt به صورت تصادفی نبوده و غیرهمگن است. در نتیجه نیروی محرکه برای رشد آن‌ها بیش از سایر دانه‌ها است.



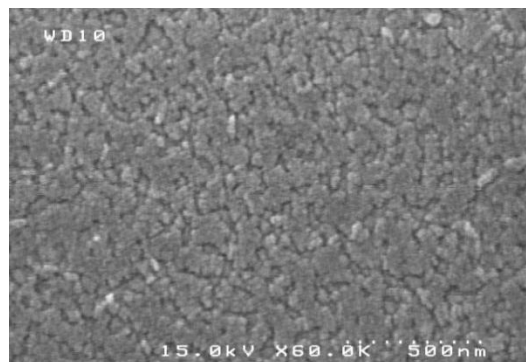
شکل ۷. تصویر SEM لایه نازک FePt بازپخت شده در دمای ۵۵۰°C

برای بررسی بیشتر رشد و مورفولوژی دانه‌ها، دمای بازپخت به ۶۰۰ و حتی ۶۵۰°C افزایش یافته است. در دمای ۶۰۰°C پیوستگی دانه‌ها به یکدیگر بیشتر شده است و در بعضی موارد تشخیص دانه‌های مجزا از یکدیگر مشکل است. میانگین اندازه دانه در این دما حدود ۵۹nm است که نشان از رشد دانه است. در تصاویر مربوط به این دما نیز پستی و بلندی دیده می‌شود. محدوده قطر دانه‌ای که در این دما اندازه‌گیری شده است، در حدود ۲۸nm تا ۹۵nm است (شکل ۸).



شکل ۸. تصویر SEM لایه نازک FePt بازپخت شده در دمای ۶۰۰°C

اندازه دانه‌ها افزایش یافته و حدوداً به ۴۴nm رسیده است. با توجه به اینکه ضخامت لایه نازک برابر ۱۰۰nm است، مرزدانه‌های فاز جدید به سطح لایه نازک و یا فصل مشترک بین لایه نازک و لایه میانی نرسیده و به صورت سه‌بعدی رشد کرده‌اند. با مقایسه این تصویر با تصاویر نمونه‌های قبل معلوم می‌شود که یکنواختی اندازه دانه کاهش یافته است و به دلیل سرعت رشد زیاد، بعضی از دانه‌ها از اندازه بزرگتری نسبت به سایر دانه‌ها برخوردارند و حتی اندازه بعضی از آن‌ها به بیش از ۷۰nm رسیده است.



شکل ۶. تصویر SEM لایه نازک FePt بازپخت شده در دمای ۵۰۰°C

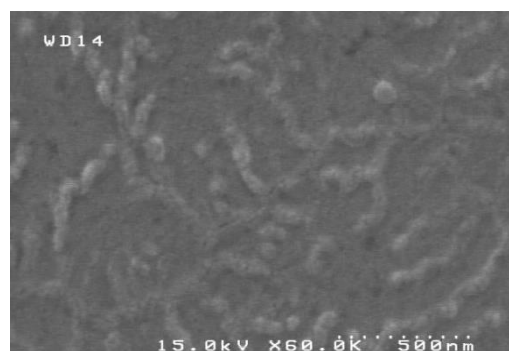
با بازپخت نمونه در دمای ۵۵۰°C مورفولوژی پیوسته‌ای که در تصویر مربوط به نمونه قبل وجود داشت، دیده نمی‌شود و بیشتر مورفولوژی به صورت دانه‌ای است. با این وجود به نظر می‌رسد به دلیل تغییر جهت رشد دانه‌ها، سطح بعضی از آن‌ها نسبت به سطح زمینه بالاتر است. همچنین با وجود رشد کلی دانه‌ها، اندازه بعضی از دانه‌ها خیلی بیشتر از حد متوسط است. با اینکه میانگین اندازه دانه حدود ۵۵nm است، اما دانه با قطر حدود ۹۱nm نیز اندازه‌گیری شده است. برای این موضوع دو دلیل می‌توان آورد؛ ممکن است در این دما هم زمان با رشد دانه تغییر جهت‌گیری در بعضی از دانه‌ها اتفاق افتاده و دانه‌های مجاور با جهت‌گیری نزدیک به هم، به یکدیگر پیوندند و مرز بین آن‌ها تقریباً از بین برود. دلیل دوم،

در شکل ۱۰ روند افزایش اندازه دانه برای ۴ دمای ۴۵۰، ۵۰۰، ۵۵۰ و ۶۰۰°C آورده شده است. ملاحظه می‌شود با که افزایش دما از ۴۵۰°C به ۶۰۰°C میانگین اندازه دانه حدود از ۳۳nm به ۵۹nm افزایش یافته است.

