ایجاد سیلیکون سیاه با استفاده از تپ‌های لیزری فمتوثانیه با شار انرژی‌های مختلف

رضا گودرزی، فرشته حاج‌اسماعیل‌بیگی، افتخار بستان دوست، حسین رزاقی، اسما معتمدی

پژوهشکده‌ی فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

چکیده - در این پژوهش با استفاده از تپ‌های لیزر فمتوثانیه، سطح ویفر سیلیکون تابش داده شده است. شار انرژی تپ‌های لیزری به عنوان یک مشخصه‌ی مهم مورد مطالعه قرار گرفته و به ازای سه شار انرژی ۱، ۳ و ۹ کیلوژول بر مترمربع، بیناب بازتابی لیزر از سطح ویفر سیلیکون پس از ۱ دقیقه تابش‌دهی ثبت شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شار انرژی لیزری پایین ، کندوسوز به‌طور مؤثر رخ نداده و میزان بازتاب از سطح تغییری نکرده است. کندوسوز لیزری در شار انرژی لیزر مربوط به آستانه‌ی تشکیل پلاسمای یونی رخ می‌دهد که در نتیجه‌ی آن ساختارهای میخه مانند روی سطح سیلیکون تشکیل می‌شوند. تغییر ساختارروی سطح منجر به کاهش میزان بازتاب از آن می‌شود. در نتیجه، با تابش‌دهی لیزری سطح ویفر سیلیکون در محدوده انرژی بیش از شار آستانه، سیلیکون سیاه ایجاد شده که به دلیل جذب بالای آن قابلیت بهبود فناوری ساخت سلول‌های خورشیدی را دارد.

کلید واژه- لیزر فوق‌کوتاه، بازتاب سطحی، سیلیکون سیاه، کندوسوز لیزری

Fabrication of black silicon by using femtosecond laser pulses at various fluencies

Reza Goodarzi, Freshteh Hajiesmaeilbaigi, E. Bostandoost, H. Razaghi, A. Motamedi

Photonics and Quantum Technologies Research School, NSTRI, Tehran, IRAN

Abstract- In this research, a silicon wafer has been irradiated by femtosecond laser pulses. Laser fluence is studied as an important parameter. The reflection spectrum of the surface at three different fluencies 1, 3 and 9 KJ/m^2 has been recorded after 1-minute irradiation. The results are shown that at low laser fluence the efficient ablation did not take place and the surface reflection did not change. However, when the laser fluence reaches to ionic plasma formation threshold, the laser ablation is occurring that cause spikes formation on the silicon surface. The changes in the surface structure result in reflection decreases. In conclusion, by laser irradiation of silicon surface with laser fluence more than the threshold the black silicon is fabricated which due to its high absorption can improve the manufacture of solar cell technology.

Keywords: Ultrashort pulse laser, surface reflection, black silicon, laser ablation

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

پس از ساخت نخستین لیزر در سال ۱۹۶۰، فرآیند پردازش مواد با لیزر به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفت. امروزه لیزر به‌عنوان یک ابزار مفید در صنایع مختلف به‌کار گرفته می‌شود.

برای ایجاد میکروساختاری خاص، به لیزری با ویژگی‌های مشخص نیاز است. به‌عنوان مثال، برای ساخت مواد میکرومتری از جنس سرامیک و پلیمر، لیزرهای اگزایمر استفاده می‌شوند و برای مته‌کاری میکرومتری لیزر Nd:YAG مورد استفاده قرارمی‌گیرد[۱]. در بسیاری از مواردی که نیازمند دقت بسیار بالایی می‌باشند، مانند ایجاد ساختارهای میکرومتری روی فلزات، استفاده از تپ-های لیزری میکروثانیه و حتی نانوثانیه به دلیل تخریب مکانیکی و حرارتی که ایجاد می‌کند، نمی‌تواند پاسخ‌گوی نیاز صنعت باشد.

