بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

بررسی هندسه ساختارهای خودبه‌خودی پس از اندرکنش با تپ‌های فوق کوتاه

رضا گودرزی، فرشته حاج اسماعیل‌بیگی، افتخار بستان دوست، اسما معتمدی، حسین رزاقی

پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی

rgodarzi@aeoi.org.ir

چکیده – در این تحقیق هند سه ساختارهای خودبه‌خودی ت شکیل شده روی سطح ویفر سیلیکون پس از اندرکنش با تپ‌های فمتوثانیه بررسی شده است. در شار انرژی نزدیک آستانه کندوسوز، ساختار تشکیل شده مطابق نیمرخ عرضی گوسین لیزر بوده و دایروی ا ست؛ با افزایش انرژی و تعداد تپ، ساختارهای خودبه‌خودی روی سطح ایجاد می شوند که در ابتدا شکل منظمی ندارند. با افزایش بیشتر انرژی و تعداد تپ، رفته رفته ساختارهای خودبه‌خودی اشکال هندسی سه ضلعی و چهار ضلعی به خود می‌گیرند. در نهایت، نشان داده شده که با افزایش انرژی منتقل شده به سطح (چه از طریق تعداد تپ و چه با افزایش شار انرژی تپ‌ها)، هندسه ساختارها از حالت اولیه دایروی به شش وجهی منتظم که پایداری بالایی دارد، تبدیل می‌شود.

کلید واژه- ساختار خودبه‌خودی، سیلیکون، فمتوثانیه، لیزر، هندسه

Investigation of the geometry of spontaneous structures after interaction with ultra-short laser pulses

R. Goodarzi, F. Hajiesmailbaigi, E. Bostandoost, A. Motamedi, H. Razzaghi

Nuclear Science and Technology Research Institute, Photonics and Quantum Technology Research School
rgodarzi@aeoi.org.ir

Abstract- In this research, the geometry of spontaneous structures formed on the surface of the silicon wafer after interaction with femtosecond laser pulses has been investigated. At the energy flux near the ablation threshold, the structure formed is in accordance with the Gaussian profile of the laser and is circular; As the energy and number of pulses increase, spontaneous structures form on the surface that does not initially have a regular shape. As the energy increases and the number of pulses increases, the spontaneous structures gradually take on triangular and quadrilateral geometric shapes. Finally, it is shown that by increasing the energy transferred to the surface (either through the number of pulses or by increasing the energy flux of the beams), the geometry of the structures changes from a circular initial form to a regular hexagon that has high stability.

Keywords: Sspontaneous structure, Silicon, Femtosecond, Laser, Geometry

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

اندرکنش نور با ماده از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده و امروزه با توسعه لیزرهای فمتوثانیه، امکان بررسی اثرات تابش تپ‌های لیزری فوق‌کوتاه با مواد میسر شده است. فیزیک حاکم بر این پدیده‌ها بسیار پیچیده است و شامل فرآیندهای مختلفی مانند گرمایش، ذوب، تبخیر، خروج ذرات، تشکیل پلاسما و انبساط آن می‌باشد به‌طور کلی نتیجه اندرکنش به مشخصات لیزر مانند مدت زمان تپ، انرژی تپ، طول‌موج، نرخ تکرار، همراه با مشخصات هدف و شرایط محیطی بستگی دارد [۱].

از مهم‌ترین کاربردهای اندرکنش تپ‌های لیزری با ماده، میکروماشین‌کاری است. میکروماشین‌کاری فناوری ساخت ریزساختارها است. میکروماشین‌کاری به همراه نانوفناوری نقش مهمی در مینیاتوری کردن ابزارهای مورد استفاده در علوم مختلف ایفا می‌کنند. محصولات بسیاری مانند تیغه‌های مورد استفاده در ماشین‌ها، سوزن‌های آبیاری، تزریق‌کننده‌های سوخت، مدارهای الکترونیکی ظریف، ابزارهای کنترل شاره، ابزارهای پزشکی و ... از میکروماشین کاری بهره می‌برند.

