

رسوب فیزیکی بخار حاصل از اشعه الکترون برای ایجاد لایه نازک آلیاژ نیکل-تیتانیوم روی ویفر سیلیکونی

سید خطیب الاسلام صدر نژاد^۱، محمد رضا شایق^۲

۱- استاد دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف

۲- کارشناس ارشد

پژوهشگاه مواد و انرژی،

هسته تحقیقات تولید مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

Electron Beam PVD of NiTi thin films on silicon wafers

S.K. Sadrnezhaad¹, M. R. Shayegh²

1- Professor 2- MSc Graduate

Materials and Energy Research Center, P.O. Box 13145-1659, Tehran, Iran and Research Center for Production of Advanced Materials, Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, P.O. Box 11365-9466, Tehran, Iran

چکیده:

لایه‌های نازک آلیاژ نیکل-تیتانیوم با درصد مساوی از نیکل و تیتانیوم به‌عنوان یک ماده عملگر خودکار در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی به خاطر چگالی بالای انرژی مکانیکی ناشی از تحول مارتنزیتی، مورد توجه قرار گرفته است. لازمه تولید لایه‌های نازک با خواص مطلوب، انتخاب ترکیبات مناسب عناصر نیکل و تیتانیوم مورد استفاده برای لایه نشانی بهینه است. این مقاله روش جدیدی برای ساخت لایه‌های نازک آلیاژ نیکل-تیتانیوم دارای عناصر همراه گوناگون به روش ذوب تحت شعاع الکترونی و رسوب فیزیکی بخار Electron Beam PVD/راهنه می‌دهد.
لمتات کلیدی: لایه نازک، انرژی مکانیکی، رسوب فیزیکی بخار، ذوب تحت شعاع الکترونی، NiTi

Abstract

Near-equiatom NiTi thin films are of interest as robust actuator materials in micro-electro-mechanical systems (MEMs) due to high-density mechanical-energy associated with reversible martensitic transformation. Special care must be taken into account for optimum thin film deposition with acceptable titanium and nickel contents to produce desirable properties in the layer. This paper reports on a new electron beam PVD technique to fabricate various NiTi thin films on silicon wafer.

Keywords: Thin Film, Mechanical Energy, Physical Vapor Deposition, Electron Beam Melting, NiTi, SMA

آلیاژ حافظه دار به گروهی از مواد کاربردی اطلاق می‌شود که قابلیت حفظ شکل اولیه خود را پس از اعمال یک فرآیند تغییر شکل دارد [۱]. این خاصیت نشات گرفته از یک تغییر فاز در حالت جامد است که تحت آن اتمها بدون انجام فرآیند نفوذ از یک فاز دمای پائین (مارتنزیت M) که قابلیت تغییر فرم دارد، در اثر حرارت دادن به یک فاز دمای بالا (آستنیت A) تبدیل می‌شود. از مجموعه تحولات انجام گرفته خواص ویژه‌ای چون حافظه‌داری و سوپرلاستیسیته به دست می‌آید که در مواد و آلیاژهای دیگر به چشم نمی‌خورد [۲].

آلیاژ ناینیتول با ترکیب مساوی از نیکل و تیتانیم از موفق ترین آلیاژهای حافظه دار به شمار می‌آید. این آلیاژ می‌تواند کرنشی در حدود ۸ درصد با تنش اعمالی ۷۰۰ MPa را تحمل نموده و مقاومت خوبی به خوردگی و سایش داشته باشد [۳ و ۴]. خاصیت بیوسازگاری این آلیاژ باعث شده که در علم مهندسی پزشکی نقش مهمی را در کاربردهای مربوط به مداوای بیماری و جراحی استخوان ایفا نماید [۵].

فناوری لایه نازک آلیاژ ناینیتول در دهه گذشته بسیار مورد توجه بوده و لایه‌های نازک ساخته شده از آلیاژهای پایه NiTi به‌عنوان بهترین ریزحسگر و ریزعملگر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سامانه‌های میکروالکترومکانیکی اکنون در دماهای کمتر از ۱۰۰°C به کار گرفته می‌شوند [۶]. استفاده از این آلیاژ در ساخت ریزوالو [۷]، ریز پمپ [۸]، ریزچنگک [۹] و میکروآینه [۶] کاربرد فراوانی یافته است. ساخت ریزوالو برای مثال به مرحله تولید انبوه رسیده و کاربرد سیستم‌های میکروالکترومکانیکی باعث شده که در ساخت لایه‌های نازک آلیاژ ناینیتول، روش‌های متعددی به کار گرفته شود.