اثر دمای بازپخت بر خواص سطحی و زبری لایه نازک

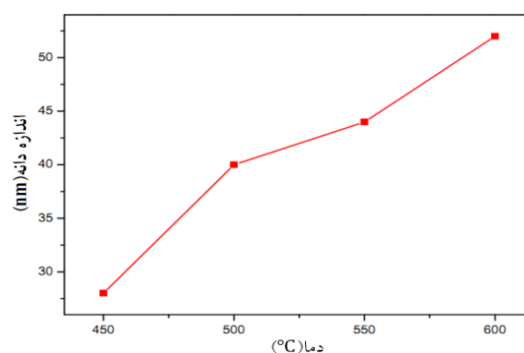
یکی از زمینه‌های قابل بررسی لایه‌های نازک زبری سطحی آن‌ها است. در اکثر موارد سطح لایه نازک زبر و دارای پستی و بلندی است. این پستی و بلندی در حین رسوب‌دهی ایجاد شده و متغیرهای زیادی بر آن تأثیر گذار است. در حین بازپخت نیز عوامل متعددی مانند رشد و یا به هم پیوستن دانه‌ها می‌تواند موجب افزایش زبری سطح شود. زبری بیش از اندازه می‌تواند روی خواص فیزیکی لایه نازک و عملکرد آن به عنوان حافظه‌های مغناطیسی تأثیر منفی داشته باشد. در شکل ۱۱ تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی نمونه‌های بازپخت شده در دماهای مختلف نشان داده شده است. در کلیه تصاویر مورفولوژی مجزا و جزیره‌ای وجود دارد. با توجه به اندازه دانه‌ها که از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی به دست آمد، هر یک از این مناطق شامل چندین دانه هستند. اما با افزایش دمای بازپخت از ۴۵۰°C به ۵۰۰°C این مورفولوژی مشخص‌تر شده است. (الف) و (ب)) برای به دست آوردن زبری، میانگین مربعات ارتفاع برآمدگی‌ها محاسبه می‌شود. این مقدار برای نمونه بازپخت شده در دمای ۴۵۰°C حدود ۳/۸nm است. در حافظه‌های مغناطیسی با نزدیک شدن سطح لایه‌نازک به هد، گرادیان میدان مغناطیسی اعمالی بهبود می‌یابد. بنابراین کاهش فاصله مطلوب است. به طور معمول این فاصله برابر ۱۰nm است. ملاحظه می‌شود که زبری بدست آمده در دمای ۴۵۰°C کمتر از ۱۰nm است.

در دمای بازپخت ۶۵۰°C مورفولوژی سطح به یکباره تغییر قابل توجهی یافته است و دانه‌بندی معمولی که در تصاویر قبل مشاهده می‌شد، دیده نمی‌شود در تصویر میکروسکوپی الکترونی مربوط به این دمای بازپخت (شکل ۹) دو نوع ساختار دیده می‌شود: مناطق یکنواخت و مناطق سوزنی شکل که داخل زمینه صاف و هموار پخش شده‌اند. ساختار سوزنی دارای جهت‌گیری خاصی نیست و به صورت تصادفی قرار گرفته است. در این دما به دلیل تغییر جهت رشد دانه، این چنین مورفولوژی ایجاد شده است. به دلیل اینکه مورفولوژی دانه‌ای در این تصویر وجود ندارد، میانگین اندازه دانه برای آن محاسبه نشد. به نظر می‌رسد که دمای بازپخت ۶۵۰°C بیش از اندازه بالا بوده و به خاطر از بین رفتن دانه‌بندی معمول، برای بازپخت لایه‌های نازک مناسب نیست.