استفاده از تپ‌های لیزری فوق‌کوتاه به دلیل آن‌که تخریب ناشی از پخش حرارتی به حداقل می‌رسد، می‌تواند گزینه-ی مناسبی باشد[۱]. تحقیقات نشان داده است که لیزرهای فمتوثانیه می‌توانند ابزاری عالی برای ایجاد ساختارهای میکرومتری باشند و جهت میکروماشین‌کاری فلزات، نیمه‌رساناها، دی‌الکتریک‌ها، پلیمرها و ... مورد استفاده قرار بگیرند.

۲- نظریه‌ی اندرکنش تپ‌های فوق‌کوتاه با ماده

اهمیت و ظرفیت بالای استفاده از تپ لیزر فوق‌کوتاه برای میکروماشین‌کاری در این نکته نهفته است که با استفاده از چنین تپی می‌توان پخش گرمایی را کمینه کرد و عمق نفوذ نوری مشخصه‌ی تأثیرگذار در اندرکنش خواهد بود. انرژی لیزر در ابتدا توسط الکترون‌ها جذب می‌شود و سپس از طریق برخورد بین الکترون با فونون، انرژی لیزر به شبکه منتقل می‌گردد. زمان انتقال انرژی از الکترون‌ها به شبکه در حدود ۱۰ پیکوثانیه است[۲]. لذا اگر از تپی با مدت زمان کمتر از ۱۰ پیکوثانیه استفاده شود، ماده زمان لازم برای انتقال حرارت را نخواهد داشت و اثرات حرارتی به حداقل می‌رسند. از سوی دیگر، به دلیل آن‌که اتلاف حرارتی نسبت به تپ‌های طولانی کم است، آستانه‌ی شار انرژی لیزری مورد نیاز نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه می-توان از تپ‌های فوق‌کوتاه با انرژی کم‌تری نسبت به تپ‌ها کوتاه استفاده کرد. علاوه بر موارد گفته‌شده، شدت بالای تپ‌های لیزری فوق‌کوتاه منجر به تأثیرگذاری بیشتر فرآیندهای غیرخطی مورد نیاز در میکروماشین‌کاری مواد شفاف می‌شود.

اگر تپ‌های فوق کوتاه به سطح ماده برخورد کنند و جذب شوند، پدیده‌ی کندوسوز لیزری رخ می‌دهد که به معنی جدا شدن مواد از سطح هدف در اثر انتقال انرژی لیزر به ماده است. پس از اتمام اندرکنش و سرد شدن سطح، ساختارهایی به صورت خودبه‌خودی روی سطح شکل می-گیرند که انواع مختلفی دارند و معروف‌ترین آن‌ها نوارها و میخه‌ها هستند[۳].

ایجاد ساختارهای میخه مانند روی سطح سیلیکون می-تواند ضریب جذب سیلیکون را از طریق افزایش تعداد دفعات بازتاب به سطح افزایش دهد. سیلیکون دارای میخه‌ها، سیلیکون سیاه نیز نامیده می‌شود چرا که تقریباً تمام نور در محدوده‌ی مرئی و مادون‌قرمز نزدیک را جذب می‌کند. سیلیکون سیاه در سلول‌های خورشیدی به منظور افزایش بازده آن‌ها به‌کار می‌رود[۴].

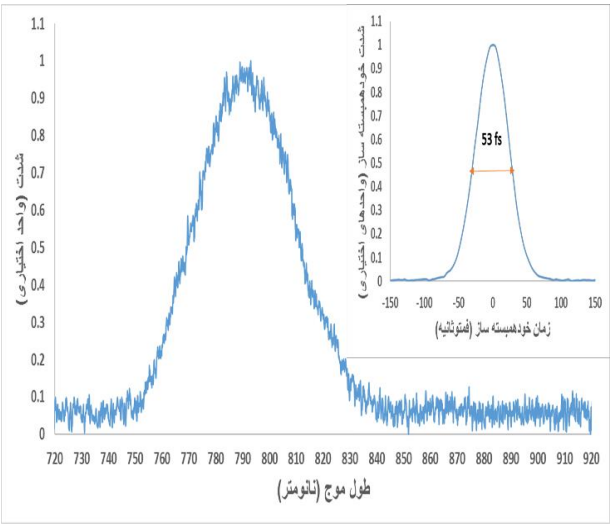
در این پژوهش، اثر تپ‌های لیزر فمتوثانیه روی ویفر سیلیکون مطالعه شده است. تغییرات حاصل شده در بازتاب نوری سطح درحین تابش لیزر، اندازه گیری شده و ساختار شکل گرفته روی سطح توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- روش انجام کار