روش‌های مختلفی برای ساخت آلیاژهای لایه نازک پایه NiTi وجود دارد که از جمله می‌توان به ذوب چرخشی [۱۰]، لیزر پالسی [۱۱]، یون پلاسما [۱۲]، تبخیر حرارتی [۱۳] و لایه نشانی توسط فرآیند پراکنش [۱۴ و ۱۵] اشاره کرد. در این تحقیق فرآیند نشاندن فیزیکی بخار حاصل از اشعه الکترون EB-PVD به عنوان روشی مطلوب دارای کنترل بهتر پارامترهای سیستم برای لایه نشانی آلیاژهای حافظه دار پایه NiTi استفاده می‌شود.

روش تحقیق

مواد اولیه مصرفی از شمش تیتانیم با درصد وزنی ۹۹/۹۹۹ و آلیاژ نیکل-تیتانیم حاوی ۴۳/۲۸۶۵ درصد وزنی تیتانیم و ۵۶/۷۱۳۵ درصد وزنی نیکل تولید شده به روش ذوب القایی همراه با ریخته‌گری تحت خلاء استفاده گردید. بوته‌های مخروطی شکل از جنس گرافیت چگال با ابعاد $\phi_1 = 14 \text{ mm}$ ، $\phi_2 = 18 \text{ mm}$ و $H = 17 \text{ mm}$ و $t = 1 \text{ mm}$ بروش تراشکاری تهیه شدند. با استفاده از یک سیستم EB-PVD مدل AUTO 306 (Magnetron Sputtering System) EDWARDS، لایه نشانی تحت خلاء 10^{-7} torr انجام شد. از بسترهای سیلیکونی دارای جهات (۱۱۱) و (۱۰۰) برای لایه نشانی استفاده گردید. سپس با دستگاه SEM مدل XL30 PHILIPS آنالیز EDAX عناصر انجام شد.

آزمایش

آلیاژ نیکل-تیتانیم و شمش تیتانیم خالص به دقت توزین شده و پس از شستشو با استن درون بوته گرافیتی قرار داده شدند. بسترهای سیلیکونی در اندازه‌های $20 \times 20 \text{ mm}$ بریده شده و طی مراحل زیر شستشو داده شدند:

۱. تمیزکاری در دستگاه آلتراسونیک به مدت ۱۵ دقیقه
۲. تمیزکاری با استن و پروپانل ۵ بار به مدت ۱۰ دقیقه
۳. غوطه‌وری در استن، خشک کردن با هوای خشک پرفشار
۴. بازبینی سطح با میکروسکوپ نوری

برای تمیزکاری بیشتر و اطمینان از عدم وجود اکسید روی سطح بسترها، نمونه‌ها به مدت ۲ دقیقه در محلولی حاوی ۲۰٪ اسید فلئوئوریک، ۳۰٪ اسید نیتریک و باقی آب مقطر قرار داده شده و سپس با آب مقطر شستشو داده شدند. از هوای خشک برای خشک کردن سطح بسترهای سیلیکونی استفاده شد. سپس نمونه‌ها روی پایه نگهدارنده ثابتی که از قبل برای معلق نگهداشتن نمونه‌ها در فاصله ۱۲ cm از سطح بوته مهیا شده بود، قرار داده

شدند. لازم به یادآوری است که در حین رساندن محفظه به خلاء مناسب از سیستم Glow Discharge برای رفع آلودگی‌های درون محفظه و احتمالاً نمونه‌ها استفاده شد. پس از رسیدن به خلاء مناسب، برای به حداقل رساندن اثر out-gassing اشعه الکترونی در دمای 600°C به مدت ۵ دقیقه به محتویات داخل بوتله تابانده شد. سپس محتویات داخل بوتله تا 6×10^{-7} torr، تقریباً ۳۰ دقیقه وقت لازم بود. برای عملکرد بهتر پمپ دیفوزیونی خلاء، نیتروژن مایع در اطراف محفظه پمپ ریخته شد. پس از رسیدن به خلاء مورد نظر و قبل از شروع عملیات لایه نشانی، با بالا بردن شدت اشعه، محتویات داخل بوتله ذوب شد تا ترکیب یکنواختی از آلیاژ ایجاد شود. در این هنگام یک صفحه فلزی به فاصله نزدیک روی بوتله قرار می‌گرفت تا از نشست بخارات ایجاد شده در حین آلیاژسازی در محفظه خلاء جلوگیری نماید. پس از گذشت زمان لازم، خلا محفظه کنترل و مقدمات لایه نشانی فراهم می‌گردید.