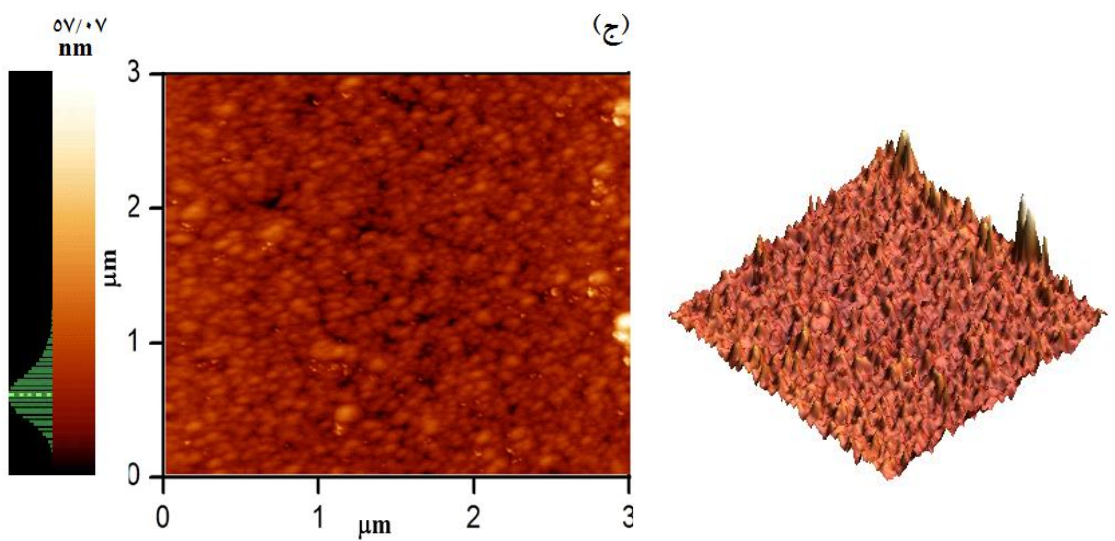
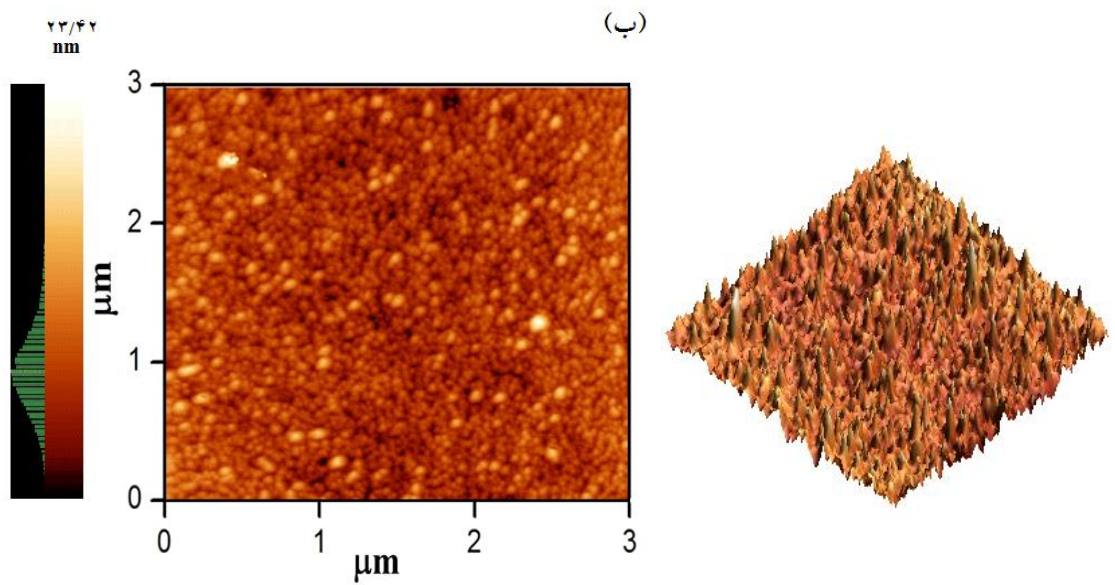
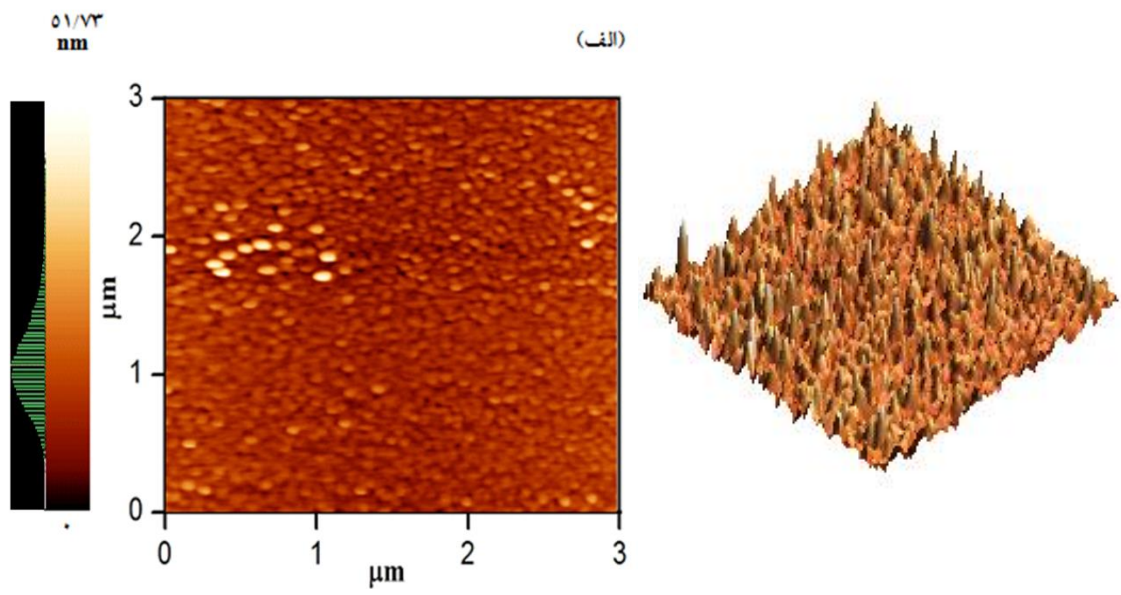
شکل ۹. تصویر SEM لایه نازک FePt بازپخت شده

