

# اثر پرتو دهی لیزر بر ساختار سطح و خواص اپتیکی آلیاژ فلزی آمورف

مرضیه ولی اقبال

آلیاژهای فلزی آمورف به لحاظ داشتن خواص مغناطیسی برجسته نظیر نفوذپذیری بالا، نیروی وادارندگی خیلی پایین، عدم وجود ناهمسانگردی بلوری، القای اشباع بالا و همین طور خواص مکانیکی ویژه نظیر استحکام و سختی بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. در این مقاله آلیاژ آمورف پایه آهن تهیه شده به روش چرخش مذاب با ضخامت ۳۰ میکرون تحت تابش لیزر تپی Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ nm قرار گرفته است. ساختار آمورف نمونه ها توسط آنالیز XRD تایید شده است. سپس برای بررسی تغییرات سطح نمونه ها پس از پرتو دهی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. در مرحله بعد برای تعیین تغییرات نوع و غلظت عناصر موجود در نمونه پرتو دهی شده، آنالیزهای PIXE و RBS به کار برده شده است. این آنالیزها نشان می دهد که با افزایش توان پرتو لیزر درصد Si نیز افزایش می یابد. در نهایت خواص اپتیکی (ضریب جذب، گاف انرژی) نمونه در فاصله طول موجی ۲۰۰-۲۰۰۰ nm توسط طیفسنج نوری بررسی شده است.

واژه های کلیدی: آلیاژ آمورف، لیزر Nd:YAG, PIXE, RBS

## ۱. مقدمه

این نوارها به طور متوسط ۴ تا ۵ بار بیشتر از فولادهای سیلیکونی است. در میان سامانه های آلیاژی، از لحاظ اقتصادی آلیاژهای پایه آهن به علت منابع طبیعی فراوان، قیمت ارزان و ترکیبی از خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی منحصر بفرد بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱،۲].

برهمکنش پرتو لیزر با سطح فلز آمورف تغییراتی در خواص اپتیکی و مورفولوژی سطح ایجاد می کند. برهمکنش لیزرهای تپی پر انرژی با مواد مختلف بخصوص فلزات، کاربردهای صنعتی فراوانی نظیر ماشین

مواد آمورف<sup>۱</sup> نوعی از مواد هستند که دارای ساختار بلوری نیستند. این مواد علاوه بر سختی بالا، دارای خواص مغناطیسی عالی هستند. اغلب به صورت نوار، سطح و ورقه های نازک تهیه می شوند. عمده کاربرد این مواد در هسته ترانسفورماتورها، روکش تفلن همراه، در صنعت جواهرات و در تجهیزات نظامی می باشد. سختی

۱) مربی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای. آدرس پست الکترونیک:

[zibavaliaghbal@gmail.com](mailto:zibavaliaghbal@gmail.com)

۲) دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه بوعلی سینا. آدرس پست الکترونیک:

[bkjaleh@yahoo.com](mailto:bkjaleh@yahoo.com)

۳) مربی، مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران. آدرس پست الکترونیک:

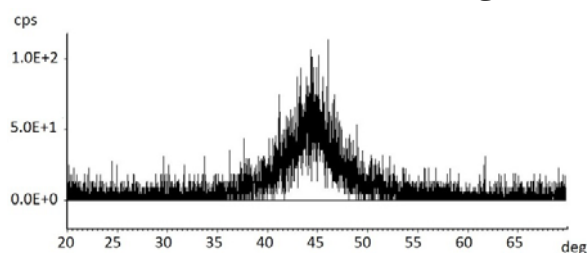
[mjtorkamany@yahoo.com](mailto:mjtorkamany@yahoo.com)

ADP2000 مجهز به بلور گرافیتی تکفام ساز انجام شد. طول موج پرتو ایکس  $1.5405 \text{ \AA}$  می باشد و الگوی پراش نمونه در محدوده  $2\theta$  (۴ تا ۸۰ درجه) و با سرعت پیمایش  $2^\circ/\text{min}$  ثبت شده است. تغییرات مورفولوژی سطح نمونه های مرجع و پرتو دهی شده با استفاده از تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مدل (Cam Scan MV2300) بررسی شده است. میزان بازتاب از سطح به کمک طیف سنج ماوراء بنفش - فرورسرخ (uv-vis-nir) مدل Variancary500 scan اندازه گیری شده است.

