



مقایسه فرایند پشت‌نگاری لیزری در زیرلایه‌های شفاف شیشه و کوارتز

شبنم عباسی^۱، داود رزاقی^۲، هدیه پازکیان^{۲*}

۱. گروه فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، کد پستی: ۱۶۸۴۶۱۳۱۱۴، تهران - ایران
۲. پژوهشکده فوتونیک و فن‌آوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران - ایران
*Email: hpazokian@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۸/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۰/۱۶

چکیده

در این مقاله به بررسی فرایند پشت‌نگاری لیزری روی زیرلایه‌های شفاف شیشه و کوارتز پرداخته شده است. برای این منظور لیزر سوئیچ‌کیو Nd:YAG بر نمونه استیل تابیده شده است. تابش لیزر روی استیل باعث کندگی ماده از سطح آن شده و پلاسمای ایجاد شده در زیرلایه‌های شیشه و کوارتز نفوذ می‌کند. اثر این فرایند در هر دو زیرلایه مقایسه شده است. علاوه بر این، اثر تعداد پالس و شاریدگی لیزر بر مورفولوژی سطح و میزان و نوع مواد نفوذ یافته در زیرلایه‌ها بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با این فرایند می‌توان میکروکانال‌هایی با قابلیت کنترل ابعاد (پهنا و عمق) با تغییر شرایط تابش‌دهی در زیرلایه ایجاد کرد. حضور نانوذرات فلزی روی زیرلایه‌ها (یون‌های Fe و Cr کوارتز و یون Fe در زیرلایه شیشه) نتیجه مهم این پدیده است که می‌تواند روی کاربرد میکروکانال‌ها تأثیرگذار باشد. شرایط تابش‌دهی از جمله تعداد پالس، شاریدگی و نرخ تکرار و نیز نوع زیرلایه از عوامل مؤثر بر کیفیت کانال‌ها و میزان و نوع مواد نفوذ یافته به زیرلایه هستند. پهنای کانال‌های ایجاد شده در کوارتز بیش‌تر از پهنای کانال‌های شیشه بوده و همچنین میزان و نوع ذرات موجود روی زیرلایه کوارتز از نمونه شیشه بیش‌تر است. میزان و نوع یون‌های نفوذ یافته در زیرلایه‌ها توسط طیفی‌سنجی پراش پرتو ایکس (EDX) و مرئی-فرابنفش (UV-Visible) تعیین شده است. برای بررسی نمایه و پهنای کانال‌ها از نمایه‌سنج سطح و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و برای بررسی نوع ترکیبات موجود در فلز استیل از طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) استفاده شده است.

کلیدواژه‌ها: پشت‌نگاری لیزری، کندگی لیزری، پلاسمون، میکروکانال

Comparison of the laser backwriting process on glass and quartz

Sh. Abbasi¹, D. Razaghi², H. Pazokian^{*2}

1. Physics Department, Iran University of Science and Technology, Postal code: 1684613114, Tehran - Iran
2. Photonic and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14395-836, Tehran - Iran

Research Article

Received 31.10.2020, Accepted 5.1.2021

Abstract

The laser back writing process (LBW) on the glass and quartz has been studied in the present work. For this purpose, a steel target was irradiated with Q-switched Nd:YAG laser pulses. As a consequence of the laser irradiation, the produced plasma is penetrated onto the glass and quartz substrates. The process was compared for two different samples. The effects of the pulse numbers and the laser fluence on the morphology and the target material penetration on the substrate were investigated. The results show that this process produces microchannels with the controlled dimensions (the depth and width) on the substrate. The presence of the nanoparticles (Fe and Cr ions on quartz and Fe ions on glass) is an important result of this process that can affect the microchannels' function. Irradiation parameters, including the number of pulses, the laser fluence, the pulse repetition rate, and the substrate material, affect the channel quality and the type and rate of the ion penetrated onto the substrates. The width of the channels for the quartz sample is greater than that of the glass sample, and also, more ions are deposited on the quartz substrate than the glass. The EDX and UV-Visible spectroscopies were used for studying the penetration rate and the type of ions present on the substrates. The surface profilometer and scanning electron microscopy were used to investigate the profile and the width of the affected area. X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) was used to study the metal target's composition.

Keywords: Laser Backwriting, Laser ablation, Plasmon, Microchannel



۱. مقدمه

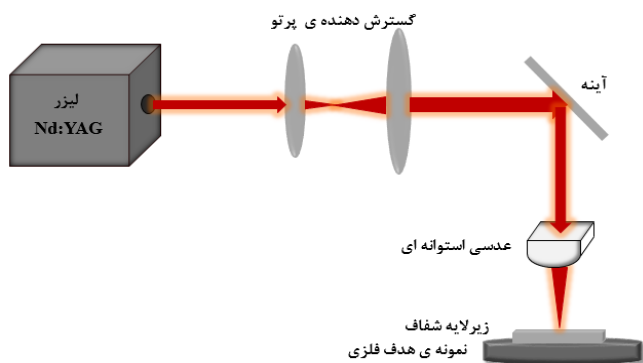
لام شیشه‌ای شامل ۷۲٪ و کوارتز شامل ۹۹٪ از SiO_2 است. یکی از ویژگی‌های مهم زیرلایه‌ها در فرایند LBW، نقطه نرم‌شوندگی بالا و ضریب انبساط گرمایی پایین است که هر دو زیرلایه مورد استفاده در این پروژه به دلیل دارا بودن این ویژگی‌ها، نمونه‌های مناسبی جهت انجام فرایند هستند [۱]. فلز مورد استفاده در این پروژه استیل است که دارای رسانندگی گرمایی پایینی به مقدار 14 W/m.k است. کانال‌های ایجاد شده بر روی زیرلایه‌ها توسط لیزر Nd:YAG کیوسوئیچ شده با طول موج 1064 nm ، پهنای پالس 8 ns و بیشینه انرژی پالس 150 mJ در شاریدگی‌های 1.2 J/cm^2 ، 2 J/cm^2 و 2.9 J/cm^2 ، نرخ تکرار 1 Hz و 10 Hz و تعداد پالس‌های مختلف تابش‌دهی شده‌اند. از دو عدسی کروی به‌عنوان پرتوگستر و یک عدسی استوانه‌ای با فاصله کانونی 10 cm برای تابش روی هدف استفاده شده است. شرایط آزمایشگاهی برای هر دو زیرلایه یکسان در نظر گرفته شده است تا تفاوت در نتایج تنها حاصل از تفاوت در ساختارهای این دو ماده مانند ترکیبات مولی آن‌ها باشد.

۳. نتایج

۱.۳ زیرلایه کوارتز

۱.۱.۳ بررسی اثر شاریدگی و تعداد پالس بر عمق و پهنای کانال‌های ایجاد شده روی کوارتز

شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی از کندگی ایجاد شده در کوارتز با نرخ تکرار 1 Hz ، 60 پالس و شاریدگی‌های مختلف، و شاریدگی 2.9 J/cm^2 و تعداد پالس مختلف را نشان می‌دهند (تمامی تصاویر SEM در مقیاس $100 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شده‌اند). همان‌طور که مشخص است، یون‌های حاصل از فرایند کندوپاش در اطراف کانال قابل مشاهده هستند و داخل کانال سطح صاف مشاهده می‌شود.



شکل ۱. طرحی از چیدمان آزمایش.