نتایج

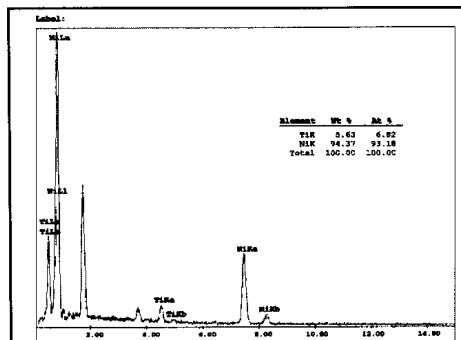
آلیاژ حافظه دار نیکل-تیتانیوم حاوی $58/71$ درصد وزنی نیکل و $47/88$ درصد وزنی تیتانیوم، نسبت $50-50$ درصد اتمی را سبب می‌شود. با اندک تغییری در این نسبت، خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ به شدت تغییر می‌کند. لایه‌های نازک حاوی نیکل و تیتانیوم با نسبت‌های مختلف حاصل از تبخیر آلیاژهای دارای ترکیبات متفاوت در این تحقیق ساخته شد. تاثیر ترکیب آلیاژ هدف بر ترکیب لایه نازک حاصل بدین ترتیب معین شد. شکل ۱ دو نمونه لایه ایجاد شده با بزرگنمایی $500\times$ دارای ساختار آمورف را نشان می‌دهد. علت آمورف شدن، اختلاف دمای قابل توجه لایه در حال تشکیل و بستر سیلیکون است. برای کریستاله شدن، لازم است لایه تحت عملیات حرارتی مناسب قرار گیرد [۱۶].

ترکیب لایه نازک حاصل از تبخیر آلیاژ هدف شکل ۲ ترکیب لایه نشسته بر بستر سیلیکون در جهت (۱۱۱) و شکل ۳ ترکیب لایه حاصل در جهت (۱۰۰) حاصل از تبخیر آلیاژ خام حاوی $43/2865$ درصد وزنی تیتانیوم بدون اضافه کردن تیتانیوم اضافی را نشان می‌دهد. تبخیر آلیاژ بوسیله پرتو الکترون و نشان دادن بخار بر هر دو لایه در شرایط یکسان روی بستر سیلیکون با میانگین نرخ رسوب دادن 20 nm/s ، میزان خلاء $1/5 \times 10^{-6}$ torr و ضخامت لایه $1 \mu\text{m}$ انجام شد.

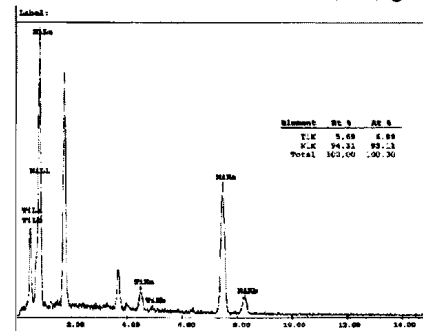
در آزمایش بعد، مقداری شمش تیتانیوم برای افزایش درصد تیتانیوم لایه نازک به آلیاژ خام اولیه تا رسیدن مجموع ترکیب شیمیایی به حد $50-50$ درصد اتمی افزوده شد. لایه نشانی با شرایط قبلی انجام شد و ترکیب حاصل بعد از انجام آنالیز به صورت نمودار شکل‌های ۴ و ۵ گزارش شد. نتیجه تکرار آزمایش با مقدار بیشتر تیتانیوم برای رسیدن مجموع ترکیب شیمیایی به حد $45-55$ در شکل‌های ۶ و ۷، به حد $42-58$ در شکل‌های ۸ و ۹، به حد $30-70$ در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و به حد $20-80$ در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱: دو تصویر از لایه نازک آمورف ایجاد شده به روش EB-PVD در بزرگنمایی $500\times$.

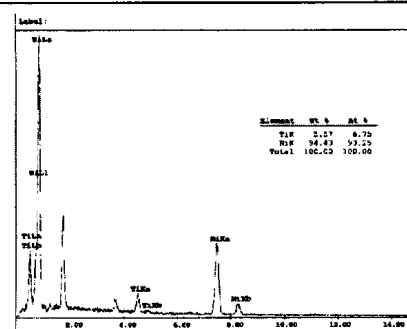


الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۱۱)

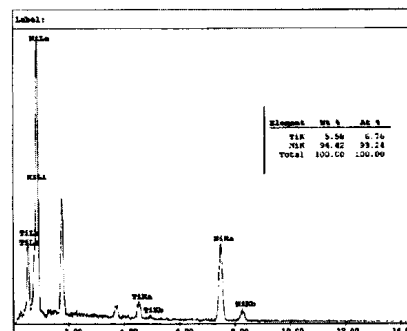


ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۱۱)