پس از اندرکنش تپ‌های فوق کوتاه با ماده، ساختارهایی به‌صورت خودبه‌خودی روی سطح تشکیل می‌شوند. با انتخاب شرایط اولیه صحیح در اثر اندرکنش لیزر با ماده، می‌توان ساختارهای مورد نظر را روی سطح مهندسی کرد. این ساختارها می‌توانند در علوم و صنایع مختلف به کار گرفته شوند [۲].

یکی از مهم‌ترین کاربردهای ایجاد ساختارهای سطحی، تغییر خواص نوری سیلیکون است که کاربرد اصلی آن در ساخت سلول‌های خورشیدی می‌باشد. تاکنون تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده است اما هنوز هم این فناوری در ابتدای راه قرار دارد و به دلیل پیچیدگی‌های آن، نیازمند مطالعات و بررسی‌های نظری و آزمایشگاهی بیشتری می‌باشد.

در این مقاله به صورت تجربی هندسه ساختارهای خودبه‌خودی تشکیل شده روی سطح پس از اندرکنش با تپ‌های فوق کوتاه با نمونه سیلیکونی بررسی می‌شود؛ همچنین، اثر تغییرات شار انرژی لیزر روی پایداری ساختارها مورد بحث قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

به عنوان هدفی مناسب برای استفاده در سلول‌های خورشیدی، از ویفر سیلیکونی استفاده شد. ویفر سیلیکون مورد استفاده در این مقاله، نوع n دوپ‌شده با فسفر و جهت‌گیری بلوری (۱۱۱) است که قطر آن در حدود ۱۵ سانتی‌متر بوده و در حدود ۵۰۰ میکرومتر ضخامت داشته و یک طرف آن براق شده است. ویفر سیلیکونی قبل از انجام آزمایش‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با محلول استون درون دستگاه اولتراسونیک قرار می‌گیرد. سپس با محلول متانول خیسانده شده و با دستگاه خشک‌کن، خشک می‌شود تا درحد امکان هیچ‌گونه آلودگی روی سطح سیلیکون پیش از اندرکنش با لیزر وجود نداشته باشد.

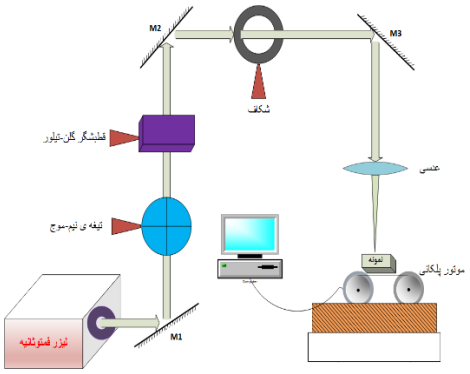
برای تابش دهی نمونه، از یک لیزر پرتوان فمتوثانیه استفاده شده است. این لیزر، تپ‌های فمتوثانیه با استفاده از نوسانگر Ti:sapphire قفل‌شده مدی عدسی کر، پهن‌کننده تپ، پیش تقویت‌کننده، تقویت کننده سه مرحله‌ای CPA و متراکم‌کننده، تولید می‌کند. پهنای زمانی تپ که توسط خودهمبستگر اندازه‌گیری می‌شود، حدوداً ۵۰ فمتوثانیه محاسبه شده است. توزیع انرژی تپ‌ها به صورت گوسی شکل است. نرخ تکرار لیزر مورد استفاده در این مقاله ۱۰ هرتز است.

چیدمان آزمایشگاهی که برای بررسی اثر تپ‌های لیزر فمتوثانیه روی ویفر سیلیکونی استفاده شده، در شکل ۱

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

نشان داده شده است. تابش لیزر در راستای بردار عمود بر سطح می‌باشد. با توجه به این‌که شار انرژی باید در حد یونیزاسیون اتم‌ها باشد، بنابراین لازم است که باریکه لیزر خروجی پیش از تابش به نمونه توسط یک عدسی متمرکز شود تا حداکثر شدت ممکن فراهم شود.