فرایند پشت‌نگاری لیزری^۱ (LBW) روشی برای ساخت موج‌برهای نوری است که در سال ۲۰۰۶ م. مطرح شد [۱]. اگرچه روش‌های مختلفی برای ساخت موج‌برهای نوری وجود دارد، این روش به دلیل هزینه‌های کمتر و سرعت بالاتر ساخت می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های پیشین باشد [۲]. در این فرایند زیرلایه شفاف بر روی نمونه هدف قرار می‌گیرد و نور لیزر پس از عبور از عدسی استوانه‌ای و قبل از رسیدن به نمونه از زیرلایه شفاف عبور می‌کند. نور با برخورد به نمونه باعث کندگی سطح آن می‌شود. پلاسمای حاصل از کندگی وارد زیرلایه شده و در نقاطی که یون‌های حاصل از کندگی جایگزین شبکه اتم‌ها می‌شوند باعث ایجاد تغییرات ضریب شکست و ایجاد ناحیه موج‌بری می‌شود [۳]. یکی از پارامترهای مهم در انتخاب زیرلایه، جذب پایین زیرلایه در طول موج لیزر است تا علاوه بر عدم جذب پرتوی لیزر توسط زیرلایه، تغییر ایجاد شده در زیرلایه تنها حاصل از پلاسمای نفوذ یافته در آن باشد. نتایج حاصل از پژوهش انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که تحت شرایط تابش‌دهی مناسب، این روش می‌تواند برای ایجاد میکروکانال‌هایی با ابعاد کوچک‌تر از آنچه قابل‌دستیابی با استفاده از تابش و کندگی مستقیم لیزری است، مورد استفاده قرار گیرد. این مسأله قویاً به نوع زیرلایه و پارامترهای تابش بستگی دارد. در پژوهش حاضر تنها اثر فرایند LBW روی زیرلایه‌ها بدون در نظر گرفتن میزان تغییر ضریب شکست و ایجاد موج‌بر بررسی شده است. در جریان LBW دو فرایند پایه اتفاق می‌افتد که باعث ایجاد کانال در زیرلایه‌های شفاف می‌شود. این دو پدیده عبارتند از کندگی لیزری و برهم‌کنش پلاسمای حاصل از کندگی با زیرلایه‌های شفاف. در نتیجه ویژگی کانال‌های ایجاد شده در زیرلایه‌ها مانند پهنای کانال‌ها و نوع و میزان یون‌های نفوذ یافته داخل کانال‌ها [۴، ۵] به مشخصه‌ها و ساختار زیرلایه‌های شفاف، پارامترهای لیزر، ویژگی‌های نمونه هدف مورد استفاده و همچنین رفتار دینامیکی پلوم پلاسمای قبل از رسیدن به زیرلایه‌ها [۶] وابسته است. در مقاله حاضر علاوه بر بررسی فرایند، تفاوت در تغییرات ایجاد شده در دو زیرلایه متفاوت بررسی شده است.

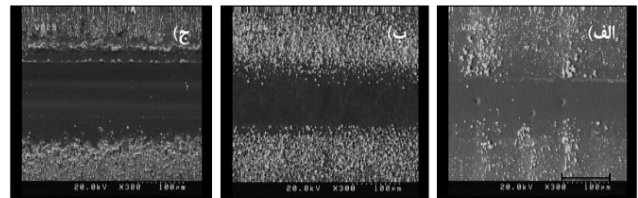
۲. چیدمان آزمایش

شکل ۱ طرحی از چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. لام شیشه‌ای و کوارتز به‌عنوان زیرلایه استفاده شده‌اند. ترکیب مولی

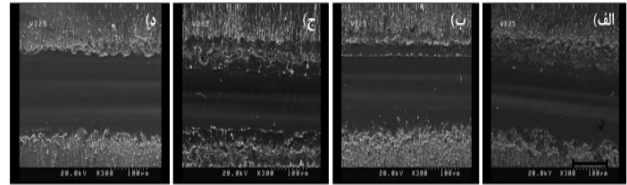
1. Laser Backwriting Process



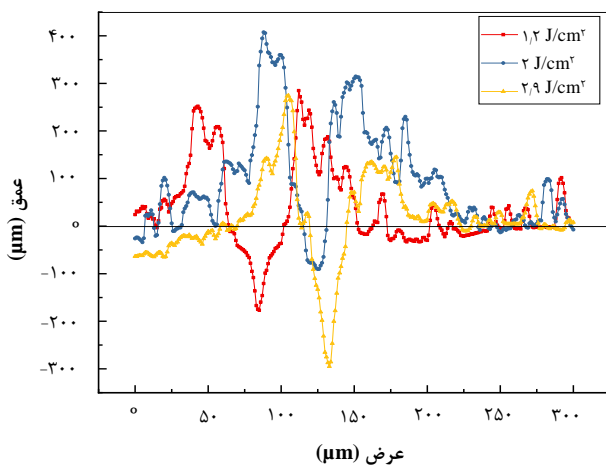
انرژی و سرعت آن‌ها هنگام برخورد با سطح کوارتز کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، در لحظه‌ی شروع پلازما دارای بیشترین دما است و در نتیجه ذرات پلازما دارای بیشینه سرعت و انرژی هستند. با گذشت زمان دمای پلازما به شکل نمایی کاهش پیدا کرده و از این رو سرعت و انرژی یون‌ها کاهش می‌یابد؛ بنابراین هنگامی که یون‌ها به سطح کوارتز می‌رسند، انرژی آن‌ها به میزان زیادی کاهش یافته است. فرایند کندوپاش به میزان زیادی به سرعت یون‌های برخوردی بستگی دارد. در سرعت‌های پایین، فرایند کندگی از سطح کوارتز به میزان کم‌تری اتفاق می‌افتد و در سرعت‌های بالا میزان کندگی افزایش پیدا می‌کند [۵].



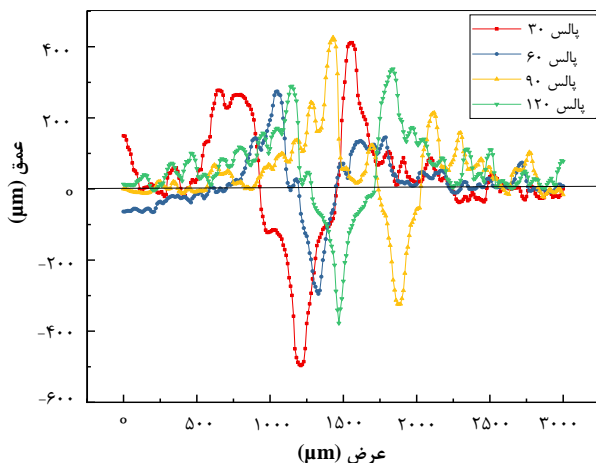
شکل ۲. تصاویر SEM از کندگی ایجاد شده بر روی کوارتز با ۶۰ پالس، نرخ تکرار ۱ Hz و شاریدگی (الف) 1.2 J/cm^2 ، (ب) 2 J/cm^2 ، (ج) 2.9 J/cm^2 .



شکل ۳. تصاویر SEM از کندگی ایجاد شده بر روی کوارتز با نرخ تکرار ۱ Hz، شاریدگی 2.9 J/cm^2 و (الف) ۳۰، (ب) ۶۰، (ج) ۹۰ و (د) ۱۲۰ پالس.



شکل ۴. نمودار نمایه سطحی از سطح کوارتز پردازش شده با نرخ تکرار ثابت ۱ Hz، تعداد پالس ثابت ۶۰ پالس و شاریدگی‌های مختلف.