شکل ۲: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از تبخیر و نشان دادن شمش حاوی $51/656$ درصد اتمی نیکل و $48/344$ درصد اتمی تیتانیوم

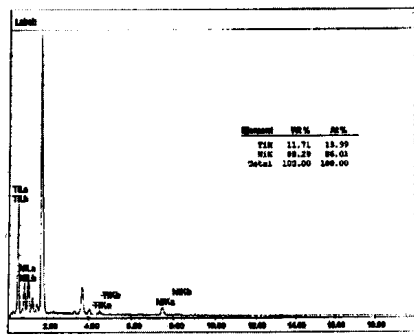


الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۰۰)

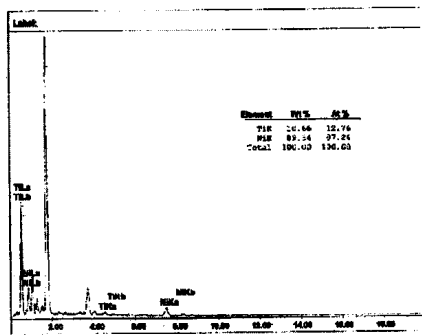


ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۰۰)

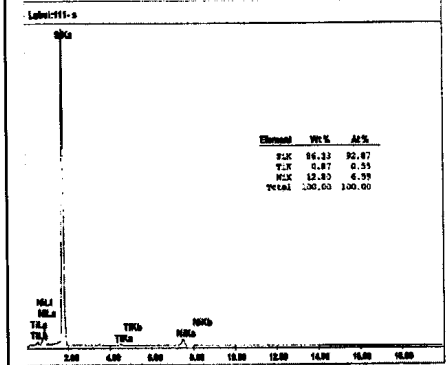
شکل ۳: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از تبخیر و نشان دادن شمش حاوی $51/656$ درصد اتمی نیکل و $48/344$ درصد اتمی تیتانیوم



ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون
بستر از نوع (۱۱۱)

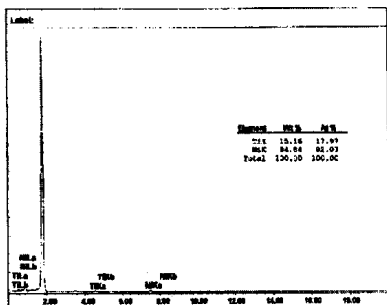


الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون
بستر از نوع (۱۱۱)

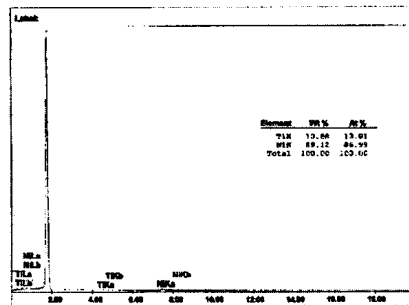


الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از
نوع (۱۱۱)

شکل ۶: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از تبخیر و نشان دادن شمش حاوی ۲۵ درصد اتمی نیکل و ۵۵ درصد اتمی تیتانیوم

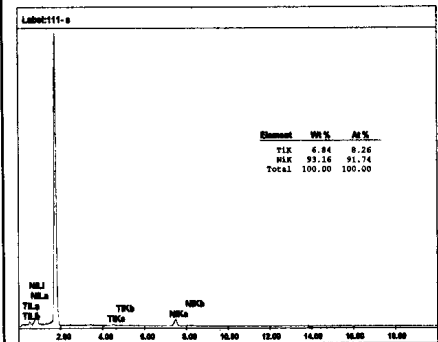


ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون
بستر از نوع (۱۰۰)

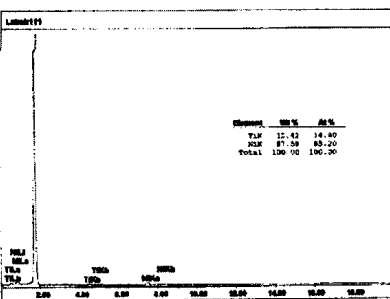


الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون
بستر از نوع (۱۰۰)

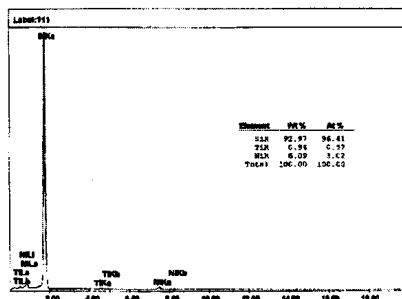
شکل ۷: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از تبخیر و نشان دادن شمش حاوی ۲۵ درصد اتمی نیکل و ۵۵ درصد اتمی تیتانیوم