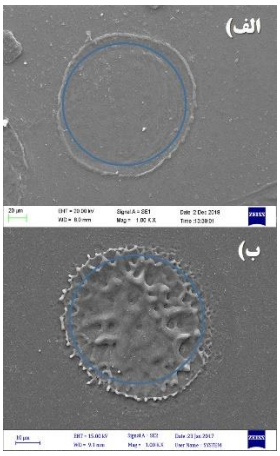
از یک جفت تیغه نیم-موج و قطبش‌گر گلن-تیلور استفاده شده است. با چرخاندن تیغه نیم‌موج، جهت قطبش تپ فمتوثانیه عوض می‌شود و قطبش‌گر تنها اجازه عبور قطبش در جهت خاصی را فراهم می‌کند. در نتیجه با فرض آن‌که قطبش تپ خروجی از لیزر فمتوثانیه در راستای مشخصی باشد، همواره بخشی از انرژی تپ که در راستای قطبش‌گر است، امکان خروج از قطبش‌گر را خواهد داشت. با چرخش تیغه نیم‌موج، جهت قطبش ورودی عوض شده و درنتیجه بخش کم‌تر یا بیشتری از باریکه لیزر می‌تواند عبور کند. به این صورت انرژی تپ فمتوثانیه با چرخش پیوسته تیغه نیم‌موج، تغییر خواهد کرد و درنتیجه می‌توان شار انرژی‌های دلخواه ایجاد کرد.



شکل ۱: چیدمان آزمایش

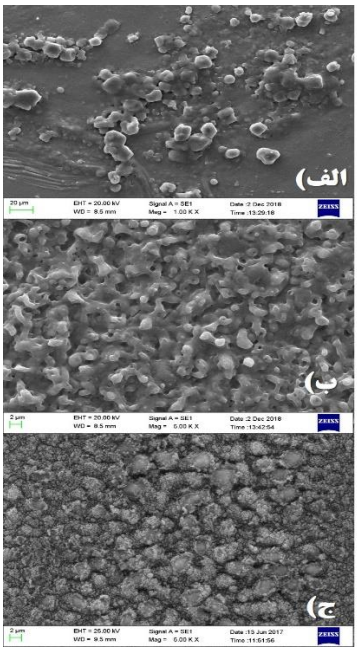
نتایج و بحث

در ابتدا اثر تک تپ با شار انرژی $۰,۳\ J/cm^۲$ با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی بررسی شد. هندسه اثر ایجاد شده دایروی بوده و با افزایش شار انرژی تا $۰,۳۵\ J/cm^۲$ هندسه ثابت مانده اما اثرات کندگی و پاشیدگی قطرات جدا شده روی سطح مشهود است (شکل ۲، الف) و ب)). هندسه ایجاد شده با توزیع انرژی تپ لیزر همبستگی دارد.



شکل ۲: اثر تک تپ فمتوثانیه با شار انرژی الف) ۰,۳ و ب) ۰,۳۵ ژول بر سانتی‌متر مربع

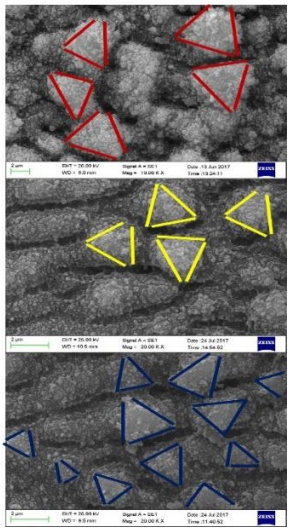
در ادامه، تعداد تپ‌ها به پنج تپ افزایش داده شد و به ترتیب شار انرژی‌های $۰,۳،۰,۳۵،۰,۴\ J/cm^۲$ اعمال شد که تصاویر مربوطه در شکل ۳، الف تا ج نشان داده شده است. با افزایش تعداد و انرژی، رفته رفته ساختارهای منظم خودبه‌خودی در حال شکل‌گیری است که البته نظم مشخصی ندارند.