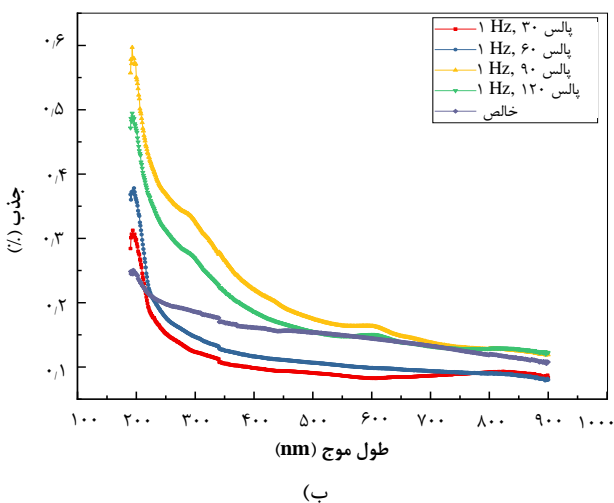
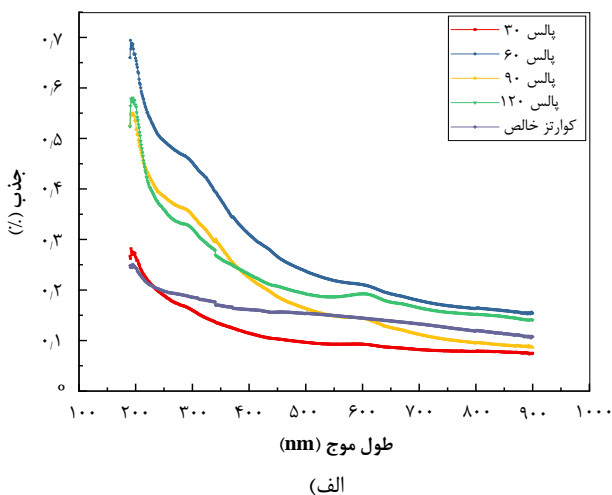
شکل ۵. نمودار نمایه سطحی از سطح کوارتز پردازش شده با نرخ تکرار ثابت ۱ Hz و شاریدگی ثابت 2.9 J/cm^2 و تعداد پالس‌های مختلف.

پلوم در فضای فلز و کوارتز طی یک فرایند دینامیکی گسترش می‌یابد و گرمای مرکز آن باعث پرتاب ذرات به سمت اطراف می‌شود. به دلیل این‌که پرتو لیزر گاوسی است، بیشترین انرژی لیزر در مرکز پرتو است و دمای پلازما کنده شده در مرکز بیشتر خواهد بود؛ این دما و فشار مرکز پلوم باعث پرتاب مواد پلوم به سمت اطراف شده و پلوم گسترش می‌یابد. شکل‌های ۴ و ۵ نمودار پروفایل کانال‌های ایجاد شده تحت شرایط مختلف تابش‌دهی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل‌ها دیده می‌شود، مواد پرتاب‌شده از پلازما به سمت کوارتز به‌عنوان مواد باقی‌مانده که طی فرایند کندوپاش و یا دیگر فرایندها ایجاد می‌شوند، یک محدوده ناصاف بالای سطح صیقل داده شده کوارتز ایجاد می‌کنند که دقیقاً در اطراف کانال قرار می‌گیرند؛ بنابراین در اطراف هر کانال، دو قله شامل مواد ته‌نشین شده مشاهده می‌شود. برای تعیین عمق کانال، عمق فاصله بین نقطه ارتفاع صفر و بیشترین عدد به‌دست آمده برای ارتفاع منفی در نظر گرفته شده است. عمق در واقع برد یون‌هایی که باعث ایجاد فرایند کندوپاش شده‌اند را نشان می‌دهد [۴]. در تعداد ۶۰ پالس و نرخ تکرار ۱ Hz، میزان عمق برای کانالی با شاریدگی 2.9 J/cm^2 بزرگ‌تر از کانالی 1.2 J/cm^2 و کانالی با شاریدگی 1.2 J/cm^2 بزرگ‌تر از کانالی با شاریدگی 2 J/cm^2 است. دلیل این امر را می‌توان چنین بیان کرد که با افزایش شاریدگی از 1.2 J/cm^2 به 2 J/cm^2 به دلیل افزایش دز انرژی رسیده به سطح، کندگی از سطح فلز افزایش می‌یابد. با افزایش عمق کندگی از سطح فلز به دلیل این‌که یون‌ها از فاصله دورتری نسبت به کوارتز، از سطح کنده شده‌اند،



زیرلایه‌ها آهن، کروم، نیکل، منگنر، سیلیسیم و گوگرد باشد. قله‌های موجود در طول موج‌های ۲۹۱ nm و ۶۱۰ nm طیف کوارتز مربوط به پلاسمون‌های ایجاد شده به ترتیب ناشی از حضور فلزات آهن [۷] و کروم [۸] در استیل است. جابه‌جایی پلاسمونی موجود در کروم مربوط به تغییرات ضریب شکست محیط اطراف آن به علت وجود آهن است [۹]. کندگی لیزری استیل (یا هر فلز دیگر) باعث ایجاد پلاسمای می‌شود. این پلاسمای حاوی ذرات باردار شامل یون‌ها و الکترون‌های آزاد است که امکان ایجاد پلاسمون را فراهم می‌کنند. تعدادی از این ذرات با توجه به انرژی و سرعت خود به داخل کوارتز نفوذ می‌کنند. تعداد ذرات کنده شده به پارامترهای لیزر بستگی دارد. همچنین میزان نفوذ پلاسمای به داخل کوارتز تحت تأثیر نیروی جاذبه و دافعه بین ذرات باردار پلاسمای خواهد بود. افزون بر این، با افزایش تعداد پالس، علاوه بر افزایش تعداد ذرات کنده شده، عمق کندگی روی هدف (استیل) افزایش یافته و در نتیجه فاصله پلوم پلاسمای از زیرلایه بیشتر می‌شود. بنابراین پارامترهای مختلفی در فرایند نفوذ به داخل کوارتز مؤثر هستند.



شکل ۶. طیف جذبی سطح کوارتز پردازش شده با شاریدگی الف) 2 J/cm^2 ب) 2.9 J/cm^2 و نرخ تکرار 1 Hz .

با افزایش شاریدگی از 2 J/cm^2 به 2.9 J/cm^2 میزان کندگی بیشتر می‌شود. بعد از شاریدگی 2 J/cm^2 پدیده پوشاندگی پلاسمایی مانع از رسیدن تمام پهنای پالس لیزر به سطح و در نتیجه کندگی می‌شود. از طرفی با شروع فرایند پوشش پلاسمایی انرژی لیزر توسط پلوم جذب شده و در نتیجه انرژی ذرات پلوم افزایش می‌یابد [۶]. پس ذرات پلوم با انرژی بیشتری به سطح کوارتز برخورد کرده و باعث افزایش کندوپاش و عمق کانال می‌شود. با افزایش تعداد پالس، دز انرژی ورودی به نمونه هدف افزایش یافته و کندگی افزایش می‌یابد. اما حجم کندگی و انرژی یون‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد که در شرایط مختلف این آزمایش، این عوامل با یکدیگر رقابت داشته و در نهایت یکی از عوامل غالب خواهد بود. در ۳۰ پالس، به دلیل عمق کم‌تر کندگی از سطح استیل بعد از تعداد پالس مشخص، یون‌های کنده شده از استیل در فاصله کمی نسبت به کوارتز قرار دارند، در نتیجه با وجود حجم پایین پلاسمای انرژی یون‌ها هنگام برخورد به کوارتز بسیار زیاد است و همین باعث شده در این شرایط تابش دهی، بیش‌ترین میزان کندوپاش از سطح کوارتز اتفاق افتد و بیش‌ترین عمق کانال قابل مشاهده باشد. در ۶۰ پالس، حجم پلوم افزایش می‌یابد اما به دلیل فاصله زیاد پلوم از کوارتز، ذرات هنگام برخورد به کوارتز دارای انرژی پایین‌تری بوده و میزان کندوپاش کاهش می‌یابد. در ۹۰ و ۱۲۰ پالس با وجود افزایش تعداد پالس، به دلیل پوشش پلاسمایی میزان کندگی از استیل، برهم‌کنش پلوم با کوارتز و کندوپاش کاهش می‌یابد.