نوع و غلظت عناصر موجود در نمونه نیز با استفاده از آشکارساز  $^5\text{RBS}$  نوع Surface Barrier با زاویه  $165^\circ$  درجه نسبت به باریکه یونی و آشکارساز  $^1\text{PIXE}$  از نوع Si(Li) با زاویه  $135^\circ$  درجه نسبت به باریکه یونی تعیین شده است.

### ۳. نتایج

در پراش اشعه X مواد مختلف، مشاهده پیک های تیز نشان دهنده وجود فازهای بلوری است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود، پراش اشعه X دارای یک پیک تخت است که نشان دهنده ساختار آمورف نمونه های ساخته شده به روش چرخش مذاب است. تشکیل ساختار آمورف در این روش به دلیل سرد شدن سریع نمونه ها می باشد.



شکل ۱. طیف XRD نمونه ی ساخته شده به روش چرخش مذاب.

کاری ظریف، برشکاری، سوراخکاری، جوشکاری و لایه نشانی با لیزر<sup>۱</sup> دارد [۳-۶].

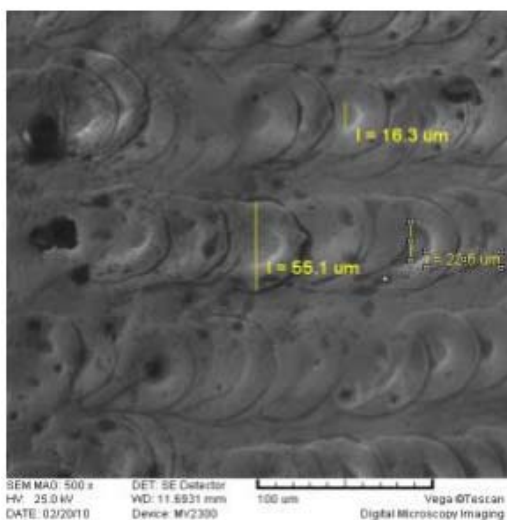
میزان انعکاس پرتو به عواملی مانند طول موج انتشار لیزر، شرایط و خواص ماده از جمله میزان پرداخت سطح، میزان اکسید شدن سطح و دمای آن بستگی دارد. به طور عمومی هرچه طول موج پرتو بیشتر شود میزان بازتابندگی ماده نیز افزایش می یابد. بخشی از انرژی لیزر منعکس شده و بخش دیگر آن در داخل ماده جذب می شود. جذب نور در فلزات با یک اثر نوری الکتریکی داخلی اتفاق می افتد که الکترون های موجود در باند رسانش فلزات را به سطوح انرژی بالاتر منتقل می کند. تغییر متالورژیکی اصلی که در قطعات ماشینکاری شده با لیزر رخ می دهد در ناحیه HAZ<sup>۲</sup> است. بدین منظور باید منطقه HAZ را در خلال ماشینکاری با لیزر با کنترل فاکتورهای مختلف کوچکتر کنیم. افزایش سرعت و کاهش توان لیزر منجر به این امر می شود [۷].