ب - بدون آنالیز بستر از نوع (۱۱۱)
شکل ۴: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از
تبخیر و نشان دادن شمش حاوی ۵۰ درصد اتمی
نیکل و ۵۰ درصد اتمی تیتانیوم

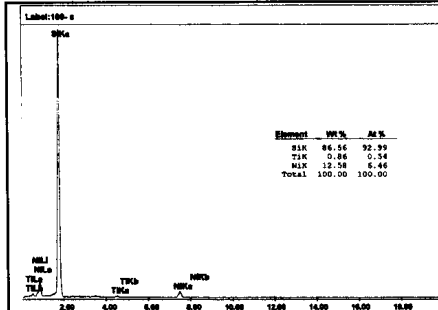


ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون
بستر از نوع (۱۱۱)

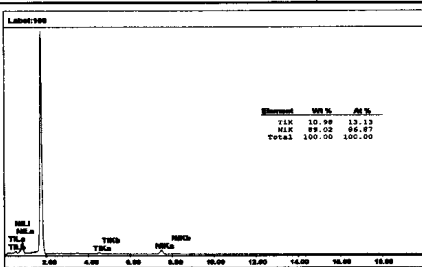


الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون
بستر از نوع (۱۱۱)

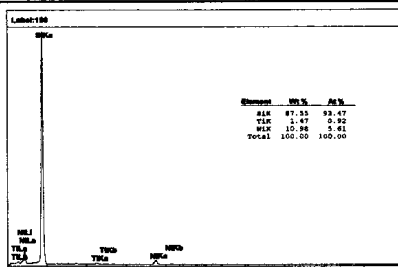
شکل ۸: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از تبخیر و نشان دادن شمش حاوی ۲۲ درصد اتمی نیکل و ۵۸ درصد اتمی تیتانیوم



الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر
از نوع (۱۰۰)

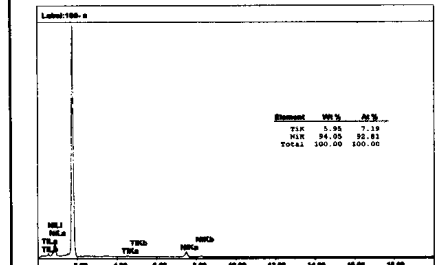


ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون
بستر از نوع (۱۰۰)



الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون
بستر از نوع (۱۰۰)

شکل ۹: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از تبخیر و نشان دادن شمش حاوی ۲۲ درصد اتمی نیکل و ۵۸ درصد اتمی تیتانیوم



ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر
از نوع (۱۰۰)

شکل ۵: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از
تبخیر و نشان دادن شمش حاوی ۵۰ درصد اتمی
نیکل و ۵۰ درصد اتمی تیتانیوم

بحث

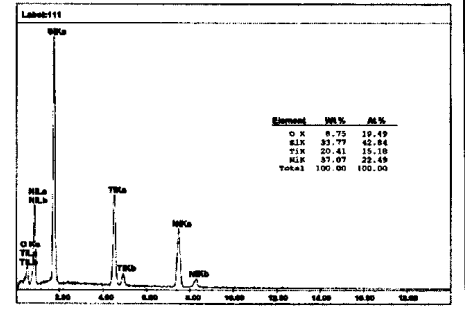
در حالی که لایه نشانی بخار برخواسته از یک عنصر خالص نیاز به کنترل ترکیب ندارد، لایه نشانی از آلیاژ هدف نیازمند کنترل دقیق و پیچیده ترکیب شیمیایی است. به سبب تفاوت فاحش فشار بخار اجزاء آلیاژ، سرعت‌های متفاوت رسوب کردن و ثابت‌های تعادل و جذب سطحی متفاوت اجزاء آلیاژ، برقراری نسبت استوکیومتری در حد مطلوب در لایه نازک آلیاژ به راحتی امکان‌پذیر نیست. لذا لایه نشانی به روش ذوب و تبخیر با پرتو الکترونی نیاز به تصحیح دقیق ترکیب شیمیایی دارد. بهینه‌سازی پارامترهای مهم سیستم مانند دما، فشار، نرخ لایه نشانی و ترکیب آلیاژ از طریق تغییر درصد عنصر تیتانیوم آلیاژ با توجه به کاهش شدید مقدار آن در لایه نشسته امکان‌پذیر است. تیتانیوم به سبب تبخیر سریع و میل شیمیایی زیاد، بیشتر از نیکل تمایل به تبخیر داشته و از اینرو در ایجاد لایه‌های یکنواخت می‌تواند ایجاد اختلال نماید. برای بهینه‌سازی شرایط تبخیر و لایه نشانی و جلوگیری از اکسیداسیون لایه‌های ایجاد شده به خاطر میل به اکسید شدن تیتانیوم از خلاءهای بالا در حدود 10^{-7} Torr استفاده از نیتروژن مایع برای خنک کردن در محفظه اطراف پمپ دیفوزیونی استفاده شد. شکل ۱۴ جمع بندی نتایج حاصل از آزمایش‌های این تحقیق را ارائه می‌دهد. ملاحظه می‌شود که برای رسیدن به لایه دارای ترکیب ۵۰-۵۰ اتمی، لازم است نسبت اتمی تیتانیوم به نیکل در آلیاژ هدف حدود ۳ باشد.