۲.۱.۳ نتایج طیف‌سنجی جهت تعیین اثر تعداد پالس بر میزان نفوذ یون‌ها در کوارتز و در نرخ تکرار 1 Hz

برای بررسی اولیه نوع و میزان نفوذ یون‌ها در زیرلایه، طیف جذبی نمونه‌ها با طیف‌سنجی UV-Vis مورد مطالعه قرار گرفت. شکل‌های الف و ب نمودار طیف جذبی نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهند.

همان‌طور که از شکل مشخص است، در نمونه‌های مربوط به ۶۰ پالس و بیش‌تر، دو قله جذبی وجود دارد. برای مشخص کردن علت ایجاد این قله‌ها، دانستن ترکیبات موجود در استیل ضروری است. به منظور شناسایی عناصر موجود در استیل مورد نظر و به دنبال آن شناسایی عناصر موجود در میکروکانال‌ها که باعث ایجاد قله‌های جذبی در نمودارها شده است، از آنالیز پرتو ایکس^۱ (XRF) استفاده شده است. آنالیز پرتو ایکس نمونه استیل مورد استفاده شامل 68.83% آلیاژ آهن، 18.67% کروم، 8.92% نیکل، 1.32% منگنر، 1.30% سیلیسیم و 0.58% گوگرد است. بنابراین قابل انتظار است که یون‌های نفوذ یافته در

1. X-Ray Fluorescence Spectroscopy



جدول ۱. آنالیز EDX از لایه‌های کانال‌های کوارتز با ۱ Hz

شایدگی	ترکیبات			
	%Fe	%Cr	%Si	%O
۱۲ J/cm ^۲ (۶۰ پالس)	۲۵,۲	۶,۴	۶۳,۳	۵,۱
۲ J/cm ^۲ (۶۰ پالس)	۵۵	۱۰,۶	۳۱,۹	۲,۵
۲,۹ J/cm ^۲ (۶۰ پالس)	۲۳,۳	۵,۶	۶۵,۵	۵,۶
۳۰ پالس (۱ Hz)	۲۵,۸	۶	۶۳,۵	۴,۷
۶۰ پالس (۱ Hz)	۲۳,۳	۵,۶	۶۵,۵	۵,۶
۹۰ پالس (۱ Hz)	۱۱,۱	۳,۳	۷۸,۶	۶,۹
۱۲۰ پالس (۱ Hz)	۱۲,۲	۳,۶	۷۸,۱	۶,۲

همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است، آهن و کروم، که در استیل نیز به میزان بیش‌تری حضور دارند، در اطراف کانال مشاهده می‌شود. در بین عناصر استیل، تنها آهن و کروم از سطح آن کنده شده و به کوارتز برخورد کرده‌اند که با توجه به این‌که میزان آهن در استیل بیش‌تر است، در کوارتز نیز درصد آهن نفوذ یافته بیش‌تر است.

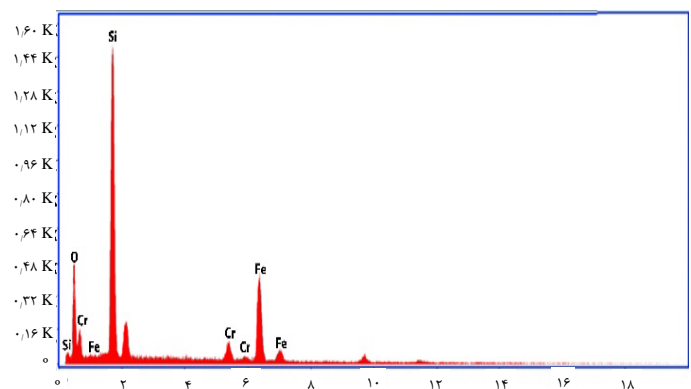
۲.۳ اثر نرخ تکرار

شکل ۸ تصاویر SEM از سطح کوارتز پردازش‌شده با نرخ تکرار ۱۰ Hz، شایستگی ۲,۹ J/cm^۲ و تعداد پالس‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شکل ۹، در ۳۰ پالس کم‌ترین عمق کانال و با توجه به نتایج SEM، کم‌ترین میزان ذرات در اطراف کانال وجود دارد. با این حال با توجه به نتایج طیف‌سنجی، بیش‌ترین میزان جذب در ۳۰ پالس است. بنابراین بیش‌تر ذراتی که از استیل به کوارتز برخورد کرده‌اند، به سطح زیر کوارتز نفوذ کرده و پلاسمون‌های سطحی ایجاد کرده‌اند.

شکل ۹ نمایه سطح کانال‌های ایجاد شده روی کوارتز با شایستگی ۲,۹ J/cm^۲ و نرخ تکرار ۱۰ Hz را نشان می‌دهد. در شکل ۹ با افزایش تعداد پالس از ۳۰ به ۹۰، عمق کانال افزایش یافته و با افزایش از ۹۰ به ۱۲۰ پالس، کاهش پیدا کرده است. در این شرایط آزمایش به نظر می‌رسد بعد از ۳۰ پالس پدیده پوشاندگی پلاسمایی اتفاق افتاده است و در نتیجه در ۶۰ پالس، با وجود این‌که یون‌ها از فاصله دورتری نسبت به ۳۰ پالس به سطح کوارتز برخورد کرده‌اند، انتظار می‌رود با کاهش انرژی یون‌ها فرایند کندوپاش در سطح کوارتز کاهش یابد. اما به دلیل این‌که در پدیده پوشاندگی انرژی لیزر توسط پلوم جذب شده ذرات با انرژی بیش‌تری به کوارتز برخورد کرده و در نتیجه کندوپاش از کوارتز افزایش یافته است. پس در ۹۰ پالس هم تعداد یون رسیده به سطح کوارتز افزایش یافته و هم پدیده پوشاندگی پلاسمایی باعث بیش‌تر شدن انرژی یون‌ها