برای انجام آزمایش‌ها از یک لیزر فمتوثانیه با محیط فعال تیتانیوم-سفایر استفاده شده است. تپ‌های لیزر به شکل گوسی، دارای مدت زمان ۵۳ فمتوثانیه و طول‌موج مرکزی ۷۹۰ نانومتر می‌باشند که نرخ تکرار آن ۱۰ هرتز است. خروجی نوسانگر لیزر با روش چرپ کردن در تقویت کننده باز تولیدی تقویت شده و تا انرژی ۵۰۰ میلی‌ژول قابلیت افزایش انرژی دارد. در شکل ۱ پهنای بینابی و پهنای زمانی تپ‌های لیزری، نشان داده شده است.

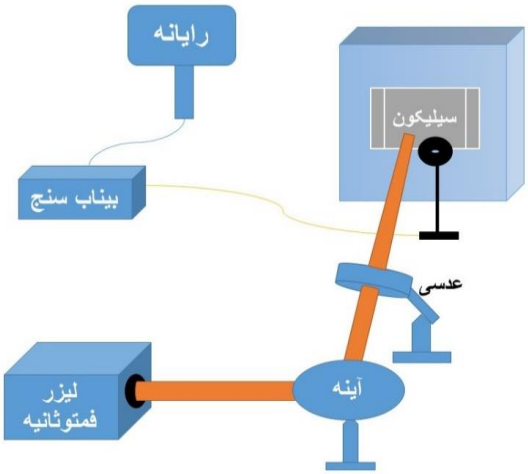
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]



شکل ۱: بیناب و پهنای تپ لیزر مورد استفاده قرار گرفته

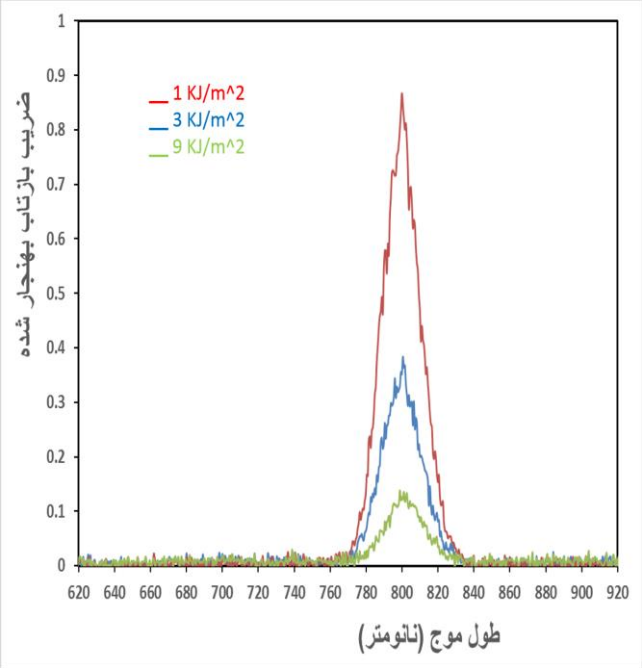
هدف مورد استفاده در این مقاله، ویفر سیلیکون آلائیده‌ی نوع n با اندیس میلر (۱۱۱) می‌باشد که یک طرف آن جلا داده‌شده است. تپ‌های لیزر فمتوثانیه با استفاده از عدسی با فاصله‌ی کانونی ۸۵ میلی‌متر، مطابق شکل ۲ روی سطح جلا داده نشده‌ی هدف، متمرکز می‌شوند.