### ۲. مواد و روش ها

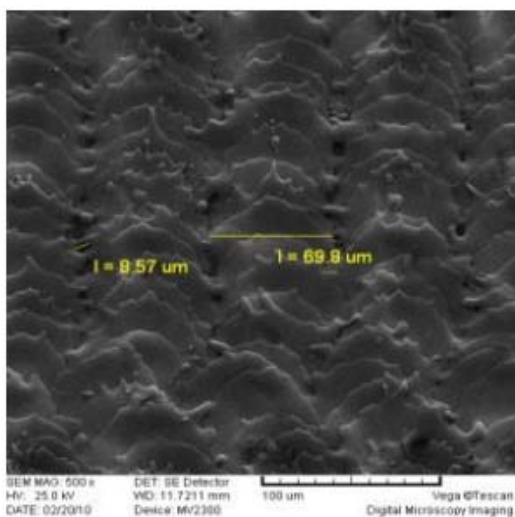
در این پژوهش اثر پرتو دهی لیزر بر مورفولوژی و خواص اپتیکی سطح لایه آلیاژ آمورف پایه آهن مورد بررسی قرار گرفته است. نوارهایی از این آلیاژ به ضخامت  $30 \mu\text{m}$  و پهنای  $3 \text{ cm}$  به روش چرخشی مذاب تهیه شده اند. لیزر تپی Nd:YAG (YAG 50 Model acousto-optic Q-switched) با پهنای تپ  $240 \text{ ns}$  و طول موج  $1064 \text{ nm}$  برای پرتو دهی نمونه ها استفاده شده است. نمونه ها در دمای اتاق و در حضور گاز آرگون با توان های بین ۲ تا  $3.5 \text{ W}$ ، در بسامد  $4 \text{ KHz}$  پرتو دهی شده اند. مطالعه ساختار نمونه های ساخته شده به وسیله آنالیز پراش اشعه ایکس<sup>۳</sup> (XRD) صورت گرفته است. این آنالیز توسط دستگاه پراش اشعه ایکس ساخت شرکت TALSTRUCTUR ایتالیا مدل

4 Scanning electron microscope  
5 Rutherford backscattering spectrometry  
6 Particle-induced X-ray emission

1 Pulse laser deposition  
2 Heat Affected Zone  
3 X-ray diffraction



ب



ج

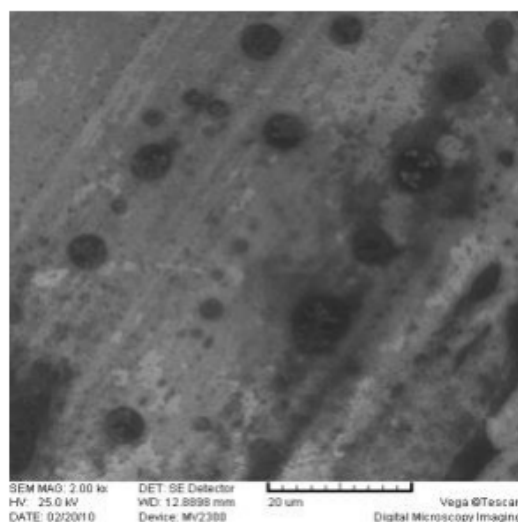
شکل ۲. تصاویر SEM (الف) نمونه مرجع، (ب) نمونه پرتودهی شده با توان ۱.۵W (ج) نمونه پرتودهی شده با توان ۲W.

در این رابطه R درصد بازتاب می‌باشد.

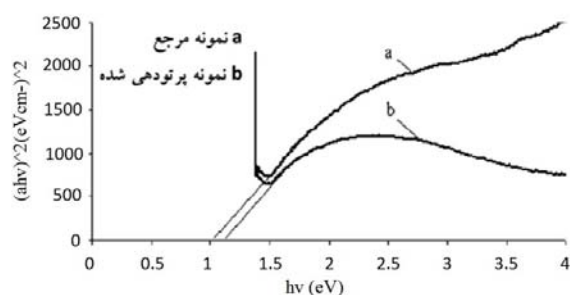
$$\alpha(v) = \frac{(1-R)^2}{(2R)} \quad (1)$$

هنگامی که تپی از لیزر به سطح هدف می‌رسد، مقداری از انرژی آن منعکس شده و مقداری از انرژی تابیده شده به سطح در نمونه جذب می‌شود. در نتیجه پرتودهی یک ناحیه داغ روی سطح نمونه ایجاد می‌شود، فرآیند ذوب از سطح آغاز شده و به علت رسانایی گرمایی هدف، بعد از مدتی جبهه‌ی ذوب در عمق هدف پیش می‌رود. ماده مذاب به اطراف پراکنده شده و دوباره منجمد می‌شود. میزان همپوشانی و عمق نفوذ پرتو به عواملی از قبیل بسامد، توان و فاصله سطح نمونه از کانون پرتو بستگی دارد. افزایش توان باعث ایجاد حفره در نمونه شده و افزایش بسامد همپوشانی نواحی مذاب را بیشتر می‌کند [۸]. تصاویر میکروسکوب الکترونی روبشی (SEM) سطح نمونه‌ها قبل و بعد از پرتودهی در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قطر ناحیه مذاب با افزایش توان بزرگتر شده است.