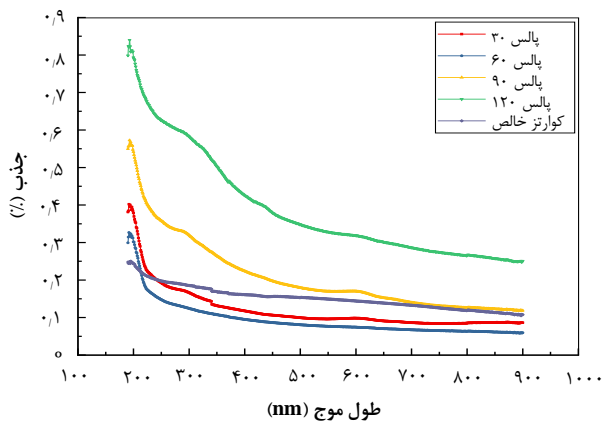
در شکل ۶ الف، با افزایش تعداد پالس از ۳۰ به ۶۰، افزایش در میزان جذب و سپس با افزایش از ۶۰ به ۱۲۰، کاهش در میزان جذب مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در ۶۰ پالس که بیش‌ترین میزان جذب اتفاق افتاده، پلاسمون‌های سطحی شکل گرفته و در ۹۰ و ۱۲۰ پالس نیز، هنوز پلاسمون‌های سطحی وجود دارد. درحالی‌که در ۳۰ پالس که جذب کم‌ترین میزان خود را داشته است، پلاسمون‌های سطحی شکل نگرفته‌اند. در شکل ب با افزایش تعداد پالس از ۳۰ به ۹۰، افزایش در میزان جذب و با افزایش تعداد پالس از ۹۰ به ۱۲۰، کاهش در میزان جذب مشاهده می‌شود. مطابق شکل در این نمودار نیز در تعداد پالس‌های ۹۰ و ۱۲۰، که بیش‌ترین میزان جذب شکل گرفته، پلاسمون‌های سطحی ایجاد شده‌اند. قله جذبی کروم در طول موج حدود ۵۰۰ nm است، اما همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، پلاسمون‌های کروم در حدود ۶۰۰ nm دارای قله می‌باشند. با توجه به این‌که با افزایش ضریب شکست و افزایش زبری محیط اطراف پلاسمون‌های سطحی، قله پلاسمون جابه‌جایی فرکانسی قرمز پیدا می‌کند [۱۰]، در نمونه‌های ایجاد شده به دلیل این‌که در محیط اطراف کروم، یون‌های آهن به میزان زیادی وجود داشته، باعث افزایش ضریب شکست و زبری اطراف کروم شده است و شیفت فرکانسی برای کروم مشاهده می‌شود. برای بررسی ذرات کنده شده از فلز و عناصر موجود روی زیرلایه، به ویژه لایه‌های کانال‌های ایجاد شده، علاوه بر طیف‌سنجی از EDX استفاده شده است. شکل ۷ نمونه‌ای از طیف ذرات ته‌نشین شده را نشان می‌دهد.

در طیف موجود چهار عنصر O, Si, Cr, Fe مشاهده می‌شود. این نتیجه برای تمام طیف‌ها مشاهده شده است. به‌منظور بررسی تفاوت میزان ذرات کنده شده از هدف و ته‌نشین شده روی زیرلایه، شدت عناصر مختلف در جدول ۱ گزارش شده است.

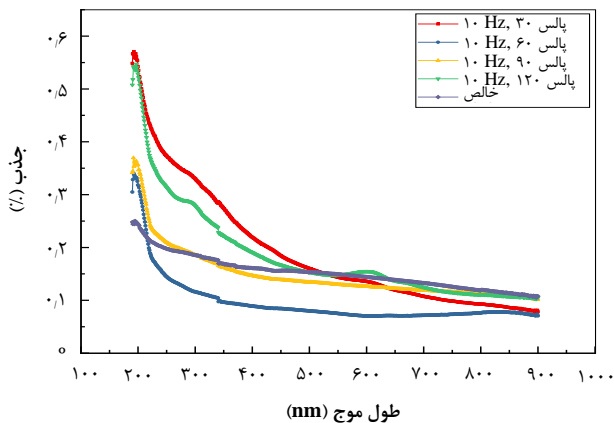


شکل ۷. نمودار EDX از سطح کوارتز پردازش‌شده با نرخ تکرار ۱ Hz، شایستگی ۲,۹ J/cm^۲ و ۶۰ پالس.





الف



ب

شکل ۱۰. نمودار طیف جذبی سطح کوارتز پردازش‌شده با شاریدگی (الف) 2 J/cm^2 (ب) $2/9 \text{ J/cm}^2$ و نرخ تکرار 10 Hz .

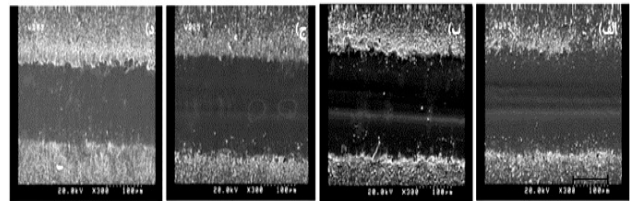
جدول ۲ شدت عناصر ته‌نشین‌شده روی کوارتز در نرخ تکرار 10 Hz و شاریدگی $2/9 \text{ J/cm}^2$ در تعداد پالس متفاوت را نشان می‌دهد. با افزایش از ۶۰ به ۹۰ پالس فرایند کندوپاش افزایش یافته و هم‌چنین طبق نتایج پروفایل‌سنجی در ۹۰ پالس بیش‌ترین عمق کانال مشاهده می‌شود. طبق نتایج طیف‌سنجی، میزان جذب در ۹۰ پالس نسبت به ۶۰ پالس افزایش داشته است. با افزایش تعداد پالس از ۹۰ به ۱۲۰ پالس، میزان یون‌هایی که در فرایند کندوپاش شرکت کرده‌اند به میزان اندکی کاهش یافته است.

۳.۳ زیرلایه شیشه

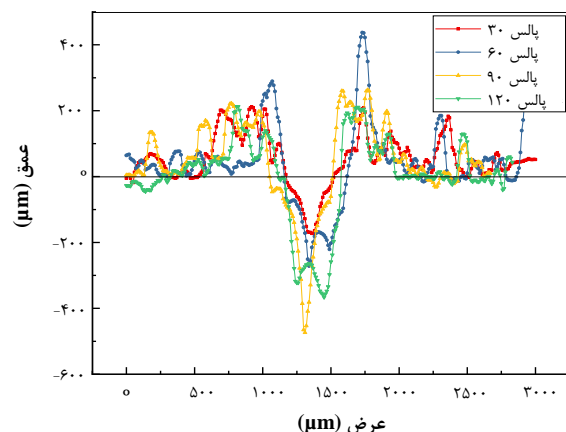
۱.۳.۳ بررسی اثر شاریدگی و تعداد پالس بر عمق و پهنای کانال‌های ایجاد شده روی شیشه
شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تصاویر کانال بر روی شیشه با نرخ تکرار 1 Hz و تحت شرایط مختلف تابش‌دهی را نشان می‌دهند.

شده در نتیجه عمق کندوپاش از کوارتز افزایش یافته است. در ۱۲۰ با افزایش عمق، تعدادی از ذرات کنده شده به دلیل انرژی پایین قادر به رسیدن به سطح زیرلایه نبوده و نیز پوشاندگی پلاسما افزایش بیش‌تری یافته و مانع رسیدن پرتو به فلز و کندگی بیش‌تر می‌شود پس انرژی یون‌ها کاهش یافته و باعث کم‌تر شدن کندوپاش در ۱۲۰ پالس شده است.

در شکل ۱۰ الف با افزایش از ۳۰ به ۶۰ پالس، کاهش در جذب و با افزایش از ۶۰ به ۱۲۰ پالس، افزایش در جذب مشاهده می‌شود. در این نمودار فقط در تعداد پالسی که کم‌ترین میزان جذب وجود دارد، پلاسمون‌های سطحی شکل نگرفته‌اند و در بقیه تعداد پالس‌ها پلاسمون‌ها قابل مشاهده هستند. در نمودار شکل ۱۰ ب با افزایش از ۳۰ به ۶۰ پالس کاهش جذب و از ۶۰ به ۱۲۰ پالس افزایش در میزان جذب مشاهده می‌شود. در این نمودار در تعداد ۳۰ پالس که بیش‌ترین میزان جذب اتفاق افتاده است، پلاسمون‌ها قابل مشاهده هستند. در ۶۰ و ۹۰ پالس که کم‌ترین میزان جذب اتفاق افتاده است، پلاسمون‌ها وجود نداشته و در تعداد ۱۲۰ پالس دوباره پلاسمون‌های سطحی مشاهده می‌شوند.