شکل۲: طرح‌واره‌ی آزمایش

انرژی تپ‌های لیزر با استفاده از انرژی‌متری با دقت ۱μJ به نحوی انتخاب گردید که با توجه به پهنای باریکه‌ی لیزر پس از متمرکز شدن توسط عدسی، $2W_0$=۱۵۰μm، شار انرژی‌هایی در حدود ۱، ۳ و ۹ کیلوژول بر متر مربع را نتیجه می‌دهد. شار انرژی ۳ KJ/m^2 کمی بیشتر از شار آستانه‌ی مورد نیاز برای کندوسوز سیلیکون می‌باشد[۳].

در هر نوبت پرتودهی، یک نقطه از سطح ویفر سیلیکون انتخاب شده و کندوسوز با شار انرژی مشخص انجام می‌شود. بیناب بازتابی نمونه‌ها به‌طور هم‌زمان قبل و بعد از ۶۰ ثانیه تابش‌دهی توسط بیناب‌سنج فیبر نوری با دقت ۰/۶nm (melles Griot 13Fos-100) به ثبت رسیده است. با توجه به آن‌که نرخ تکرار لیزر ۱۰ هرتز می‌باشد، در مدت یک دقیقه، ۶۰۰ تپ لیزری به سطح ویفر سیلیکون برخورد نموده‌اند. با توجه به این‌که انرژی در هر مرحله افزایش یافته است، اثری که تپ‌های متوالی لیزر فمتوثانیه در هر مرحله از آزمایش روی سطح می‌گذارند نیز از یکدیگر متمایز خواهد بود، در شکل ۳ بیناب بهنجار شده‌ی بازتابی نمونه‌ها، مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۳: بیناب بازتابی از سطح به ازای کندوسوز لیزری با شار انرژی‌های مختلف

۴- تحلیل نتایج

اگر از تپ با شار انرژی ۱ KJ/m^2 استفاده شود، با توجه به آن‌که شار انرژی لیزر کم‌تر از آستانه‌ی کندوسوز است، جذب انرژی لیزر نمی‌تواند منجر به تغییر ریخت‌شناسی سطح شود و لذا سطح ماده دست‌نخورده باقی می‌ماند و ضریب جذب نیز تغییر محسوسی نمی‌کند.

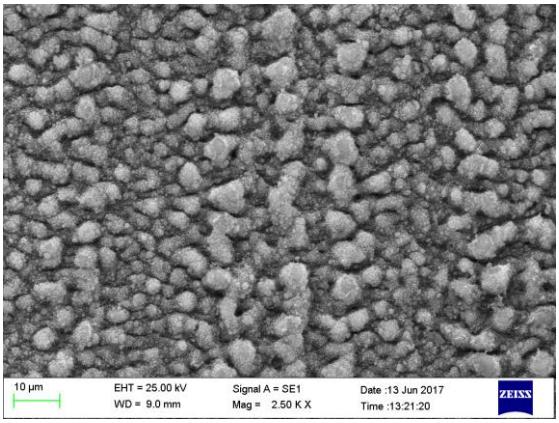
همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، هنگامی که شار انرژی لیزر کمی بیشتر از آستانه‌ی کندوسوز سیلیکون (۲/۸ KJ/m^2) باشد، درصد بازتاب سطحی نسبت