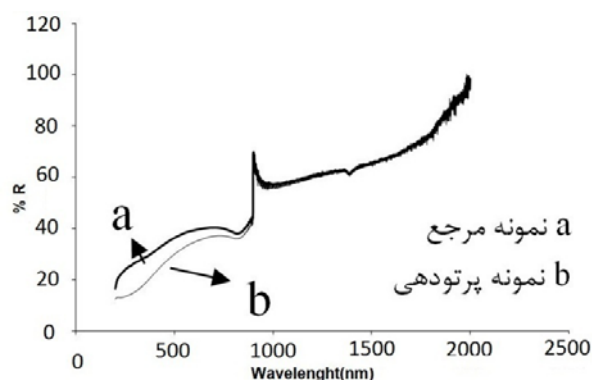
درصد بازتاب از سطح نمونه نیز به صورت تابعی از طول موج برای دو نمونه مرجع و پرتودهی شده در شکل ۳ رسم شده است. مشاهده می‌شود که بازتاب پس از پرتودهی در طول موج‌های کمتر از ۹۰۰nm کاهش یافته است. ضریب جذب از رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید.



الف



شکل ۴. منحنی  $(\alpha hv)^{1/n}$  بر حسب انرژی.



شکل ۳. درصد بازتاب به صورت تابعی از طول موج.

در آنالیز PIXE از باریکه پروتونی با انرژی ۲ MeV استفاده شده است. در این آنالیز میزان عناصر با مقدار اشعه ایکس تولیدی توسط آن عنصر محاسبه می‌شود. در نتیجه هر چه مقدار یک عنصر در مسیر عبور باریکه یونی بیشتر باشد، اشعه ایکس بیشتری تولید می‌کند و مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. در این آنالیز به علت استفاده از آشکارساز Si(Li) عناصر سبکتر از آلومینیوم نشان داده نمی‌شود و بنابراین عنصر B را به روش PIXE نمی‌توان آشکار کرد. تنها می‌توان تغییر درصد عناصر Fe، Co و Si را بعد از تابش لیزر محاسبه کرد [۱۳]. طیف نمونه مرجع و طیف نمونه پرتو دهی شده در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل پیداست مقدار عنصر Si آشکار شده در نمونه بعد از پرتو دهی بیشتر از نمونه مرجع می‌باشد. این آنالیز در نقاط مختلف سطح نمونه، دارای نتایج مشابه می‌باشد. یعنی افزایش عنصر Si، در نقاط مختلف از سطح نمونه، بعد از پرتو دهی تأیید می‌شود.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در اثر پرتو دهی با لیزر سطح نمونه به صورت مذاب درآمده و عنصر Si بدلیل سبک بودن نسبت به Fe و Co به سطح نمونه آمده و در انجام آنالیز به روش PIXE مقدار بیشتری را نشان داده است. همان‌طور که از مقایسه دو نمودار مشخص است در نمونه پرتو دهی شده قله مربوط به عنصر Si بزرگتر است. درصد عناصر به دست آمده از طیف‌های PIXE توسط نرم‌افزار GUPIX در جدول ۱ قابل

در مواد آمورف نمودار تغییرات ضریب جذب در محدوده‌ی مرئی-فرابنفش بر حسب انرژی فوتون را می‌توان به چند بخش تقسیم کرد. ناحیه اول مربوط به گذارهای فونونی است و به علت انرژی کم‌تر نسبت به نوار ممنوعه، گذارهای فوتونی در آن دیده نمی‌شود. ناحیه دوم یا ناحیه تائوک مربوط به نوار ممنوعه اپتیکی و جذب بالا می‌باشد که این ناحیه به گذارهای بین نوار ظرفیت و هدایت ارتباط دارد و طبق رابطه ۲ نوار ممنوعه اپتیکی در این ناحیه قابل تعیین است [۹].