شکل ۸. تصاویر SEM از نمونه‌ی ایجاد شده بر روی کوارتز با نرخ تکرار 10 Hz ، شاریدگی $2/9 \text{ J/cm}^2$ (الف) ۳۰، (ب) ۶۰، (ج) ۹۰ و (د) ۱۲۰ پالس.



شکل ۹. نمودار نمایه سطحی از سطح کوارتز پردازش‌شده با نرخ تکرار ثابت 10 Hz و شاریدگی ثابت $2/9 \text{ J/cm}^2$.

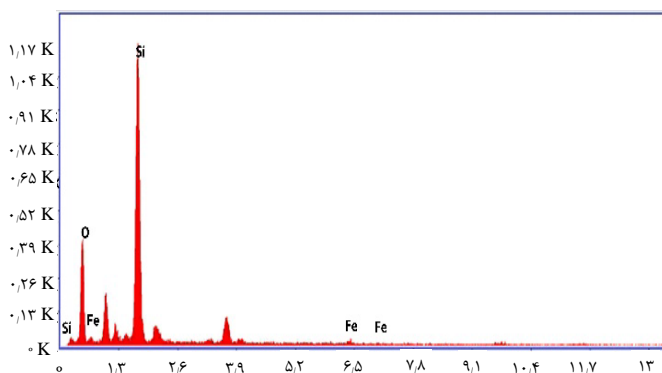


جدول ۳. آنالیز EDX از لبه‌های کانال‌های شیشه با ۱ Hz

ترکیبات			شاریدگی
% O	% Si	% Fe	
۱۵٫۵	۶۷٫۳	۱۷٫۲	$۱٫۲ \text{ J/cm}^2$ (۶۰ پالس)
۹٫۹	۳۹٫۵	۵۰٫۵	۲ J/cm^2 (۶۰ پالس)
۳۲٫۱	۵۲٫۰	۱۵٫۹	$۲٫۹ \text{ J/cm}^2$ (۶۰ پالس)
۴۰٫۲	۵۷٫۱	۲٫۷	۳۰ پالس (۱ Hz)
۳۲٫۱	۵۲٫۰	۱۵٫۹	۶۰ پالس (۱ Hz)
۲۴٫۱	۶۰٫۸	۱۵٫۲	۹۰ پالس (۱ Hz)
۱۱٫۵	۲۷٫۸	۶۰٫۷	۱۲۰ پالس (۱ Hz)

جدول ۲. آنالیز EDX از لبه‌های کانال‌های کوارتز با ۱۰ Hz

ترکیبات				شاریدگی
% O	% Si	% Cr	% Fe	
۵٫۸	۷۶٫۵	۳٫۹	۵٫۶	۳۰ پالس (۱۰ Hz)
۵٫۱	۵۹٫۷	۶٫۵	۵۷٫۴	۶۰ پالس (۱۰ Hz)
۴٫۵	۵۷	۶٫۹	۶٫۸	۹۰ پالس (۱۰ Hz)
۶٫۲	۷۸٫۱	۳٫۶	۳۰٫۲	۱۲۰ پالس (۱۰ Hz)

شکل ۱۳. نمودار EDX و درصد عناصر موجود در اطراف کانال ایجاد شده بر روی شیشه با نرخ تکرار ۱ Hz، ۶۰ پالس و شاریدگی $۲٫۹ \text{ J/cm}^2$.

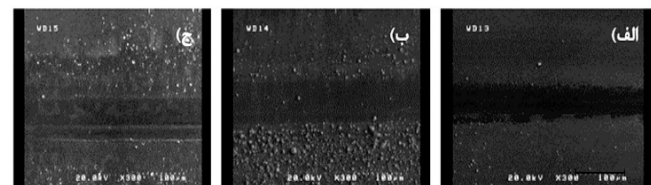
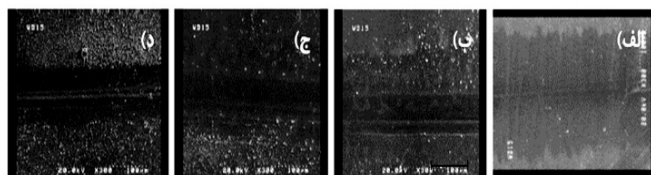
۲.۳.۳ مشاهدات طیف‌سنجی جهت تعیین اثر تعداد پالس بر میزان نفوذ یون‌ها در شیشه و در نرخ تکرار ۱ Hz

شکل ۱۴ طیف سطح شیشه پردازش‌شده در تعداد پالس و شاریدگی‌های مختلف و در نرخ تکرار ۱ Hz را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشخص است طیف شیشه خام در ناحیه مرئی دارای جذب نمی‌باشد ولی در ناحیه فرابنفش جذب بالایی دارد، به‌طوری‌که برای طول موج‌های کم‌تر از ۳۰۰ nm به اشباع رسیده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، در تمامی نمونه‌های تابش دیده، قله جذبی در طول موج ۲۹۱ nm مربوط به یون‌های آهن وجود دارد [۱۱]. هم‌چنین در شاریدگی و پالس‌های مختلف، طیف‌ها تقریباً بر یک‌دیگر منطبق هستند. این پدیده با توجه به بالا بودن شدت جذب در شیشه، نشان‌دهنده به اشباع رسیدن فرایند نفوذ است. این نتیجه برای تمام شاریدگی‌های مورد آزمایش برقرار است.

۴.۳ اثر نرخ تکرار

در شکل ۱۵ تصاویر SEM مربوط به کانال‌های ایجاد شده روی شیشه با نرخ تکرار ۱۰ Hz و شاریدگی $۲٫۹ \text{ J/cm}^2$ و تعداد

شکل ۱۱. تصاویر SEM از سطح شیشه پردازش‌شده با نرخ تکرار ۱ Hz، ۶۰ پالس و شاریدگی الف) $۱٫۲ \text{ J/cm}^2$ ، ب) ۲ J/cm^2 و ج) $۲٫۹ \text{ J/cm}^2$.شکل ۱۲. تصاویر SEM از سطح شیشه پردازش‌شده با نرخ تکرار ۱ Hz، شاریدگی الف) $۲٫۹ \text{ J/cm}^2$ و الف) ۳۰، ب) ۶۰، ج) ۹۰ و د) ۱۲۰ پالس.

همان‌طور که از تصاویر SEM مشخص است، در ۳۰ پالس، نرخ تکرار ۱ Hz و شاریدگی $۲٫۹ \text{ J/cm}^2$ میزان یون‌هایی که در فرایند کندوپاش شرکت کرده‌اند، بسیار ناچیز است. با افزایش تعداد پالس از ۳۰ به ۶۰، میزان یون‌های اطراف کانال افزایش می‌یابد. هم‌چنین از جدول ۳ مشخص است که در شاریدگی ۲ J/cm^2 بیش‌ترین میزان جذب یون در اطراف کانال قابل مشاهده است و با توجه به نمودارهای طیف جذبی مربوط به شیشه که در ادامه گزارش شده، این نتیجه تأیید می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت در شاریدگی ۲ J/cm^2 بیش‌ترین میزان کندی از استیل اتفاق افتاده است که هم در شیشه و هم در کوارتز در این شاریدگی میزان جذب یون به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. به‌نظر می‌رسد در شاریدگی ۲ J/cm^2 بیش‌ترین حجم پلاسما و انرژی ذرات وجود داشته است. با افزایش تعداد پالس از ۶۰ به ۹۰ تقریباً میزان یون‌های اطراف کانال ثابت بوده و تغییر قابل ملاحظه‌ای وجود ندارد. در ۱۲۰ پالس، بیش‌ترین میزان یون در اطراف کانال قابل مشاهده است.