در روش sputtering که به عنوان روشی دیگر در ایجاد لایه نازک NiTi بکار گرفته می‌شود، وجود گاز آرگون برای ایجاد محیط یونیزه برای پیوستگی پرتو الکترونی لازم بوده و فشار گاز آرگون عاملی موثر در لایه نشانی محسوب می‌شود. زیاد بودن فشار گاز آرگون در سیستم لایه نشانی در عین حال سبب ایجاد تنش‌های کششی بالا و تخلخل لایه رسوب شده و تمایل شدیدی به شکست ترد در نمونه بوجود می‌آورد. در فشارهای گاز آرگون پایین، لایه با دانسیته و خواص مکانیکی بهتری حاصل می‌گردد. از طرفی استفاده از فشار زیاد گاز آرگون باعث افزایش یون‌های آرگون در محفظه لایه نشانی شده و اتم‌ها و مولکول‌های جدا شده از سطح آلیاژ با این یون‌ها برخورد بیشتری بوجود آورده و کم شدن انرژی اتم‌ها، یون‌ها و یا مولکول‌های NiTi برای نشست روی بستر را باعث می‌گردد. باید توجه داشت که کنترل ترکیب شیمیایی، شرط کافی برای حافظه داری لایه‌های نازک پایه NiTi نیست. زیرا با کنترل ترکیب در بعضی موارد باز هم خواص حافظه داری حاصل نمی‌گردد. دلیل این موضوع نامناسب بودن ریز ساختار لایه است. برای حاصل شدن لایه‌های یکنواخت و با حداقل انحراف ترکیب، تمهیداتی چون افزایش فاصله نقطه اثر پرتو الکترونی با سطح بستر (۱۲cm) در نظر گرفته شد. به‌علاوه می‌توان از سیستمی استفاده کرد که توانایی چرخش بستر با سرعتی یکنواخت را داشته باشد. این حالت کمک موثری در جهت ایجاد لایه‌های یکنواخت بوجود آورد.

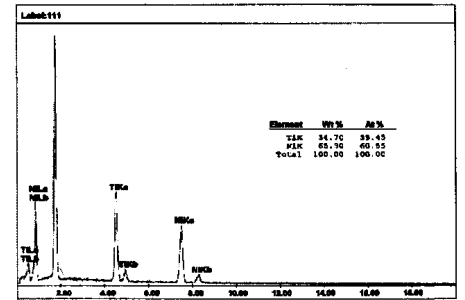
نتیجه‌گیری

یکی از اهداف این تحقیق ارائه نموداری برای استفاده در روش لایه نشانی از طریق رسوب فیزیکی بخار توسط پرتو الکترونی بود. از این‌رو با توجه به داده‌های بدست آمده از آنالیز لایه‌ها، نتایج ارائه شده در شکل ۱۴ حاصل آمد. نمودارهای حاصل از تحقیق نشان داد:

۱. اختلاف بسیار جزئی در آنالیز لایه ایجاد شده روی بسترهای مختلف وجود داشت.
۲. با افزایش میزان تیتانیوم در آلیاژ داخل بوته (آلیاژ هدف)، محتوای تیتانیوم لایه ایجاد شده نیز بیشتر شد.
۳. با فزونی ترکیب آلیاژ هدف به بیشتر از غلظت ۵۸ درصد اتمی، محتوای تیتانیوم لایه به صورت تصاعدی افزایش یافت.
۴. با تنظیم ترکیب شیمیایی آلیاژ هدف، ترکیب ۵۰-۵۰ درصد اتمی نیکل-تیتانیوم در هر دو جهت (۱۱۱) و (۱۰۰) تحقق یافت.
۵. نتایج نشان داد که دستیابی به هر ترکیب مطلوب دیگر از طریق امتداد دادن نمودارهای ترکیب لایه نازک بر حسب ترکیب آلیاژ هدف میسر است.