$$\alpha(\nu) = \beta^2 \frac{(h\nu - E_{opt})^n}{h\nu} \quad (2)$$

در این رابطه  $E_{opt}$  نوار ممنوعه اپتیکی شیشه است و  $n$  فاکتوری است که برای انتقالات مستقیم الکترونی به نوار هدایت ۰٫۵ و برای انتقالات غیر مستقیم برابر ۲ می‌باشد.  $h\nu$  انرژی فوتون برخوردی است و  $\beta$  مقدار ثابت و نشان‌دهنده ثابت پسماند نوار و مستقل از دما و وابسته به ضریب شکست نمونه است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با رسم منحنی  $(\alpha hv)^{1/n}$  در مقابل  $h\nu$  و تقاطع شیب بخش راست منحنی با محور انرژی، مقدار ممنوعه اپتیکی تعیین می‌شود. در اینجا فاکتور  $n$  برابر ۰٫۵ قرار داده شده است [۱۰-۱۲].

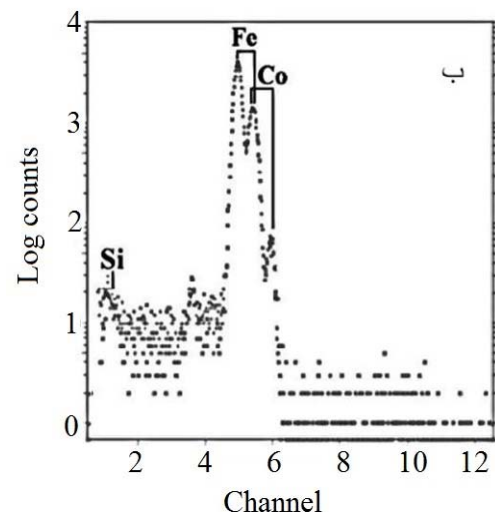
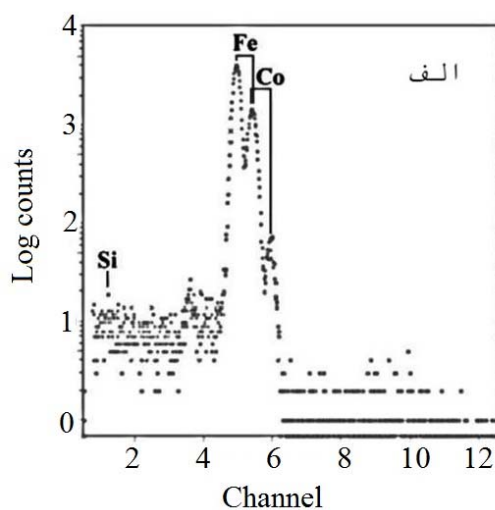
برای آنالیز RBS، باریکه یونی ذرات آلفا با انرژی ۲ MeV به کار رفته است. این آنالیز، تغییرات ایجاد شده در نمونه را متناسب با عمق نفوذ باریکه یونی نشان می-دهد [۱۴].

جدول ۲. شرایط مختلف پرتودهی نمونه‌ها.

sample	P	F	Gas
reference	-	-	-
1	2w	4 KHz	Ar
2	2w	4 KHz	N <sub>2</sub>
3	3.5w	4 KHz	Ar