شکل ۳: اثر پنج تپ فمتوثانیه با شار انرژی الف) ۰,۳ ، ب) ۰,۳۵ و ۰,۴ ژول بر سانتی‌متر مربع

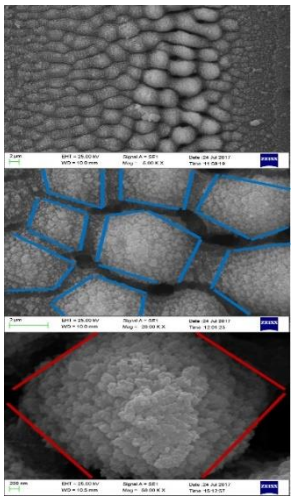
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

با ثابت نگه‌داشتن شار انرژی در J/cm^2 ۰,۴ و افزایش تعداد تپ‌ها به ده عدد، به مرور هندسه مثلثی شکلی در ساختارهای ایجاد شده نمایان می‌شود (شکل ۴).



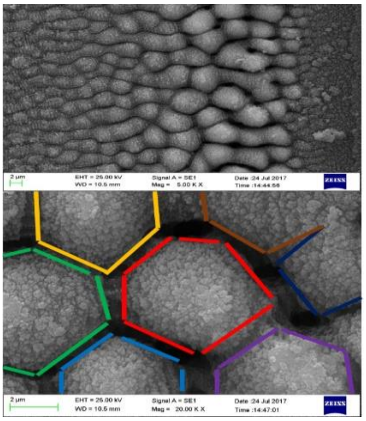
شکل ۴: اثر ده تپ فمتوثانیه با شار انرژی J/cm^2 ۰,۴

با افزایش تعداد تپ به بیست عدد، هندسه ساختارهای ایجاد شده از مثلث به چهار ضلعی تبدیل می‌شود. تغییرات هندسه با افزایش تعداد تپ به دلیل اثر تجمعی انرژی و تلاش سطح برای رسیدن به هندسه پایدار است (شکل ۵).



شکل ۵: اثر بیست تپ فمتوثانیه با شار انرژی J/cm^2 ۰,۴

در ادامه با استفاده از شار انرژی J/cm^2 ۰,۶ و صرفاً افزایش تعداد تپ‌ها به ۵۰ تپ، هندسه ساختارهای ایجاد شده ۶ وجهی می‌شود (شکل ۶).



شکل ۶: اثر پنجاه تپ فمتوثانیه با شار انرژی J/cm^2 ۰,۶

نتیجه‌گیری

در این تحقیق هندسه ساختارهای خودبه‌خودی تشکیل شده روی سطح ویفر سیلیکون پس از اندرکنش با تپ‌های فمتوثانیه بررسی شده است. نشان داده شده که با افزایش انرژی منتقل شده به سطح (چه از طریق تعداد تپ و چه با افزایش شار انرژی تپ‌ها)، هندسه ساختارها از حالت دایروی به شش وجهی منتظم که پایداری بالایی دارد، تبدیل می‌شود [۳]. در طبیعت نیز زنبور عسل از این حقیقت برای ساخت کندوی عسل خود استفاده می‌کند.

مرجع‌ها

[۱] Chichkov, B. N., Momma, C., Nolte, S., Von Alvensleben, F., & Tünnermann, A. (۱۹۹۶). Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. Applied physics A,۶۳(۲),۱۰۹-۱۱۵

[۲] Phillips, K. C., Gandhi, H. H., Mazur, E., & Sundaram, S. K. (۲۰۱۵). Ultrafast laser processing of materials: a review. Advances in Optics and Photonics, ۷(٤), ٦٨٤-٧١٢.

[۳] Goodarzi, R., Hajiesmaeilbaigi, F., & Bostandoost, E. (۲۰۲۰). Self-organized fractal-like structures formation on the silicon wafer surface using the femtosecond laser pulses. Optics and Lasers in Engineering, ۱۲۸, ۱۰٦۰۰۸.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]