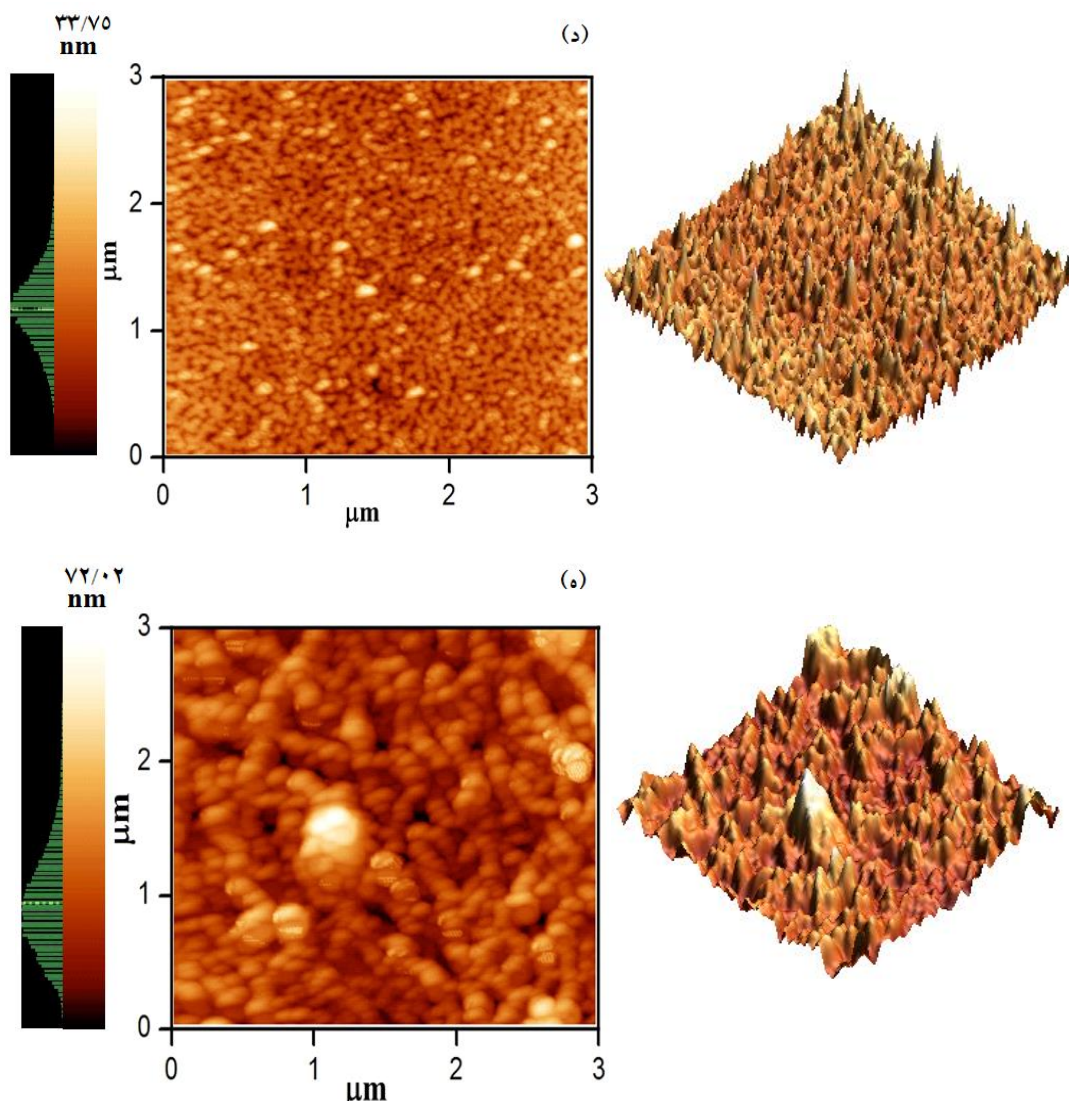
در دمای ۶۵۰°C.



شکل ۱۰. اندازه دانه‌های لایه‌های نازک FePt بازپخت شده نسبت

به دمای بازپخت.



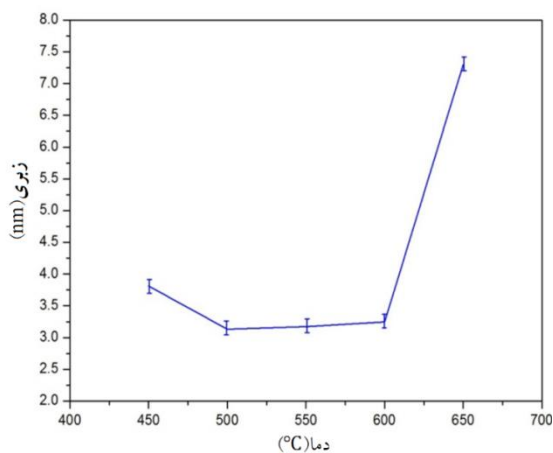


شکل ۱۱. تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی نمونه‌های آنیل شده در دمای (الف) ۴۵۰°C، (ب) ۵۰۰°C، (ج) ۵۵۰°C، (د) ۶۰۰°C و (ه) ۶۵۰°C.

اندازه مناطق مجزا نسبت به دمای قبل افزایش یافته است. به نظر می‌رسد جوانه‌های فاز جدید پس از تشکیل با نرخ‌های متفاوتی رشد یافته‌اند و یا حتی ممکن است برخی از دانه‌های مجزا به یکدیگر پیوسته باشند و تشکیل خوشه‌های بزرگتری را داده‌اند. بنابراین پستی و بلندی‌های ایجاد شده درشت‌تر هستند. این موضوع از تصاویر سه بعدی بهتر قابل تشخیص است. با مقایسه تصاویر سه بعدی دمای آنیل ۵۰۰°C و ۵۵۰°C با یکدیگر ملاحظه می‌شود که پستی و بلندی‌های سطح نمونه بازپخت شده در دمای ۵۵۰°C درشت‌تر است. بنابراین

و این مقدار زبری برای حافظه‌های مغناطیسی مناسب است. ولی هر قدر این زبری کمتر باشد فاصله هد تا سطح لایه نازک را می‌توان کاهش داد. در این صورت عملکرد حافظه و هد بهبود می‌یابد. شکل ۱۱ (ب) تصویر میکروسکوپی نیروی اتمی نمونه بازپخت شده در دمای ۵۰۰°C نشان می‌دهد. در این تصویر مورفولوژی مجزا نسبت به دمای ۴۵۰°C مشخص‌تر است. برخلاف تصاویر نمونه قبل، در این تصاویر اندازه این مناطق کمتر بوده و حدود ۵۰nm است. زبری سطح این نمونه در حدود به ۲/۱nm کاهش یافته است. در دمای آنیل ۵۵۰°C دوباره

در شکل ۱۲ زبری سطح نمونه ها نسبت به دمای بازپخت نشان داده شده است. مطابق این شکل با افزایش دمای بازپخت، زبری سطح در حالت کلی افزایش یافته است. با این وجود زبری در دمای 500°C نسبت به دمای 450°C کاهش یافته است. همچنین در دمای 650°C زبری سطح به یکباره افزایش شدیدی پیدا کرده است. رشد دانه، پیوستن دانه‌های مجزا به یکدیگر و آزاد شدن تنش در حین بازپخت از عواملی هستند که باعث افزایش زبری شده‌اند.