همانطور که در شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد، درصد عناصر در این نمونه‌ها پس از تابش لیزر تغییر کرده است. علاوه بر قله‌های ناشی از عناصر Si و O در طیف RBS نمونه پرتو داده شده، تفاوت در بازه‌ی علامت-گذاری شده این دو طیف آشکار است. مایل بودن طیف نمونه پرتو داده شده (قرار گرفتن طیف پرتودهی شده زیر طیف مرجع) در بازه نشان داده شده، حاکی از کاهش عناصر آهن و کبالت (و افزایش سیلیس به صورت قله در مکان نشان داده شده در طیف) می‌باشد. بنابراین می‌توان دریافت که بعد از تابش لیزر در سطح فلز آمورف مقادیر عناصر آهن و کبالت به نسبت سیلیس کاهش یافته و چنانچه به درون فلز نفوذ می‌کنیم به تدریج بر درصد عناصر آهن و کبالت افزوده می‌شود (و طیف نمونه پرتو داده شده بر روی طیف نمونه مرجع منطبق می‌شود). علاوه بر این طیف RBS حضور مقداری اکسیژن در سطح نمونه، بعد از تابش لیزر را نشان می-دهد که حاکی از سوخته شدن فلز آمورف می‌باشد (علیرغم استفاده از گاز Ar و N<sub>2</sub> برای اجتناب از این پدیده). به عبارت دیگر با اسپری کردن گاز Ar و N<sub>2</sub> همچنان نتوانسته‌ایم اکسیژن را به طور کامل از سطح نمونه دور نگه داریم.

مشاهده است و شرایط پرتودهی نمونه‌ها در جدول ۲ بیان شده است.

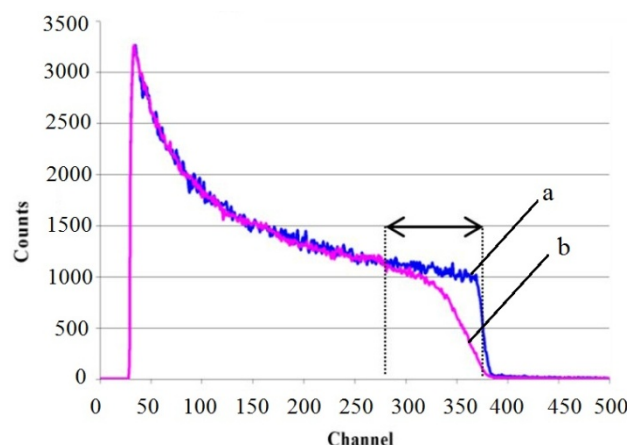


شکل ۵. طیف PIXE (الف) نمونه مرجع، (ب) نمونه پرتودهی شده.

جدول ۱. درصد عناصر Fe، Co و Si قبل و بعد از تابش لیزر.

نمونه	درصد Si	درصد Fe	درصد Co	% خطای آماری Si	% خطای آماری Fe	% خطای آماری Co
مرجع	۱،۱ ±۰،۲	۷۷،۲ ±۰،۳	۲۱،۷ ±۰،۴	۱۹،۱۸	۰،۴۱	۱،۸۴
شماره ۱	۲،۱ ±۰،۳	۷۶،۱ ±۰،۳	۲۱،۷ ±۰،۴	۱۱،۲۶	۰،۴۰	۱،۵۳
شماره ۲	۴،۱ ±۰،۶	۷۴،۳ ±۰،۴	۲۱،۶ ±۰،۵	۱۴،۱۹	۰،۵۵	۲،۱۹
شماره ۳	۳،۸ ±۰،۵	۷۴،۷ ±۰،۵	۲۱،۵ ±۰،۵	۱۳،۲۳	۰،۶۱	۱،۹۱

(نمونه شماره ۱ و ۳). همچنین می‌توان مشاهده کرد که بیشترین درصد Si متعلق به نمونه‌ای می‌باشد که با حضور گاز N<sub>2</sub> پرتودهی شده است. بررسی خواص اپتیکی نمونه‌های پرتودهی شده به کمک طیف‌سنج ماوراء بنفش-فروسرخ نشان می‌دهد میزان بازتاب در طول موج‌های بین ۹۰۰-۲۰۰ nm کاهش یافته و گاف نوری نیز از مقدار ۱,۲ به ۱ الکترون ولت رسیده است.



شکل ۶. طیف RBS، a: نمونه مرجع، b: نمونه پرتودهی شده.