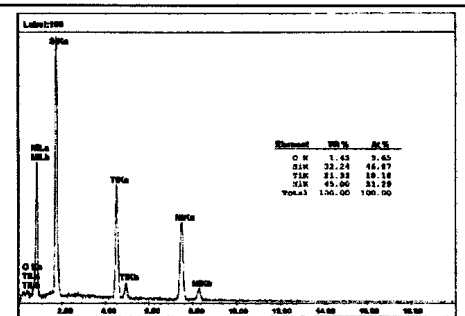


الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۱۱)

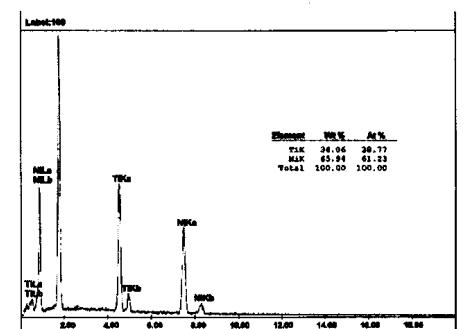


ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۱۱)

شکل ۱۰: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از تبخیر و نشاندن شمش حاوی ۳۰ درصد اتمی نیکل و ۷۰ درصد اتمی تیتانیوم

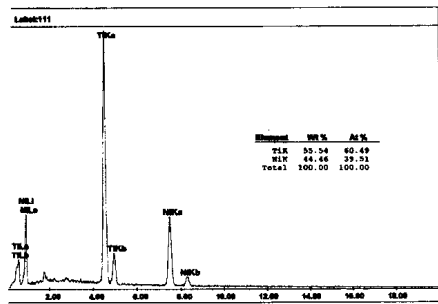


الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۰۰)

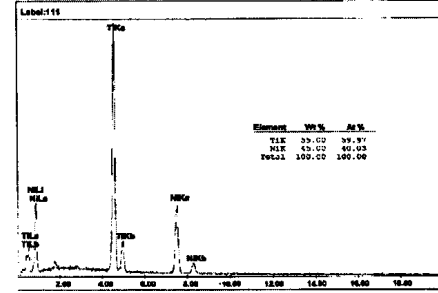


ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۰۰)

شکل ۱۱: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از تبخیر و نشاندن شمش حاوی ۳۰ درصد اتمی نیکل و ۷۰ درصد اتمی تیتانیوم

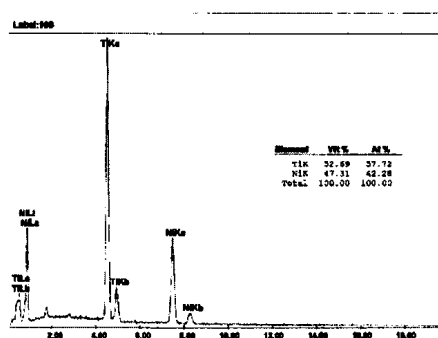


الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۱۱)

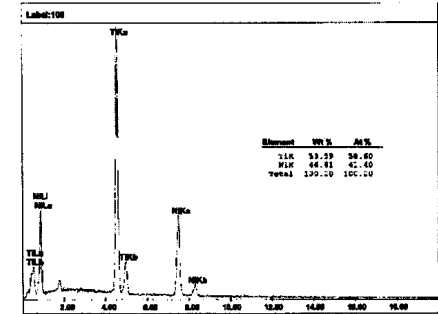


ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۱۱)

شکل ۱۲: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از تبخیر و نشان دادن شمش حاوی ۲۰ درصد اتمی نیکل و ۸۰ درصد اتمی تیتانیم

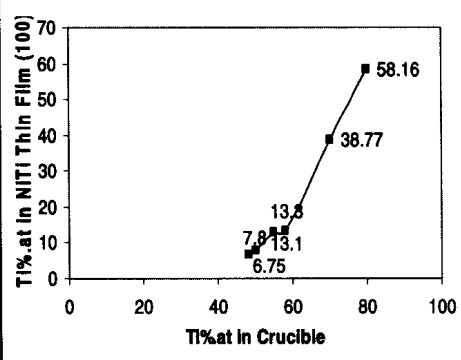


الف - با در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۰۰)

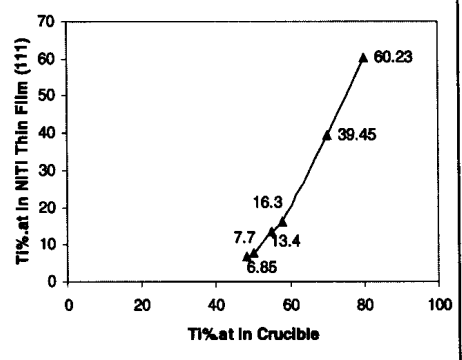


ب - بدون در نظر گرفتن محتوای سیلیکون بستر از نوع (۱۰۰)

