



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
۱۱-۹ بهمن ۱۳۹۷



بررسی آستانه تخریب ناشی از لیزر فوق کوتاه در پوشش های اکسید فلزی

مهدي رحيمي، فاضل جهانگیری، رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی

چکیده-در این مقاله آستانه تخریب لیزری در پوشش های اپتیکی متشکل از اکسیدهای ZrO_2 ، Al_2O_3 ، Sc_2O_3 و SiO_2 تحت تابش تک پالس لیزری فوق کوتاه مورد محاسبه قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی با به کارگیری معادلات نرخ و در نظر گرفتن تحول زمانی یونیزاسیون بهمنی و چند فوتونی نشان می دهد که شار لیزری آستانه تخریب لیزری با افزایش طول پالس افزایش می یابد.

کلید واژه - آستانه تخریب لیزری، پوشش های اپتیکی، تابش تک پالس لیزری فوق کوتاه، معادلات نرخ، یونیزاسیون بهمنی و چند فوتونی

Investigation of ultrashort laser induced damage threshold in metal oxide coatings

Mehdi Rahimi, Fazel Jahangiri, Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University

Abstract-In this paper, the laser damage threshold induced by interaction of single ultrashort pulse with optical coatings including metal oxides of ZrO_2 , Al_2O_3 , Sc_2O_3 and SiO_2 is calculated. Simulation results using the rate equations and taking into consideration the avalanche and multiphoton ionization reveal that the laser fluence of damage threshold increases with increasing pulse duration.

Keywords: Laser Damage Threshold, Optical Coatings, Single Ultrashort Pulse, Rate Equations, avalanche and multiphoton ionization

۲. تئوری و معادلات حاکم

۱. مقدمه

تخریب ایجاد شده توسط لیزر در دی الکتریک‌ها در رژیم پالس‌های فوق کوتاه مبتنی بر برانگیختگی غیر خطی، یونیزاسیون چند فوتونی و یونیزاسیون تونلی زنی الکترون‌ها از باند ظرفیت به باند رسانش توضیح داده می‌شود. این فرآیندهای غیر خطی در واقع الکترون اولیه برای شروع یونیزاسیون برخوردی و به دنبال آن یونیزاسیون بهمنی را فراهم می‌آورد [۷]. هنگامی که چگالی الکترون‌ها در باند رسانش از مقدار بحرانی تجاوز کند ماده بسیار جاذب شده و انرژی جذب شده پس از زمانی در حدود ۱ پیکوثانیه به شبکه منتقل می‌شود و این باعث ایجاد تخریب می‌گردد [۳]. از اینرو محاسبه شار لیزری مورد نیاز برای آنکه چگالی الکترونی در باند رسانش از حد بحرانی خود تجاوز کند معیار مناسبی برای آستانه تخریب لیزری محسوب می‌شود. برای محاسبه چگالی الکترون‌ها در باند رسانش از معادله نرخ استفاده می‌کنیم [۱]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = W_{PI} + W_{AV} - W_R \quad (1)$$

که W_{PI} ، W_{AV} و W_R به ترتیب نرخ یونیزاسیون چند فوتونی، یونیزاسیون بهمنی و نرخ واهلش الکترون‌ها از باند رسانش به باند ظرفیت هستند. نرخ فوتویونیزاسیون به صورت زیر تعریف می‌شود [۸]:

$$Q(\gamma, x) = \sqrt{\frac{\pi}{2K(\gamma_2)}} \times \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left\{-n\pi \frac{K(\gamma_2) - E(\gamma_2)}{E(\gamma_1)}\right\} \times \quad (2)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \Phi \left\{ \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{(2(x+1) - 2x + n)}{K(\gamma_2)E(\gamma_2)}} \right\}$$

$$x = \frac{2}{\pi} \frac{E_g}{\hbar\omega} \frac{\sqrt{1+\gamma^2}}{\gamma} E \left(\frac{1}{1+\gamma^2} \right)$$

$$\gamma = \frac{\omega \sqrt{m_e^* E_g}}{eE}$$

$$\Phi(z) = \int_0^z \exp(y^2 - z^2) dy$$

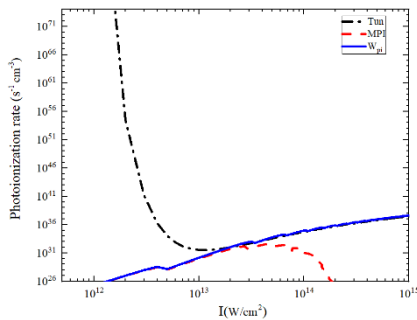
γ پارامتر کلدیش، Φ انتگرال داوسون، E_g پهنای باند، K انتگرال بیضوی نوع اول، E انتگرال بیضوی نوع دوم و \hbar ثابت پلانک است و پارامترهای γ_1 و γ_2 به صورت زیر تعریف می‌شوند:

با اختراع لیزر و توسعه لیزرهای توان بالا، مطالعه آستانه تخریب ناشی از لیزر که عامل محدود کننده در ساخت تجهیزات اپتیکی و لیزری است مورد توجه قرار گرفت [۱]. تخریب ناشی از لیزر معمولاً از طریق دو مکانیزم حرارتی و الکتریکی توصیف می‌شود. برای لیزرهای پیوسته و یا پالس‌های لیزری با طول پالس بلندتر از ۵۰ پیکوثانیه مکانیزم حرارتی برقرار است و به صورت ذوب شدگی موضعی و شکستگی ظاهر می‌شود. ولی برای پالس‌های لیزری فوق کوتاه کمتر از ده پیکوثانیه مکانیزم حاکم بر تخریب الکتریکی است که به صورت کندو سوز ظاهر می‌شود [۲] و [۳]. در کنار مطالعات آستانه تخریب در حجم مواد اپتیکی، بررسی تخریب پوشش‌های اپتیکی نیز که معمولاً از دیگر المان‌های اپتیکی آستانه تخریب پایین‌تری دارند مورد توجه قرار داشته است [۴]. در سال ۱۹۹۵ مدل تئوری بر پایه حل معادلات نرخ، برای محاسبه آستانه تخریب پیشنهاد شد که مطابقت خوبی با داده‌های تجربی داشت [۵]. در سال ۲۰۱۱ آستانه تخریب سطحی فیوز سیلیکا را در رژیم فمتوثانیه به صورت تجربی و تئوری بررسی و نشان داده شد که فرآیند بهمنی برای پالس‌های کوچکتر از ۵۰ فمتوثانیه می‌تواند نقش مؤثری داشته باشد [۶]. در این مقاله ابتدا تئوری حاکم بر تخریب در رژیم پالس‌های فوق کوتاه را برای لایه‌هایی از جنس اکسیدهای لیزرهای توان بالا را می‌سازند بررسی می‌کنیم. سپس با استخراج معادلات حاکم بر دینامیک تخریب و حل عددی آن‌ها با استفاده از الگوریتم رانگ-کوتا، وابستگی آستانه تخریب به طول پالس و شدت لیزری را محاسبه و تحول زمانی فرایندهای یونیزاسیون حاکم بر پدیده تخریب را استخراج می‌کنیم. نتایج ما نشان داد که با افزایش طول پالس لیزری آستانه تخریب ماده افزایش و با افزایش چگالی الکترونی، ضریب جذب نیز افزایش پیدا می‌کند.

$$\gamma_1 = \frac{\gamma^2}{1+\gamma^2} \quad \gamma_2 = \frac{1}{1+\gamma^2} \quad (3)$$

۳. نتایج و بحث:

با توجه به معادلات (۲) و (۳)، نرخ فوتوایونیزاسیون به صورت شکل (۱) برای سیلیکا بدست آمد. این شکل نرخ فوتوایونیزاسیون و تقریب‌های آن در شدت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، نرخ فوتوایونیزاسیون کل در بازه شدت $10^{12} - 10^{14}$ وات بر سانتی‌متر مربع با نرخ یونیزاسیون چند فوتونی و به ازای شدت‌های بالاتر از 10^{14} وات بر سانتی‌متر مربع با نرخ یونیزاسیون تونل زنی تقریب زده می‌شود [۸].