### مراجع

- [1] V.G.Kravest., G.Kravets, I.A.Kosko., M.A.Kolesnik, and L.V.Poperenko, 'Effect of laser and thermal annealing on optical and structural properties of amorphous metal alloys', Russian physics journal, Vol. 45, No. 4, 2002.
- [2] A. Van den beukel, in Rapidly Solidified Materials, edited by P. W. Lee and S. Carbonera (ASM, New York, 1986) p. 193.
- [3] Martin Von Allmen, Andreas Blatter, 'Laser-Beam Interactions with Materials', Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2<sup>nd</sup> Edition.
- [4] Chunyi Liu, 'A study of particle generation during laser ablation with application', Athesis of Doctor of Philosophy in Engineering, university of California, 2005.
- [5] I. Z. Naqavi, E. Savory, R. J. Martnuzzi, 'A numerical investigation of laser heating including the phase change process in relation to laser drilling', The univ. of Western Ontario, Dept. of MechAnd Materials Engg, N6A5B9, 2004.
- [6] W. Han, 'Computational and experimental investigations of drilling and welding for microelectronic packaging', A Disserta

### ۴. نتیجه گیری

آلیاژهای آمورف کاربردهای گسترده‌ای در صنعت دارند، بنابراین بررسی سطح این مواد بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در اینجا پراش اشعه ایکس دارای پیک نبوده و ساختار آمورفی آلیاژهای ساخته شده به روش چرخش مذاب را تایید می‌کند. از آنجایی که آنالیزهای PIXE و RBS نوع و غلظت عناصر در عمق را مشخص می‌کنند، روش توانمندی برای بررسی تاثیر تابش لیزر بر ریخت‌شناسی سطح نمونه‌ها می‌باشند. در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فرورفتگی‌هایی در سطح ظاهری نمونه مشاهده می‌شود. به طوریکه درصدی از عناصر سطح در اثر برخورد پرتو لیزر به خارج پریده‌اند (نقطه جوش آهن ۳۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، کبالت ۲۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و سیلیس ۲۶۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد). در ادامه با ذوب شدن لایه‌های زیرین سطح (نقطه ذوب آهن ۱۵۳۶ درجه سانتی‌گراد، کبالت ۱۴۹۵ درجه سانتی‌گراد و سیلیس ۱۴۱۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد) عنصر Si به دلیل داشتن چگالی پایین‌تر نسبت به آهن و کبالت به سطح نمونه آمده و بعد از سرد شدن، مقدار آن در سطح نمونه افزایش می‌یابد. اطلاعات به دست آمده از PIXE و RBS نیز این موضوع را تأیید می‌کند. با توجه به جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت با افزایش توان پرتو لیزر درصد Si نیز افزایش می‌یابد

-tion Submitted to the faculty of the Worcester Polytechnic Institute, 2004.

- [7] Wen-Hui Lee, Tugrul Ozel, 'Laser micro-machining of spherical and elliptical 3-D objects using hole area modulation method', Piscataway, Nj 08854 USA.
- [8] Fusao Hirose, Makoto Takagi, Hideshi Mori, Yasuo Kitoh and Toru Imura, 'Microstructure of Fe-B-Si alloy surface layers produced by laser-quenching', Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 31(1992) pp. 3940-3945.
- [9] N.F. Mott, E.A. Davis, Electronic processes in non-crystalline materials, Clarendon Press, UK (1971).
- [10] Y. Kawamura, M. Takagi, M. Akai and T. Imura: Mater. Sci. & Eng. 98(1988) 449.
- [11] c.h. Chen, E.M. Kelder, J. Schoonman, Thin Solid Films 342(1999) 35.
- [12] Adam A. Bahishti, M. A. Majeed Khan, S. Kumar, M. Husain and M. Zulfeguar, 'Effects of laser irradiation on the optical properties of amorphous  $Se_{96-x}Te_4Ga_x$  thin films', Chalcogenide letters Vol. 4, No. 12, December 2007, pp. 155-160.
- [13] M. Antoszewska, R. Brzozowski, J. Kazimierz Dolecki, E. Frańczak, B. Pawłowski, M. Moneta., Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 310, 1 Sep. 2013, pp. 27–31.
- [14] M.V. Reddy, B. Pecquenard, P. Vinatier, C. Wannek, A. Levasseur, P. Moretto., RBS and NRA analyses of lithium inserted amorphous  $Li_{1+x}NiVO_4$  films, Vol. 246, Issue 2, May 2006, pp. 397–401.