شکل ۱۳: آنالیز SEM/EDAX لایه نازک حاصل از تبخیر و نشان دادن شمش حاوی ۲۰ درصد اتمی نیکل و ۸۰ درصد اتمی تیتانیم



ب - در جهت (۱۰۰) روی بستر سیلیکونی



الف - در جهت (۱۱۱) روی بستر سیلیکونی

شکل ۱۴: آنالیز لایه نازک ایجاد شده

مراجع

- [1] Otsuka, K., Ren, X. "Physical Metallurgy of Ti-Ni-based Shape Memory Alloys" Progress in Materials Science, Vol. 50, 2005, pp.511-678.
- [2] Chang, L.C., Read, T.A. "Plastic Deformation and Diffusionless Phase Change in Metal-The Gold-Cadmium Beta Phase" Transaction of AIME, Vol. 189, 1951, pp. 47-68.
- [3] Straosvestsky, D., Gotman, I. "Corrosion Behavior of Titanium Nitride Coated Ni-Ti Shape Memory Surgical Alloy" Biomaterials, Vol. 22, 2001, pp. 1853-1859.
- [4] Imbeni, V., Martini, C., Prandstraller, D., Poli, G., Trepanie, R C., Duerig, T.W. " Preliminary Study of Micro- Scale Abrasive Wear of NiTi Shape Memory Alloy" Wear, Vol. 254, 2003, pp. 1299-1306.
- [5] Fillip, P., Lausmaa, J., Musialek, J., Mazanec, K.. "Structure and Surface of NiTi Human Implants" Biomaterials, Vol. 22, 2001, pp. 2131-2138.
- [6] Fu, Y., Du, H., Zhang, S., Hu, M. "TiNi-based Thin Films in MEMS Application: A Review" Sensors Actuators A, Vol. 112, 2004, pp. 395-408.
- [7] Kohl, M., Skrobaneck, K.D. Miyazaki, S. "Development of Stress-Optimised Shape Memory Microvalves" Sensors & Actuators A, Vol. 72, 1999, pp. 243-250.
- [8] Xu, D., Wang, L., Ding, G., Zhou, Y., Yu, A., Cai, B. "Characteristics and Fabrication of NiTi/Si Diaphragm Micropump" Sensors Actuators A, Vol. 93, 2001, pp.87-92.
- [9] Gill, J.J., Chang, DT., Momoda, L.A., Carman, G.P. "Manufacturing Issues of Thin Film NiTi Microwrapper" Sensors & Actuators A, Vol. 93, 2001, pp.148-156.
- [10] Furuya, Y., Matsumoto, M., Kimura, H.S., Matsumoto, T. "Thermoelastic Phase Transformation of Melt Spun Ti₅₀Ni_{50-x}Cu_x (x=0-20at.%) Ribbons" Materials Science and Engineering A, Vol. 147, 1991, pp.7-15.
- [11] Chen, X.Y., Lu, Y.F., Ren, Z.M., Zhu, S. "Fabrication of NiTi Shape Memory Alloy Thin Filma by Plused Laser Deposition" Journal of Materials Research, Vol. 17, Issue 2, 2002, pp.279-285.
- [12] He, J.L., Won, K.W., Chang, J.T. "TiNi Thin Films Prepared by Cathodic Arc Plasma Ion Plating" Thin Solid Films, Vol.359, 2000, pp.46-54.
- [13] Makino, E., Uenoyama, M., Shibata, T. "Flash Evaporation of TiNi Shape Memory Thin Film for Microactuators" Sensors and Actuators A, Vol. 71, 1998, pp.187-196.
- [14] Ishida, A., Takei, A., Miyazaki, S. "Shape Memory Thin Film of Ti-Ni Formed by Sputtering" Thin Solid Films, Vol.228, 1993, pp.210-214.
- [15] سهراب سنجابی، سید خطیب الاسلام صدر نژاد، ساخت و مشخصه یابی لایه‌های نازک نانوساختار آلیاژهای پایه NiTi برای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی و بیوالکترومکانیکی، پایان نامه دکترا، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۴.
- [16] Sadrnezhaad, S.K. and Mirabolghasemi, S.H., "Optimum temperature for recovery and recrystallization of 52Ni48Ti shape memory alloy", Materials and Design, Vol. 28, Issue 6, 2007, pp 1945-1948.