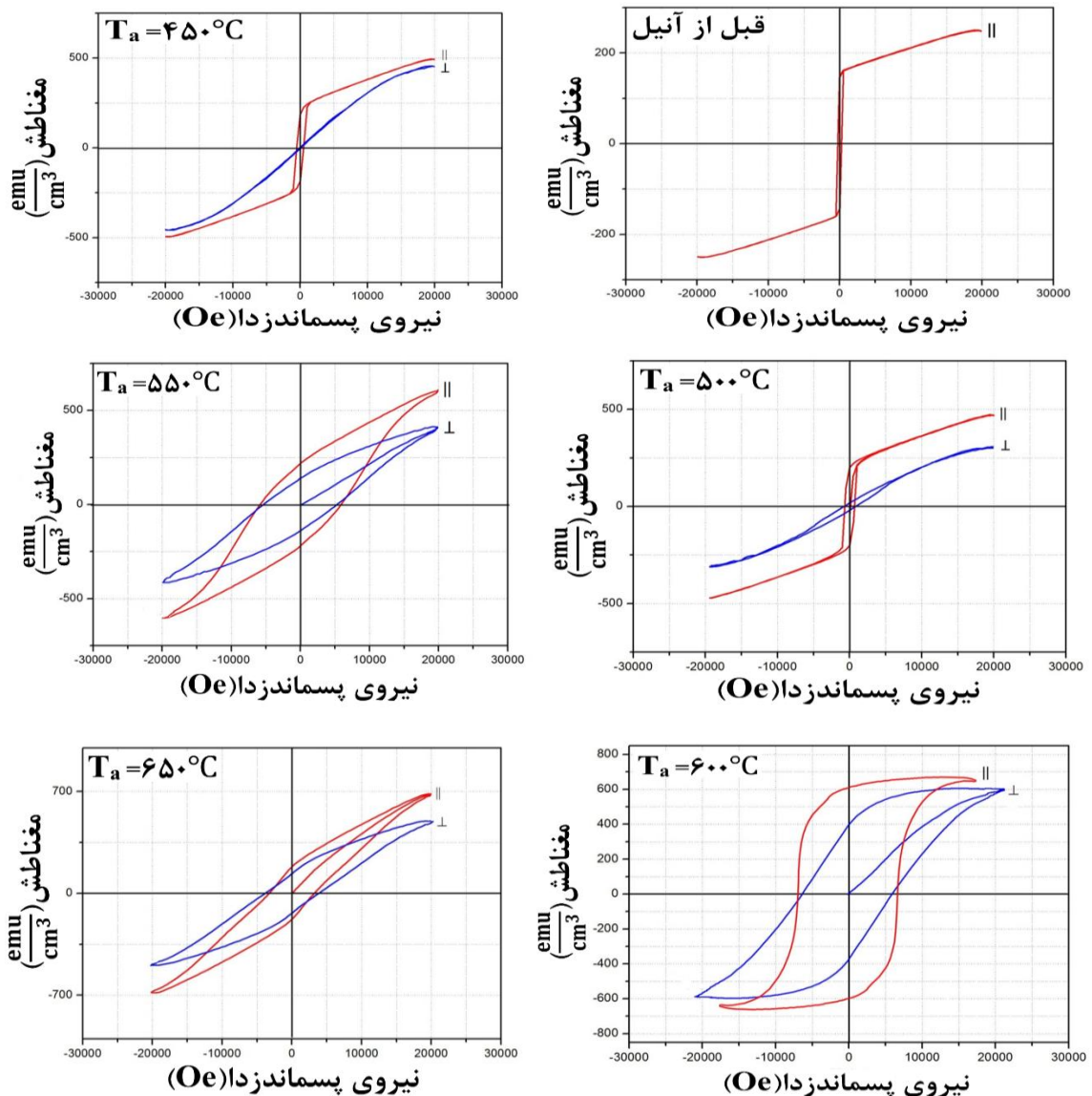
شکل ۱۲. زبری سطح لایه های نازک FePt بازپخت شده نسبت به دمای بازپخت.