شکل ۱۳ نمودار نوعی EDX از عناصر موجود در اطراف کانال ایجاد شده بر روی شیشه با نرخ تکرار ۱ Hz، ۶۰ پالس و شاریدگی $۲٫۹ \text{ J/cm}^2$ را نشان می‌دهد.



جدول ۴. آنالیز EDX از لبه‌های کانال‌های شیشه شاردیگی 2.9 J/cm^2 و نرخ تکرار با 10 Hz

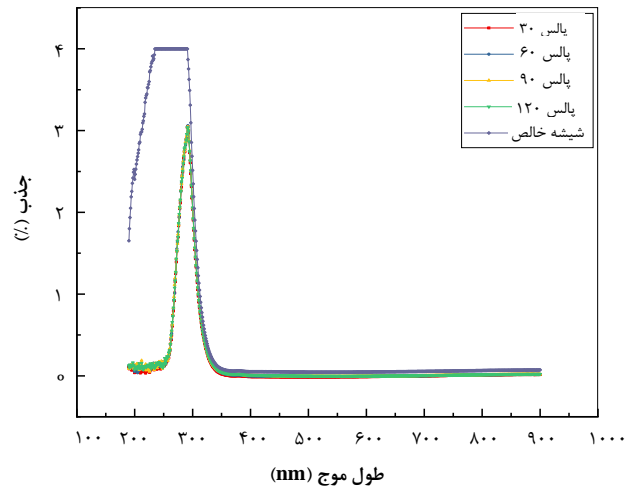
ترکیبات			شاردیگی
%Fe	%Si	%O	
۹.۵	۷۰.۶	۱۹.۹	۳۰ پالس (۱۰ Hz)
۱۵.۲	۶۱	۲۳.۸	۶۰ پالس (۱۰ Hz)
۱۶.۱	۵۳.۲	۳۰.۷	۹۰ پالس (۱۰ Hz)
۳۴.۲	۳۵.۷	۳۰.۱	۱۲۰ پالس (۱۰ Hz)

۴. بحث و مقایسه نتایج در شیشه و کوارتز

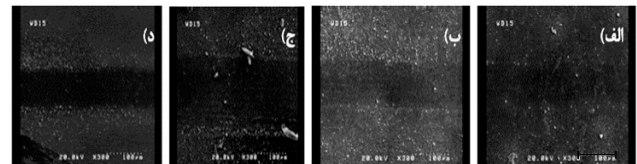
در لیزرهای نانوئانیه فرایند کندگی از فلز با تغییر فاز از حالت جامد به مایع، از مایع به بخار و در صورت بالا بودن شار لیزری، از فاز بخار به پلاسما صورت می‌پذیرد. فرایند کندگی وابسته به ویژگی‌های اپتیکی و حرارتی فلز و پارامترهای لیزر است. قسمتی از انرژی لیزر که جذب سطح شده صرف تبخیر ماده می‌شود و بخشی از آن از طریق رسانش گرمایی در ماده انتشار می‌یابد. وابستگی عمق حفره ایجاد شده به شاردیگی از طریق تقسیم انرژی بین فازهای جامد و گاز تعیین می‌شود. سازوکار خروج جرم از حفره نیز به شاردیگی لیزر وابسته است [۱۲]. در فلز استیل گرمای نهان تبخیر نسبت به گرمای نهان ذوب بیشتر است در نتیجه هنگامی که پالس لیزری به استیل می‌تابد، با گذشت زمان اختلاف فاز مایع-جامد کم و اختلاف فاز مایع-بخار زیاد می‌شود. در نتیجه در یک نقطه مشخص شرایط به گونه‌ای خواهد بود که ضخامت بین فاز بخار و مایع بسیار کم شده و به صفر میل می‌کند. در این لحظه چون ماده مذاب بسیار کم است، سطح نیازمند میزان کمی افزایش انرژی است تا دوباره ضخامت فاز مایع و بخار زیاد شده و فرایند تولید پلاسما با انرژی کمی بیش‌تر ادامه پیدا کند. انتظار می‌رود میزان تولید پلاسما در لحظه اول کم باشد و سپس با گذشت زمان، پلاسما بیش‌تری تولید شده و در لحظات بعدی به شکل نمایی کاهش یابد. این روند یک روند افزایش-کاهشی تکرارپذیر است. شکل ۱۷ نمودار انرژی لیزر که بر حسب زمان در پلوم قرار گرفته است را نشان می‌دهد. با افزایش شاردیگی در هر لحظه، انرژی پلوم افزایش پیدا کرده است. با گذشت زمان، انرژی پلوم کاهش پیدا کرده و بعد از چند نانوئانیه، افزایش کوچکی در انرژی مشاهده می‌شود و تکرار این روند قابل مشاهده است.

پالس مختلف و در جدول ۴ آنالیز EDX از لبه‌های کانال مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است، با افزایش نرخ تکرار نیز میزان یون‌های موجود در اطراف کانال بسیار ناچیز است.

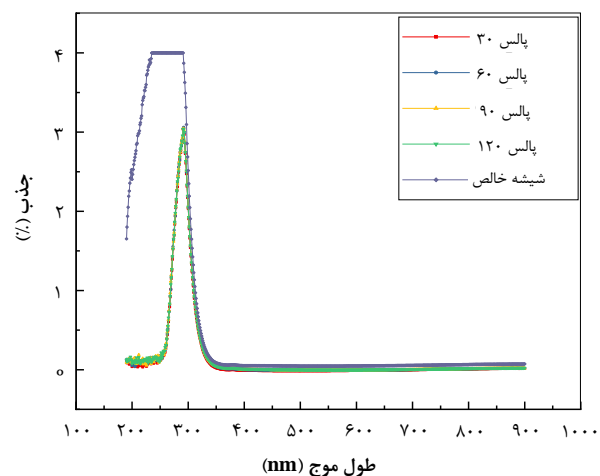
همان‌طور که از شکل ۱۶ مشخص است، در نرخ تکرار 10 Hz نیز همانند نرخ تکرار 1 Hz ، نمودارها در شاردیگی و پالس‌های مختلف بر یک‌دیگر منطبق هستند.



شکل ۱۴. نمودار طیف جذبی سطح شیشه پردازش‌شده با شاردیگی 2.9 J/cm^2 و نرخ تکرار 10 Hz .



شکل ۱۵. تصاویر SEM از سطح شیشه پردازش‌شده با نرخ تکرار 10 Hz و شاردیگی 2.9 J/cm^2 و (الف) ۳۰، (ب) ۶۰، (ج) ۹۰ و (د) ۱۲۰ پالس.



شکل ۱۶. نمودار طیف جذبی سطح شیشه پردازش‌شده با شاردیگی 2.9 J/cm^2 و نرخ تکرار 10 Hz .



