بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

افزایش آستانه تخریب لیزری لایه های نازک TiO_2 در رژیم تابشی لیزرهای فمتوثانیه با کنترل عملیات حرارتی

علیرضا بنانج[1] ، مهدیه خطیری[۱]، زهره پارسا[۲]

۱: پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای ایران

۲: دانشگاه خوارزمی

چکیده: به منظور مطالعه آستانه تخریب لیزری، لایه های TiO_2 با روش تبخیر بیم الکترونی بر روی زیر لایه Bk7 لایه نشانی شدند. سپس به مدت ۳ ساعت با شیبهای مختلف دمایی تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. پس از آن با استفاده از طیف عبوری در محدوده نور مرئی و فرابنفش نمونه ها، ضریب شکست و ضریب جذب آنها بدست آمدند و با اطلاعات موجود گاف انرژی هر نمونه محاسبه شد. با استفاده از روابط موجود، مقدارهای عددی گاف انرژی و مقادیر، میزان آستانه تخریب لیزری در محدوده لیزرهای فمتوثانیه در طول موج ۱۰۳۰ nm و عرض پالس ۲۰-۵۰۰ فمتوثانیه محاسبه شد.

کلید واژه- تخریب لیزری در رژیم فمتوثانیه، تخریب لیزری لایه های اپتیکی، آستانه تخریب لیزری TiO_2

Improvement of Femtosecond laser induced damage threshold of TiO_2 optical films by using controlled annealing process

Ali Reza Bananej[1], Mahdieh Khatiri[1], Zohreh Parsa[2]

[1] Laser & Optics Research School, P.O. Box 14155-1339, Tehran, Iran

[2]Kharazmi university, Tehran, Iran

Abstract: Tio_2 optical films with 200nm thickness were deposited by using electron beam evaporation technique on BK7 optical glass and post annealed at different time-temperature gradient. As a consequence of measured transmission spectrum and using envelope method, refractive index and absorption coefficient of three samples have been determined. Then, Tauce method has been used for determining the energy bandgap of samples.
Finally laser induced damage threshold (LIDT) of the samples at 1030nm and pulse duration 20-500fs have been obtained numerically. The results show that as a result of increasing the bandgap energy by using slowly varying time temperature gradient annealing, LIDT can be enhanced considerably.

Keywords: Femtosecond laser induced damage, laser damage of optical thin films, induced damage threshold of TiO_2

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

امروزه لیزرهای با عرض پالس کوتاه، از اهمیت زیادی در تحقیقات پزشکی، صنایع مخابرات، و ... برخوردار میباشند. با توجه به عرض پالس کوتاه این نوع لیزرها (در حدود 10^{-15} ثانیه)، توان تابشی بر روی قطعات اپتیکی و لایه های نازک موجود در کاواک این نوع لیزرها بسیار بالا میباشد و باعث تخریب این قطعات میگردند. امروزه مهمترین محدودیت برای ساخت لیزرهای پالس کوتاه ساخت قطعات اپتیکی و لایه های نازک مقاوم در برابر این توان تابشی بالا میباشد.

در لیزرهای با پالس بلند، عامل اصلی در تخریب لایه های نازک پدیده های گرمایی میباشد که با جذب انرژی توسط لایه نازک و برخورد الکترونها با یکدیگر اتفاق می افتد[1]. اما در مورد لیزرهای با پهنای پالس کوتاه پدیده غالب فروشکست اپتیکی میباشد که در آن الکترونها با جذب چند فوتونی و یا تونل زنی به باند رسانش میرسند.