اثر دمای بازپخت بر خواص مغناطیسی لایه نازک

در شکل ۱۳ منحنی پسماند نمونه های بازپخت شده در دماهای مختلف نشان داده شده است. منحنی پسماند نمونه قبل از بازپخت پهنای بسیار کمی داشته و شبیه منحنی پسماند مواد فرومغناطیس نرم است. بر اساس نتایج تفرق اشعه ایکس ملاحظه می شود که این نمونه دارای ساختار مکعبی وجوه مرکزدار نامنظم است. اگرچه در این ساختار جهت $\langle 111 \rangle$ جهت آسان مغناطیسی محسوب می شود اما به دلیل اینکه دانسیته اتمی در جهات مختلف تفاوت چندانی نمی کند، ناهمسانگردی مغناطوکرستالی نیز در جهات مختلف تغییر زیادی نمی کند و نسبت به FePt منظم ناهمسانگردی

زبری سطح نسبت به دمای قبل افزایش یافته است. با وجود مشاهده مورفولوژی مجزا در این دما، اما به نظر می رسد که این جزیره‌ها در حال پیوستن به یکدیگر هستند و تمایل به تشکیل خوشه‌های بزرگتر را دارند. بنابراین انتظار می رود در نمونه بازپخت شده در دمای 600°C مورفولوژی پیوسته‌ای مشاهده شود. زبری سطح در دمای بازپخت 550°C حدود $3/2\text{nm}$ است.

با افزایش دمای بازپخت به 600°C ملاحظه می شود که مورفولوژی سطح به از حالت دانه‌ای و جزیره‌ای به حالت پیوسته تبدیل شده و تعداد مناطق مجزا کاهش یافته است (۱۱د). این مناطق جهت‌گیری خاصی ندارند و به صورت تصادفی است. زبری سطح در این دما حدود $3/2\text{nm}$ است و نسبت به دمای بازپخت 550°C تغییری نکرده است. با افزایش دمای بازپخت به 650°C مورفولوژی سطح به یکباره تغییر یافته است. تصویر میکروسکوپی نیروی اتمی سطح این نمونه به صورت دوبعدی و سه‌بعدی در شکل ۱۱(ه) نشان داده شده است. طبق تصویر دو بعدی ملاحظه می شود که اندازه مناطق روشن بزرگتر شده است و در حدود 200nm افزایش یافته است و از تصویر سه بعدی این نمونه پستی و بلندی نسبتاً بالای سطح کاملاً مشخص بوده و مناطق با ارتفاع زیاد به صورت تپه‌هایی دیده می شود. به دلیل اینکه دمای 650°C نسبتاً بالاست، مناطق مجزا بیش از پیش به یکدیگر پیوسته‌اند و تشکیل خوشه‌های بزرگتر را داده‌اند و این خوشه‌ها بر روی مورفولوژی سطح تأثیر گذاشته است. میزان به هم پیوستن دانه‌ها و اندازه خوشه‌ها تأثیر بسیار زیادی روی زبری دارد. زبری سطح در این نمونه در حدود $7/3\text{nm}$ افزایش یافته است. این زبری بسیار بالاست و برای حافظه های مغناطیسی مناسب نیست. با توجه به فاصله هد تا سطح لایه نازک احتمال این که هد با سطح برخورد داشته باشد بسیار زیاد است. در این صورت عملکرد حافظه با اختلال مواجه می شود و حتی ممکن است موجب آسیب رسیدن به هد و سطح لایه نازک شود.



شکل ۱۳. منحنی های پسماند لایه های نازک FePt بازپخت شده در دماهای مختلف.

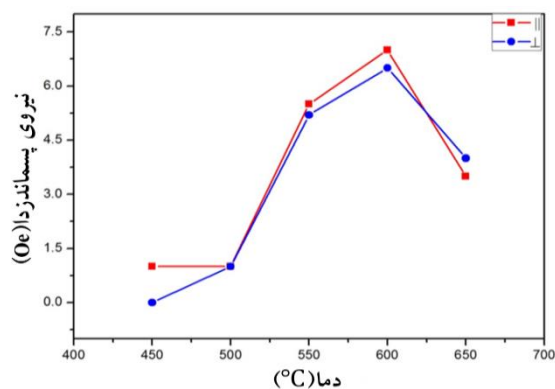
لایه‌های نازک در دماهای مختلف صورت می‌پذیرد؛ چرا که با انجام استحاله نامنظم به منظم ساختار کریستالوگرافی از مکعبی وجوه پر نامنظم به FCT منظم تبدیل می‌شود. ناهمسانگردی مغناطو کریستالی در جهت محور C ساختار تتراگونال FePt بسیار بالاست و موجب افزایش نیروی پسماندزدا می‌شود.

در نمونه‌های بازپخت شده منحنی پسماند عمودی نیز رسم شده است. در دمای 450°C با وجود اینکه ساختار تتراگونال FePt تشکیل یافته است اما همانند نمونه قبل

مغناطو کریستالی کمتری دارد. در این نمونه پس از اشباع مغناطیدگی، به دلیل کم بودن طول بر هم کنش تبدیلی، با حذف میدان مغناطیسی گشتاورهای مغناطیس به سرعت به حالت اولیه خود برمی‌گردند. بنابراین با وجود اینکه اندازه دانه‌ها در این نمونه‌ها نسبت به دیگر نمونه‌ها کمتر است، نیروی پسماندزدا آن بسیار کم است و برای استفاده در حافظه‌های مغناطیس مناسب نیست. برای افزایش ناهمسانگردی و در نتیجه نیروی پسماندزدا باید ساختار کریستالوگرافی تغییر یابد. این کار با بازپخت

وجود ندارد و مورفولوژی سطح به یکباره تغییر یافته است. کاهش نیروی پسماندزدای صفحه‌ای و عمودی در این دما را می‌توان به مورفولوژی این نمونه نسبت داد. در این دما دانه‌ها بیش از اندازه رشد کرده‌اند و مرزخانه‌ها بیش از پیش کاهش یافته‌اند. با کاهش مرزخانه‌ها موانع در مقابل حرکت حوزه‌های مغناطیسی نیز کاهش یافته است. بنابراین دو قطبی‌های مغناطیسی در شدت میدان کمتری به حالت اولیه خود باز می‌گردند. در نتیجه نیروی پسماندزدا کاهش یافته و مقدار آن به کمتر از 5kOe رسیده است.