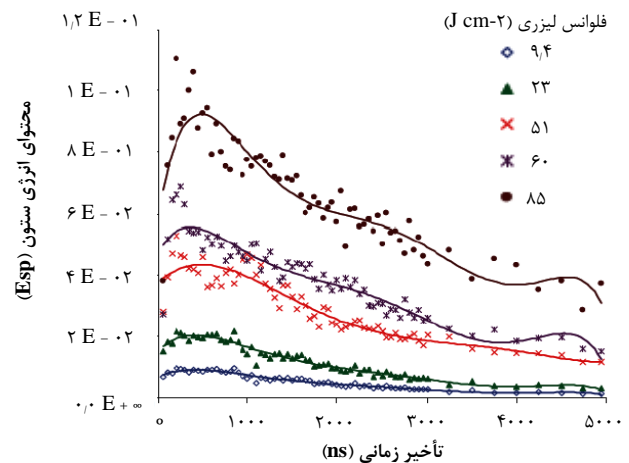
به یون‌های کروم باعث دفع آن‌ها می‌شوند؛ در نتیجه به یون‌های کروم اجازه قرارگیری در زیرلایه شیشه را نمی‌دهند. درحالی‌که در کوارتز به دلیل کندگی بیشتر پلوم فاصله بیشتری را طی می‌کند و در نتیجه بیشتر در فضا گسترش پیدا می‌کند. طی این گسترده‌گی ذرات پلوم از هم دورتر می‌شوند و نیروی دافعه بین یون‌های آهن و کروم کاهش می‌یابد. بنابراین هر دو یون به سطح کوارتز رسیده و در آن نفوذ می‌کنند.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرایند LBW روی شیشه و کوارتز در شرایط یکسان آزمایش و پارامترهای مختلف لیزر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از ایجاد میکروکانال‌ها در زیرلایه‌ها با قابلیت کنترل ابعاد و حضور نانوذرات در اطراف آن‌هاست. در زیرلایه کوارتز پلاسماهای Fe و Cr و در زیرلایه شیشه ذرات Fe قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهند پهنای محدوده تحت تأثیر پلوم پلاسما در زیرلایه‌ها (پهنای کانال‌های ایجاد شده در زیرلایه‌ها) و نوع یون‌های نفوذیافته در آن‌ها به ویژگی‌های حرارتی فلز، پارامترهای لیزر و رفتار دینامیکی پلوم پلاسما قبل از برخورد با زیرلایه وابسته است.

مراجع

1. C. Gómez-Reino, *Laser backwriting process on glass via ablation of metal targets*, *Opt. Commun.*, **273** (1), 193–199 (2007).
2. R. Rangel-Rojo, et al, *Waveguide formation by laser backwriting ablation of metals unto glass substrates*, *AIP Conf. Proc.*, **992**, 231–236 (2008).
3. C.I. López-Gascón, et al, *Refractive index modification in glass by laser backwriting ablation of metals*, *Opt. Express*, **14** (19), 8765 (2006).
4. Z.H.A.O. Yunfei, *Glass waveguide fabrication by ion implantation for optical communication applications*, (2000).
5. F.F. Umarov, A.A. Dzhurakhalov, *Ion bombardment-induced surface effects in materials*, *IntechOpen*, 359e391 (2016).
6. J.A. Aguilera, C. Aragon, F. Penalba, *Plasma shielding effect in laser ablation of metallic samples and its influence on LIBS analysis*, *Applied Surface Science*, 309–314 (1998).
7. K. Klačanová, *Formation of Fe (0)-nanoparticles via reduction of Fe (II) compounds by amino acids and their subsequent oxidation to iron oxides*. *Journal of Chemistry*, (2013).



شکل ۱۷. نمودار انرژی پلوم برحسب زمان براساس شاریدگی لیزر [۱۲].

بنابر تحلیل‌های بیان شده منطقی به نظر می‌رسد که با افزایش شاریدگی از 1.2 J/cm^2 به 2 J/cm^2 و از 2 J/cm^2 به 2.9 J/cm^2 ، به دلیل افزایش انرژی وارد شده به استیل و با دور شدن نقطه کندگی از سطح استیل که باعث افزایش زمان حرکت پلاسما در فضا می‌شود، روند افزایشی و کاهش در میزان مواد موجود در اطراف کانال دیده شود. در نتیجه در شاریدگی 2 J/cm^2 بیش‌ترین میزان عناصر در اطراف کانال قرار می‌گیرد.

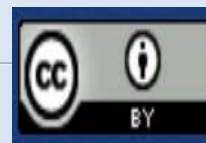
یکی دیگر از تفاوت‌هایی که در زیرلایه‌های شیشه و کوارتز وجود دارد، حضور یون Cr در کانال‌های کوارتز است. در کوارتز یون‌های آهن و کروم نفوذ کرده‌اند و قله پلاسما یون‌های کروم جابه‌جایی پیدا کرده است که دلیل آن تغییر در غلظت ذرات دی‌اکتتریک است [۹]. گرچه زیرلایه شیشه به دلیل دارا بودن ۷۲٪ از SiO_2 در ساختار خود، نسبت به کوارتز بستر مناسب‌تری برای نفوذ مواد به شمار می‌رود، اما یون Cr توانایی نفوذ به شیشه را در این آزمایش نداشته است. بنابراین دلیل این پدیده وابسته به رفتار دینامیکی پلاسما قبل از برخورد با زیرلایه‌ها است. پلاسما شامل یون‌های مثبت Fe و Cr است که از نمونه استیل کنده شده‌اند. یون‌های Fe به دلیل بیشتر بودن وزن خود در محور مرکزی پلوم قرار می‌گیرند و یون‌های Cr به دلیل وزن کم‌تر، در نقاط دورتر از محور مرکزی قرار می‌گیرند. علاوه بر این با توجه به آنالیز XRF از استیل یون‌های Fe درصد بیشتری نسبت به یون‌های Cr دارد و در پلوم باعث دفع یون‌های کروم به سمت اطراف می‌شوند. پلوم قبل از رسیدن به شیشه فرصت کم‌تری برای گسترش در فضا دارد و در نتیجه چگالی آن بسیار بالاست. یون‌های آهن به دلیل نزدیکی بیشتر



8. P.T. Mohite, A.R. Kumar, S.S Zinjarde, *Biotransformation of hexavalent chromium into extracellular chromium (III) oxide nanoparticles using Schwanniomyces occidentalis*, *Biotechnology letters*, **38(3)**, 441-446 (2016).
9. K. Shrivastava, *Localized surface plasmon resonance of silver nanoparticles for sensitive colorimetric detection of chromium in surface water, industrial waste water and vegetable samples*, *Analytical Methods*, **8(9)**, 2088-2096 (2016).
10. V.N. Rai, et al, *Localized surface plasmon resonance (LSPR) and refractive index sensitivity of vacuum evaporated nanostructured gold thin films*, *arXiv preprint arXiv:1406.4605* (2014).
11. M. Balcerzak, A. Tyburska, E.L.B.Ç.W.I.Ê. Cicka-füchsel, *Selective determination of Fe (III) in Fe (II) samples by UV-spectrophotometry with the aid of quercetin and morin*, *Acta Pharm*, **58**, 327-334, (2008).
12. S. Mahmood, et al, *Effects of laser energy fluence on the onset and growth of the Rayleigh – Taylor instabilities and its influence on the topography of the Fe thin film grown in pulsed laser deposition facility* *Effects of laser energy fluence on the onset and growth of the Rayleigh – Taylor instabilities and its influence on the topography of the Fe thin film grown in pulsed laser deposition facility*, *AIP Publishing LLC*, **103504**, (2012).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers. *



استناد به این مقاله

شب‌نم عباسی، داود رزاقی، هدیه پاکیان (۱۴۰۱)، مقایسه فرایند پشته‌نگاری لیزری در زیرلایه‌های شفاف شیشه و کوارتز، ۹۹، ۳۷-۴۶

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.1.5.8

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1348.html