فروشکست لیزری که منتج به تخریب در مواد دی الکتریک میشود، از زمانیکه لیزر در سال ۱۹۶۰ اختراع شد به صورت وسیعی مورد توجه واقع شد. آستانه فروشکست لیزری به پهنای پالس لیزر وابسته است. یک معیار کاملا تجربی برای چگالی انرژی آستانه فروشکست وجود دارد که برای $\tau_p > 10ps$ (τ_p عرض پالس میباشد) داریم $F_{th} \propto \sqrt{\tau_p}$ [2] ،اما برای پالس لیزر در محدوده $\tau_p < 10ps$ ،آستانه تخریب لیزری بر حسب پهنای پالس، تفاوت قابل توجه ای را از این قانون نشان میدهد[3] . به طور کلی مکانیزم تخریب در لایه های نازک بستگی به عرض پالس لیزر تابشی دارد. در محدوده لیزرهای با پالس بلند(ns) با جذب انرژی لیزر در نقاط نقص و تبدیل به گرما، باعث تخریب لایه های نازک میشود. در محدوده لیزرهای با پالس کوتاه پدیده های فوتویونیزاسیون و یونیزاسیون بهمنی پدیده غالب در پروسه تخریب میباشد. بنابراین با جذب انرژی توسط الکترونهای باند ظرفیت و انتقال آنها به باند رسانش و افزایش چگالی الکترونها تا حدود $10^{21}\ cm^{-3}$ در باند رسانش تخریب لیزری رخ میدهد [4,5]. در این تحقیق لایه های نازک TiO_2 با روش بیم الکترونی بر روی شیشه BK7 لایه نشانی شده اند و تحت عملیات حرارتی ویژه ای قرار گرفتند. سپس با استفاده از اطلاعات طیف طیف عبوری در محدوده نور مرئی- فرابنفش میزان گاف انرژی محاسبه شد. مقادیر بدست آمده از گاف انرژی در روابط موجود برای تعیین آستانه تخریب لیزری در رژیم فمتوثانیه استفاده گردید و آستانه تخریب لایه نازک بدست آمدند.

تهیه لایه نازک TiO_2 و انجام عملیات حرارتی

لایه های نازک TiO_2 بر روی زیر لایه های Bk7 به روش تبخیر فیزیکی با استفاده از تفنگ الکترونی لایه نشانی شده اند. اطلاعات مربوط به فرایند لایه نشانی در جدول (۱) ارائه شده است. بعد از اتمام لایه نشانی نمونه ها با شیب دمایی مختلف در فشار یک اتمسفر (فشار هوای معمولی) به مدت ۳ ساعت با جزئیات ذکر شده در جدول (۲) مورد عملیات حرارتی قرار گرفتند.

جدول ۱ : اطلاعات مربوط به لایه نشانی تک لایه TiO_2

فشار پایه محفظه خلاء(Torr)	10^{-5}
فشار جزئی اکسیژن (Torr)	6×10^{-5}
نرخ لایه نشانی(nm/s)	0.1
دمای لایه نشانی	200^0C
ضخامت فیزیکی	400 nm

جدول ۲: چگونگی اعمال عملیات حرارتی بر روی نمونه ها

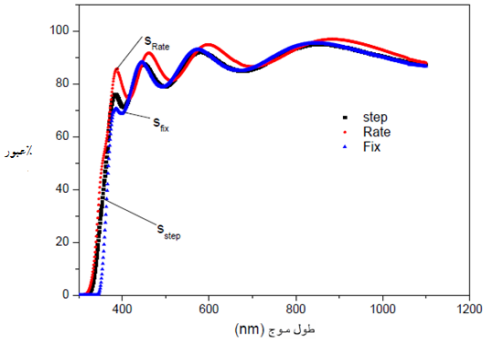
شناسه نمونه	روند عملیات حرارتی	تغییرات دمایی
SRate	دمای کوره هر دقیقه ۲/۲ دجه سانتیگراد تا حداکثر دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یافته است.	کند
Sstep	کوره به ترتیب به مدت ۱ ساعت در دماهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد تنظیم شده است	سریع
Sfix	کوره در دمای ثابت۴۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت تنظیم شده است.	خیلی سریع

طیف عبور در محدوده نور مرئی - فرابنفش و ضریب شکست

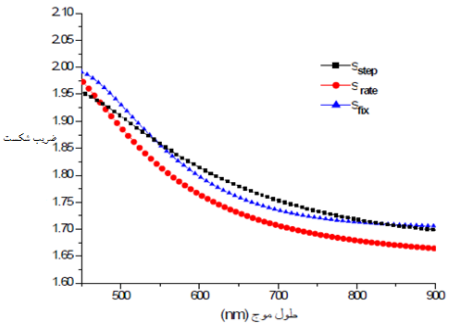
دستگاه طیف سنج(Hitachi:U3410) مورد استفاده به روش عبور مستقیم طیف عبوری لایه ها را مشخص کرد. منحنی طیف عبوری در شکل a،۱ نشان داده شده است. با توجه به منحنی طیف عبوری درمی یابیم که گذردهی با کاهش سرعت عملیات حرارتی در ناحیه مرئی بطور جزئی افزایش یافته است که حاکی از افزایش شفافیت در این ناحیه می باشد. افزایش گذردهی با کاهش عملیات حرارتی را میتوان به افزایش همگنی ساختار لایه مربوط دانست. در شکل b،۱ منحنی ضریب شکست نمونه ها بر حسب طول موج رسم شده است.این نمودار نشان میدهد که ضریب شکست نمونه ها با افزایش طول موج کاهش