برای مقایسه بهتر خواص مغناطیسی، نیروی پسماندزدای صفحه‌ای و عمودی نسبت به دمای بازپخت در شکل ۱۴ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش دمای بازپخت تا 600°C نیروی پسماندزدای عمودی و صفحه‌ای تقریباً به یک میزان افزایش یافته‌اند و در دمای 650°C دوباره کاهش یافته‌اند. همچنین در همه دماها به جز دمای 650°C نیروی پسماندزدای صفحه‌ای اندکی بیشتر از نیروی پسماندزدای عمودی است.



شکل ۱۴. تغییرات نیروی پسماند زدا صفحه‌ای و عمودی نمونه‌های بازپخت شده در دماهای مختلف.

نتیجه‌گیری

۱- لایه نازک آهن-پلاتین به ضخامت 10nm به طور یکنواخت بر سطح Corning glass رسوب‌دهی شد.

نیروی پسماندزدای آن بسیار کمتر از مقدار مورد انتظار است. با مراجعه به نتایج تفرق اشعه ایکس و اطلاعات کریستالوگرافی مربوط به این نمونه ملاحظه می‌شود که با وجود تشکیل فاز تتراگونال منظم پارامتر نظم آن برابر $0/5$ است. بنابراین می‌توان گفت ساختار FePt-L1_0 ایده‌آل به وجود نیامده است و همین امر موجب کاهش ناهمسانگردی مغناطیسی این نمونه شده است. با افزایش دمای بازپخت به 500°C تغییر محسوس در منحنی پسماند رخ نداده است و همانند شکل قبل ملاحظه می‌شود که نیروی پسماندزدا بسیار کم است. در این نمونه نیز لایه نازک FePt دارای خواص مغناطیسی نرم است چرا که پارامتر نظم این نمونه نیز همانند نمونه قبل کم و برابر $0/5$ است. بنابراین نمونه‌های بازپخت شده در دمای 450°C و 500°C در کاربرد به عنوان حافظه مغناطیسی مناسب نیستند. نمونه بازپخت‌شده در دمای 550°C منحنی پسماند صفحه‌ای و عمودی پهن‌تر دارد و نیروی پسماندزدای مغناطیسی نسبت به نمونه‌های قبل افزایش نسبتاً زیادی یافته است. پارامتر نظم این نمونه $0/71$ بوده و شبکه FePt به ساختار تتراگونال کاملاً منظم نزدیک‌تر شده است. از سوی دیگر منحنی پسماند صفحه‌ای و عمودی به یک اندازه پهن شده است و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جهت‌گیری ترجیحی شبکه‌ای در این نمونه وجود ندارد. این موضوع قبلاً توسط پیک‌های طیف اشعه ایکس تأیید شده بود. با افزایش دمای بازپخت به 600°C نیروی پسماندزدای صفحه‌ای و عمودی افزایش چشمگیری نداشته و حدود $5/3\text{ kOe}$ است. تنها تفاوت آن با دمای 550°C افزایش نسبت مربعی شدن (S) حالت صفحه‌ای به $0/93$ است. این مقدار برای حافظه‌های مغناطیسی بسیار مناسب است. اما در دمای بازپخت 650°C نیروی پسماندزدا و همچنین نسبت مربعی شدن کاهش یافته است. اگر به تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی این نمونه (شکل ۹) توجه شود ملاحظه می‌شود که دانه‌بندی مورد انتظار در آن