شکل ۱: تغییرات نرخ فوتوایونیزاسیون کل، یونیزاسیون چند فوتونی و یونیزاسیون تونل زنی بر حسب شدت میدان لیزری برای سیلیکا در طول موج ۸۰۰ نانومتر

تخریب برای سیلیکا در شدت‌های کوچکتر از 10^{14} وات بر سانتی‌متر مربع رخ می‌دهد پس می‌توان فوتوایونیزاسیون کل را برای این ماده با یونیزاسیون چند فوتونی تقریب زد. برای مواد دیگر نیز نرخ یونیزاسیون چند فوتونی با نرخ فوتوایونیزاسیون کل منطبق است بنابراین این نرخ فوتوایونیزاسیون کل با نرخ یونیزاسیون چند فوتونی برابر گرفته می‌شود.

بنابراین با حل معادله (۱) با استفاده از الگوریتم رانگ-کوتا برای اکسیدهای SiO_2 , Sc_2O_3 , Al_2O_3 , ZrO_2 به استخراج نتایج می‌پردازیم.

اگر $\gamma > 1$ باشد نرخ فوتوایونیزاسیون برابر نرخ یونیزاسیون چند فوتونی است و برای $\gamma < 1$ نرخ فوتوایونیزاسیون برابر نرخ یونیزاسیون تونلی زنی است که از تقریب‌های رابطه (۲) بدست می‌آیند [۸]. نرخ یونیزاسیون بهمینی از مدل درود بدست می‌آید [۴]:

$$W_{AV} = \frac{\sigma}{E_g} I(t) \quad (4)$$

که در آن σ سطح مقطع جذب و به صورت $\sigma = \frac{e^2}{c \epsilon_0 n_0 m_e^*} \times \frac{\tau_c}{1 + \omega^2 \tau_c^2}$ ، τ_c زمان بین برخورد دو الکترون و به صورت $n_0, \tau_c = \frac{16\pi\epsilon_0^2 \sqrt{m_e^*} (0.1E_g)^3}{\sqrt{2}e^4 n(t)}$ ضریب شکست محیط، c سرعت نور، ϵ_0 ثابت دی الکتریک در هوا، m_e^* جرم موثر الکترون، τ_p پهنای زمانی پالس و I شدت پالس لیزری است که به صورت $I = I_0 \exp\left[-4 \ln(2) \left(\frac{t}{\tau_p}\right)^2\right]$ در نظر گرفته می‌شود.

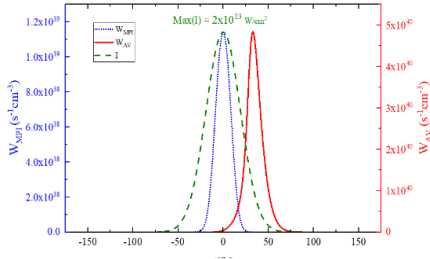
علاوه بر این، نرخ واهلش از باند رسانش به باند ظرفیت برابر است با:

$$W_R = \frac{n(t)}{\tau_r} \quad (5)$$

که در آن τ_r زمان متوسط واهلش الکترون‌ها از باند رسانش به باند ظرفیت است. با توجه به ثابت دی الکتریک ماده و تغییرات آن با افزایش چگالی الکترونی می‌توان میزان جذب ماده را مشخص کرد. ثابت دی الکتریک در این شرایط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \epsilon_\gamma &= \epsilon_1 + i \epsilon_2 & \epsilon_1 &= \epsilon_{opt} - \frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e^*} \times \frac{1}{\omega^2 + \left(\frac{1}{\tau_c}\right)^2} \\ \epsilon_2 &= \frac{ne^2 \tau}{\epsilon_0 m_e^* \omega (1 + \omega^2 \tau_c^2)} \\ \epsilon_{opt} &= n_0^2 \end{aligned} \quad (6)$$

با پالس مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که یونیزاسیون بهمنی مکانیزم غالب در تولید الکترون های باند رسانش می‌باشد.



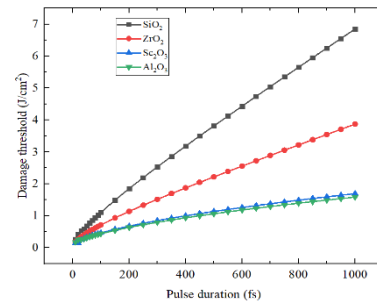
شکل ۴: تغییرات یونیزاسیون بهمنی و یونیزاسیون چند فوتونی با زمان برای سیلیکا

نتیجه‌گیری

در این مقاله علاوه بر محاسبه آستانه تخریب برای پوشش های SiO_2 , Sc_2O_3 , Al_2O_3 , ZrO_2 ، نشان دادیم با افزایش طول پالس آستانه تخریب افزایش می‌یابد. همچنین نشان دادیم با افزایش چگالی الکترونی ضریب جذب افزایش می‌یابد. در نهایت نرخ یونیزاسیون بهمنی و فوتو یونیزاسیون را برای سیلیکا محاسبه کردیم و نشان دادیم نرخ یونیزاسیون بهمنی فرآیند غالب در ایجاد الکترون های باند رسانش است.