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

می یابد و برای نمونه های مورد بررسی، ضرایب شکست تفاوت جزئی دارند و این تفاوت جزئی به صورت افزایش ضریب شکست با افزایش نرخ عملیات حرارتی میباشد.



a



b

شکل ۱: منحنی طیف عبوری و ضریب شکست بر حسب طول موج مربوط به لایه های نازک TiO2

بررسی گاف انرژی لایه های نازک TiO_2

تعیین گاف انرژی (E_g) برای بدست آوردن ساختار باند الکترونیکی مواد لایه نازک ضروری است. ضریب جذب α، از رابطه Tauce که به صورت زیرمیباشد، بدست می آید:

$$\alpha = \frac{B_1(h\upsilon - E_g)^{\zeta}}{h\upsilon} \qquad (1)$$

که در آن B_1 عددی ثابت، h ثابت پلانک، hν انرژی فوتون تابیده و ζ مشخص کننده فرآیند جذب اپتیکی است و برای حالت گاف مستقیم لایه TiO2برابر ۱/۲ میباشد [6].

از طرف دیگر ضریب شکست لایه را میتوان با داشتن نمودار طیف عبوری و استفاده از روش متداول پوش (envelope method) بدست آورد و با استفاده از روابط زیر ضریب جذب لایه محاسبه خواهد شد[7].

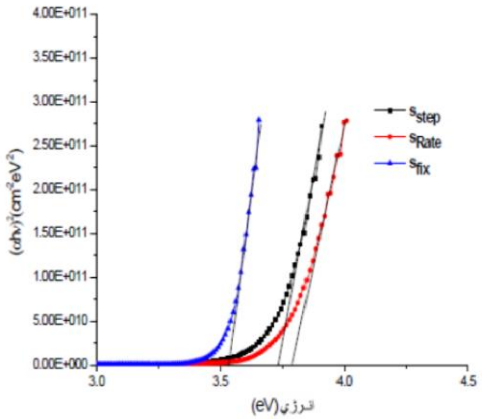
شناسه نمونه	انرژی گاف مستقیم (ev)
SRate	۳/۷۸
Sstep	۳/۷۳
Sfix	۳/۵۳

$$\alpha = -\frac{1}{t} ln \frac{(n-1)(n-n_s)(\frac{T_{max}}{T_{min}}+1)^{0.5}}{(n+1)(n+n_s)(\frac{T_{max}}{T_{min}}-1)^{0.5}} \qquad (2)$$

که در آن t ضخامت لایه میباشد و برابر است با:

$$t = \frac{\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \qquad (3)$$

در این معادلات ضریب شکست لایه n ، ضریب شکست زیر لایه n_s ، عبور بیشینه و کمینه به ترتیب T_{max} و T_{min} میباشند و λ_1 و λ_2 طول موجهای متناظر با بیشینه و کمینه عبور و n_1 و n_2 ضریب شکست های متناظر با آنها میباشند و در نتیجه α بدست می آید. بنابراین با رسم نمودار $(\alpha h\upsilon)^2$ بر حسب hν میتوان گاف انرژی را محاسبه کرد. نمودار این مرحله در شکل ۲ دیده میشوند.



شکل۲ :منحنی تغییرات $(\alpha h\upsilon)^2$ بر حسب hν

مقادیر انرژی گاف در جدول ۳ دیده میشود. همانطور که از مقادیر انرژی پیداست، کاهش انرژی گاف با افزایش نرخ عملیات حرارتی همراه است. از آنجایی که گاف انرژی لایه های نازک TiO_2 تحت تاثیر نواقص کریستالی می باشد[8]، میتوان گفت نمونه ای که با سرعت کمتر تحت عملیات حرارتی قرار میگیرد رشد کریستالی بهتر داشته است و در نتیجه با اندازه دانه بزرگتر، نواقص کمتر بوجود می آید و گاف انرژی افزایش می یابد. این مطلب را اینگونه میتوان توضیح داد که به دلیل آنکه اندازه دانه افزایش می یابد، چگالی مرزدانه ها کاهش یافته است و در نتیجه حاملهای بار کمتر در آنجا به دام افتاده و منجر به بالارفتن مقدار حامل های آزاد بار میشود که به معنی بالا رفتن رسانندگی است و در نتیجه اثر شناخته شده Bursetein-Moss افزایش حامل های آزاد باعث رانده شدن باند هدایت به انرژی های بالاتر میشود و گاف انرژی افزایش میبابد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