مراجع

۱. C. D. Mee, E. D. Daniel, *Magnetic Recording Technology*, 2nd edition of part 1 Magnetic Recording Handbook, 1990.
۲. F. Jorgensen, *The Complete Handbook of Magnetic Recording*, 4th edition, 1995.
۳. D. Weller, A. Moser, L. Folks, M. E. Best, W. Lee, M. F. Toney, M. Schwickert, J.-U. Thiele, M. F. Doerner, *High K_u materials approach to 100 Gbits/in IEEE*, Trans. Magn36 (2000) 10-15.
۴. B. D. Cullity, C. D. Graham, *Introductoin to magnetic materials*, 2nd edition, IEEE Press, 2009.
۵. Z. Zeliang, *The effects of Additional Nonmagnetic layers on Structure and Magnetic properties of $L1_0$ FePt thin films*, A thesis submitted for the degree of doctor philosophy, Departement of material science, Natoinal University of Singapore, 2007.
۶. Y. N. Hsu, S. Jeong, D. E. Laughlin, D. N. Lambeth, *The effects of Ag underlayer and Pt intermediate layers on the microstructure and magnetic properties of epitaxial FePt thin films*, Magnetism and Magnetic Materials, 260(2003)282-294.
۷. T. Shima, K. Takanashi, Y. K. Takahashi and K. Hono, *Preparation and magnetic properties of highly coercive FePt films*, Applied Physics Letters, 81(2002), 1050-1052.
۸. M. Weisheit, L. Schultz, S. Fahler, *On the influence of composition on laser-deposited Fe-Pt films*, Magnetism and Magnetic Materials, 290-291(2005)570-572.
۹. Zl. Zhao, J. Ding, Y. Li, G.M. Chow, J.S. Chen, and J.P. Wang, *Microstructural Studies of $L1_0$ -FePt Thin Films with High Coercivity Fabricated at Low Deposition Temperatures*,
نمونه قبل از بازپخت دارای شبکه کریستالی مکعبی وجوه پر با ساختار نامنظم آهن-پلاتین است.
۱۰. با بازپخت نمونه‌ها در دماهای ۴۵۰ و ۵۰۰°C شبکه تراگونال با ساختار منظم آهن-پلاتین تشکیل می‌یابد.
۱۱. با بازپخت نمونه‌ها در دمای بیش از ۵۰۰°C نظم بلند برد ایجاد می‌شود.
۱۲. با بازپخت نمونه‌ها در دمای ۵۰۰ تا ۶۵۰°C به دلیل رشد دانه و همچنین افزایش پستی و بلندی، میانگین اندازه دانه در حدود از ۳۳ تا ۵۹nm و زبری سطح حدوداً از ۳/۲ تا ۷/۳nm افزایش می‌یابد.
۱۳. قبل از بازپخت به دلیل ایجاد نشدن ساختار تراگونال منظم آهن-پلاتین، نیروی پسماندزدای صفحه‌ای حدود ۰/۵kOe است.
۱۴. در دمای بازپخت ۴۵۰ و ۵۰۰°C به دلیل عدم ایجاد نظم بلندبرد و ناهمسانگردی مغناطو کریستالی کافی، نیروی پسماندزدای ۱kOe به دست می‌آید.
۱۵. با افزایش دمای بازپخت به ۵۵۰°C، نیروی پسماندزدا در حالت صفحه‌ای و عمودی به ترتیب به ۵/۵ و ۵/۲kOe به دست می‌آید.
۱۶. در دمای بازپخت ۶۰۰°C نسبت مربعی شدن در حالت صفحه‌ای به ۰/۹۴ افزایش می‌یابد.
۱۷. در دمای بازپخت ۶۵۰°C به دلیل رشد بیش از اندازه دانه‌ها و کاهش مرز بین آن‌ها به عنوان موانع در مقابل حرکت مرزدانه‌ها، نیروی پسماندزدای صفحه‌ای و عمودی به ۳/۵ و ۴/۵kOe کاهش می‌یابد.

18. J. C. Lodder, L. T. Nguyen, *FePt Thin Films: Fundamentals and Applications*, Encyclopedia of Materials: Science and Technology 2005.
19. S. Ostanin, S. S. A. Razee, J. B. Staunton, B. Ginatempo and E. Bruno, *Magnetocrystalline anisotropy and compositional order in $Fe_{0.5}Pt_{0.5}$: Calculations from an ab initio electronic model*, Appl. Phys, 93(2003)453-457.
20. B. Laenens, F. M. Almeida, N. planckaert, K. Temst, J. Meersschaut, A. Vantomme, V. Rentenberger, M. Rennhofer and B. Sepoil, *Interplay between structural and magnetic properties of $L1_0$ -FePt(001) thin films directly grown on MgO(001)*, Applied Physycs, 105(2009) 1-6.
21. R. Naturalium, *Nanocrystalline Fe-Pt alloys: phase transformations, structure and magnetism*, to obtain the academic degree of Doctor of Science (Dr. rer. nat.), Faculty of Mathematics and Natural Sciences Dresend University Technology, Submitted on 2006.
- Mtallurgical and Materials Transaction A, 38A(2007)811-814.
10. T. Shima, T. Seki, K. Takanashi, Y. K. Takahashi, K. Hono, *Fabrication of $L1_0$ ordered FePt thin films with a canted easy magnetization axis on MgO(110) substrate*, Magnetism and Magnetic Materials, 272-276(2004)557-559.
11. X. H. Xu, H. Sh. Wu, F. Wang, X. Li, *Structure and magnetic properties of FePt and FePt/Ag thin films deposited by magnetron sputtering*, Thin Solid Films, 472 (2005)222-226.
12. S. Khizroev and D. Litmidov, *Perpendicular Magnetic Recording*, Kluwer Academic publishers, Boston, 2004.
13. S. Okamoto, O. Kitakami, N. KiKuchi, T. Miyazaki and Y. Shimada, *Size dependence of magnetic properties and swiching behavior in FePt $L1_0$ nanoparticles*, Physics Rewiew B.67(2003) 1 -6.
14. M. Weisheit, L. Schultz and S. Fahler, *Textured growth of highly coercive $L1_0$ ordered FePt thin films on single crystalline and amorphous substrates*, Applied Physic, 95(2004)7482- 7491.
15. A. Martins, M. C. A. Fantini, A.D. Santos, *The influence of the deposition temperature and substrate on the properties of FePt thin films*, Magnetism and Magnetic Materials, 265 (2003)13-22.
16. N. Zotov, R. Hiergeist, A. Savan, A. Ludwig, *Effects of annealing time on the structural and magnetic properties of $L1_0$ FePt thinfilms*, Thin Solid Films, 518(2010)4977-4985.
17. J. Smit, *Magnetic Properties of Materials*, Ch. S. Middelhoke, McGraw-Hill, New York, 1971.