مراجع

- [1] Ristau, Detlev, ed. Laser-induced damage in optical materials. CRC Press, 2014.
- [2] Stuart, B. C., et al. "Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics." *Physical review B* 53.4 (1996): 1749. Stuart, Brent C., et al. "Optical ablation by high-power short-pulse lasers." *JOSA B* 13.2 (1996): 459-468.
- [3] Stuart, Brent C., et al. "Optical ablation by high-power short-pulse lasers." *JOSA B* 13.2 (1996): 459-468.
- [4] Jing, Xufeng, et al. "Calculation of femtosecond pulse laser induced damage threshold for broadband antireflective microstructure arrays." *Optics express* 17.26 (2009): 24137-24152.
- [5] BC Stuart, MD Feit, AM Rubenchik, BW Shore... - *Physical review* ..., 1995 - APS
- [6] Chimier, B., et al. "Damage and ablation thresholds of fused-silica in femtosecond regime." *Physical Review B* 84.9 (2011): 094104.
- [7] Lenzner, Matthias. "Femtosecond laser-induced damage of dielectrics." *International Journal of Modern Physics B* 13.13 (1999): 1559-1578.
- [8] Keldysh, L. V. "Ionization in the field of a strong electromagnetic wave." *Sov. Phys. JETP* 20.5 (1965): 1307-1314.
- [9] Mero, M., et al. "Scaling laws of femtosecond laser pulse induced breakdown in oxide films." *Physical Review B* 71.11 (2005): 115109.



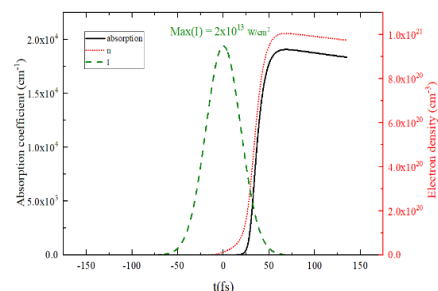
شکل ۲: آستانه تخریب بر حسب طول پالس

شکل ۲ نشان می‌دهد که آستانه شار لیزری مورد نیاز برای ایجاد تخریب در مواد مورد بررسی با افزایش طول پالس لیزری افزایش می‌یابد. آستانه تخریب به صورت $F_{cr} \propto \tau^K$ با طول پالس رابطه دارد و K برای مواد مورد بررسی به صورت زیر بدست می‌آید.

K	۰٫۸۰۲۹	۰٫۷۴۶۷	۰٫۵۴۹۵	۰٫۵۶۳۶
ماده	SiO_2	Al_2O_3	SC_2O_3	ZrO_2

داده‌های بدست آمده در شکل ۲ برای سیلیکا و سفایر مطابقت خوبی با نتایج تجربی در مرجع [۹] دارند. دلیل افزایش آستانه تخریب با افزایش طول پالس را می‌توان کاهش شدت پالس لیزری لازمه برای تخریب در طول پالس‌های بلندتر و به دنبال آن کاهش نرخ یونیزاسیون-های بهمنی و چند فوتونی دانست.

همچنین بررسی ما نشان می‌دهد که ضریب جذب با افزایش چگالی الکترونی مطابق معادله (۶) افزایش می‌یابد. این تغییرات در شکل ۳ به عنوان نمونه برای سیلیکا، به ازای طول پالس لیزری ۴۵ فمتوثانیه ارائه شده است. مطابق شکل هنگامی که چگالی الکترونی (n) افزایش می‌یابد، α نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۳: افزایش ضریب میرایی با افزایش چگالی الکترونی در سیلیکا.

شکل ۴ تغییرات زمانی یونیزاسیون‌ها برای سیلیکا در طول پالس ۴۵ فمتوثانیه را نشان می‌دهد و روند تغییرات آن را