جدول ۳ : گاف انرژی لایه های نازک TiO_2

محاسبه آستانه تخریب لیزری لایه های نازک TiO_2 در محدوده لیزرهای فمتوثانیه

آستانه تخریب لیزری درطول موج ۱۰۳۰ نانومتر و با پهنای پالس ۲۰-۵۰۰ فمتوثانیه طبق رابطه تجربی زیر بدست می آید [9]:

$$LIDT = 0.63(\pm 0.031 Jcm^{-2}eV)E_g - 1.61(\pm 0.14 Jcm^{-2}) \quad (4)$$

با توجه به مقادیر بدست آمده برای گاف مستقیم انرژی که در جدول شماره ۳ دیده میشود، مقادیر LIDT برای لایه های TiO_2 که تحت عملیات حرارتی قرار گرفته اند، قابل محاسبه می باشند. این مقادیر در جدول ۴ دیده می شود:

شناسه نمونه	انرژی گاف مستقیم(ev)	LIDT(Jcm^{-2}) در طول موج ۱۰۳۰
SRate	3/78	۰/۷۷۱
Sstep	3/73	۰/۷۳۹
Sfix	3/53	۰/۶۱۳

جدول۴ :
آستانه تخریب لیزری محاسبه شده بر حسب گاف انرژی برای لایه نازک های TiO_2

همانطور که در جدول دیده می شود با افزایش نرخ عملیات حرارتی، آستانه تخریب لیزری کاهش می یابد و در نتیجه برای داشتن لایه نازک TiO_2 با آستانه بالاتر، باید افزایش دما به کندی انجام شود.

نتیجه گیری

با توجه به مقادیر به بدست آمده برای لایه های نازک TiO_2 میتوان اذعان کرد که با افزایش نرخ عملیات حرارتی این لایه ها گذردهی لایه ها کمتر شده و ضریب شکست آنها بالا میرود. همین طور با افزایش نرخ عملیات حرارتی، گاف انرژی لایه ها کاهش پیدا می کند و در نتیجه طبق معادله ۴ آستانه تخریب لیزری کاهش می یابد.

مراجع

[1]. Tien, An-Chun, Sterling Backus, Henry Kapteyn, Margaret Murnane, and Gerard Mourou. "Short-pulse laser damage in transparent materials as a function of pulse duration." Physical Review Letters 82, no. 19 (1999): 3883.

[2]. Du, D., X. Liu, G. Korn, J. Squier, and G. Mourou. "Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO2 with pulse widths from 7 ns to 150 fs." Applied physics letters 64, no. 23 (1994): 3071-3073.

[3] Jing, Xufeng, Jianda Shao, Junchao Zhang, Yunxia Jin, Hongbo He, and Zhengxiu Fan. "Calculation of femtosecond pulse laser induced damage threshold for broadband antireflective microstructure arrays." Optics express 17, no. 26 (2009): 24137-24152.

[4]. Lenzner, Matthias. "Femtosecond laser-induced damage of dielectrics." International Journal of Modern Physics B 13, no. 13 (1999): 1559-1578.

[5]. Sanner, Nicolas, Olivier Utéza, Benoît Bussiere, G. Coustillier, A. Leray, Tatiana Itina, and Marc Sentis. "Measurement of femtosecond laser-induced damage and ablation thresholds in dielectrics." Applied Physics A 94, no. 4 (2009): 889-897.

[6]. Sreemany, Monjoy, and Suchitra Sen. "A simple spectrophotometric method for determination of the optical constants and band gap energy of multiple layer TiO< sub> 2</sub> thin films." Materials Chemistry and Physics 83, no. 1 (2004): 169-177.

[7]. Caglar, M., Y. Caglar, and S. Ilican. "The determination of the thickness and optical constants of the ZnO crystalline thin film by using envelope method." *Journal of optoelectronics and advanced materials* 8, no. 4 (2006): 1410.

[8]. Yang, Chen, Huiqing Fan, Yingxue Xi, Jin Chen, and Zhuo Li. "Effects of depositing temperatures on structure and optical properties of TiO< sub> 2</sub> film deposited by ion beam assisted electron beam evaporation." Applied Surface Science 254, no. 9 (2008): 2685-2689.

[9]. Mangote, Benoit, Laurent Gallais, Mireille Commandré, Mathias Mende, Lars Jensen, Henrik Ehlers, Marco Jupé et al. "Femtosecond laser damage resistance of oxide and mixture oxide optical coatings." Optics letters 37, no. 9 (2012): 1478-1480.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]