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

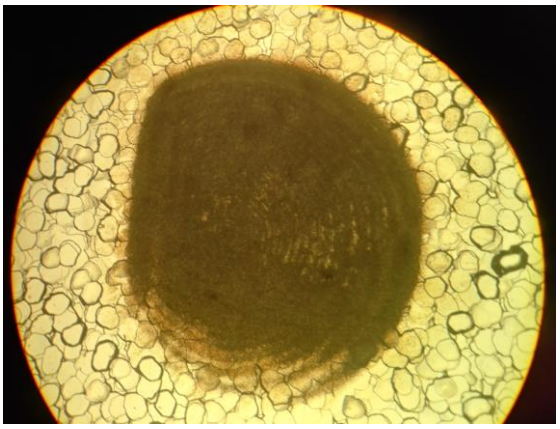
به باریکه‌ی فرودی پس از ۶۰۰ تپ فرودی به ۴۰ درصد می‌رسد. در این حالت با توجه به آن‌که الکترون‌ها فرصت انتقال انرژی کسب کرده از تابش تپ لیزری به شبکه را ندارند، از سطح خارج شده و سطح هدف به‌دلیل افزایش بار مثبت دچار انفجار کولنی شده و ذرات از سطح خارج می‌شوند. در نتیجه، روی سطح ساختارهای میخه مانند تشکیل می‌شوند و افزایش شار انرژی، (۹ KJ/m^2) باعث بیشتر شدن میخه‌ها و متمایز شدن آن‌ها از یکدیگر می‌شود. بازتاب از سطح در این حالت تا حدود ۸۸ درصد کاهش می یابد.

جهت بررسی ریخت‌شناسی سطح از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. در شکل ۴ تصویر SEM سطح پس از اندرکنش تپ‌های با شار انرژی KJ/m^2 ۹ نشان داده شده است و همان‌طور که انتظار می‌رفت، ساختارهای میخه مانند روی سطح تشکیل شده‌اند.



شکل ۴: تصویر SEM سطح ویفر سیلیکون پس از تابش با تپ‌های لیزری فوق‌کوتاه

به این ترتیب اصطلاحاً سیلیکون سیاه در سطح تشکیل می‌شود که به دلیل وجود ساختارهای میخه مانند، تعداد دفعات بازتاب نور از سطح به مراتب افزایش پیدا می‌کند و از این‌رو طبق رابطه‌ی مربوط به سطح لامبرتین، ضریب جذب سطحی افزایش می‌یابد[۵]. در شکل ۵ تصویر میکروسکوپ نوری (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر) از سطوح کندوسوز شده با تپ لیزری با شار انرژی‌های بسیار بزرگ‌تر از شار آستانه، نشان داده شده است. در این تصویر، تشکیل سیلیکون سیاه به وضوح مشهود است.



شکل ۵: تصویر گرفته شده با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر از سطح ویفر سیلیکون، پس از تابش با شار انرژی ۹ KJ/m^2

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نشان داده شد که با استفاده از تابش دهی سطح ویفر سیلیکون با باریکه لیزر فمتوثانیه در شار انرژی که منجر به انفجار فاز می‌شود، می‌توان سیلیکون سیاه تولید کرد که جذب آن در ناحیه‌ی طول‌موجی مادون قرمز نزدیک به مراتب افزایش یابد. از سیلیکون سیاه می‌توان برای ساخت سلول‌های خورشیدی استفاده کرد که در این‌صورت بازده جذب آن‌ها افزایش می‌یابد.

مراجع

[1] Fermann, M. E., Galvanauskas, A., & Sucha, G. (Eds.). (2002). *Ultrafast lasers: Technology and applications* (Vol. 80). CRC Press.
[2] Rafael R. Gattass and Eric Mazur, “Femtosecond laser micromachining in transparent materialsl”, Nature., Vol. 2, pp. 219-225, 2008.
[3] Bonse, Jörn, et al. "Femtosecond laser ablation of silicon–modification thresholds and morphology." Applied Physics A: Materials Science & Processing 74.1 (2002): 19-25.
[4] Sarnet, T., et al. "Femtosecond laser for black silicon and photovoltaic cells." Proc. SPIE. Vol. 6881. 2008.
[5] Campbell, Patrick, and Martin A. Green. "Light trapping properties of pyramidally textured surfaces." Journal of Applied Physics 62.1 (1987): 243-249.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]