

# بررسی مشخصه‌های اپتیکی لایه های نازک $\text{TiO}_2$ و $\text{ZrO}_2$ در راستای استفاده در قطعات لیزرهای پر توان

مینا برادران<sup>۱</sup>، مهدیه خطیری<sup>۱</sup>، علیرضا بنانج<sup>۱</sup>

## چکیده

در این مقاله پس از ساخت لایه های نازک  $\text{TiO}_2$  و  $\text{ZrO}_2$  بر روی زیر لایه BK7 به روش تبخیر با باریکه الکترونی، طیف عبوری UV-visible از لایه ها تهیه شده است. با استفاده از طیف عبوری، ضریب شکست لایه ها به دست آمده است. تصاویر AFM از لایه های نازک  $\text{TiO}_2$  و  $\text{ZrO}_2$  تهیه شده است. اندازه گیری پراکندگی این لایه های نازک با روش پراکندگی تجمعی کلی یا TIS و روش AFM انجام شده است. همچنین، مقادیر زبری سطح و تخلخل و هدایت گرمایی لایه ها محاسبه شده است و دو لایه از لحاظ پارامترهای پراکندگی و آستانه تخریب لیزری و تغییرات ضریب شکست در اثر تغییرات حرارتی با هم مقایسه شده اند.

**واژه های کلیدی:** لایه های نازک، پراکندگی، زبری سطح، تخلخل، هدایت گرمایی، آستانه تخریب لیزری

## ۱. مقدمه

پوششهای اکسیدی<sup>۱</sup> به علت داشتن محدوده طیف عبوری که از فرابنفش تا فروسرخ را در بر می گیرد، برای ساخت تجهیزات اپتیکی مورد استفاده قرار می گیرد. از آنها به ویژه با توجه به طبیعت انکساریشان و دیگر ویژگیهای مطلوب نظیر داشتن پایداری حرارتی و شیمیایی در محیط و استحکام در تجهیزات لیزری استفاده می شود [۱].  $\text{TiO}_2$  و  $\text{ZrO}_2$ ، دارای ضریب شکست بالا هستند که اغلب برای تهیه لایه های بازتابنده مورد استفاده قرار می گیرند [۲]. اندازه گیری

با توجه به پیشرفت های زیادی که در زمینه گداخت به روش محصورسازی لختی با استفاده از لیزرهای توان بالا صورت گرفته است، تلاش برای بالا بردن توان لیزر های مورد استفاده در این تکنولوژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است و بررسی پارامترهای موثر در کنترل توان لیزرها از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

(۱) پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

### ۳. روش اندازه گیری پراکندگی

#### ۳-۱. روش پراکندگی تجمعی کلی (TIS)<sup>۱</sup>

روش اندازه گیری پراکندگی روش TIS بوده است. نمایش طرح وار دستگاه TIS در شکل (۱) نشان داده شده است.

نور لیزر هلیوم نئون با طول موج  $632/8 \text{ nm}$  و توان خروجی  $20 \text{ mW}$  و نوسانات توانی کمتر از  $1\%$ ، از یک پهن کننده باریکه<sup>۲</sup> عبور داده می شود که واگرایی نور خروجی آن کمتر از  $3 \text{ mrad}$  است. پس از آن از روزنه ای به قطر  $1 \text{ mm}$  عبور کرده و وارد کره ای می شود که به منظور جمع کردن نور پراکنده شده به کار می رود. قطر داخلی کره  $200 \text{ mm}$  می باشد که دیواره داخلی آن با لاک سفید یا لایه بازتابنده  $\text{MgO}$  پوشانده شده است. اندازه گیری تحت زاویه  $90^\circ$  انجام می گیرد. فوتوسل سیلیکونی 2CR101 برای اندازه گیری شدت نور پراکنده شده به همراه یک ولت متر دیجیتالی به عنوان نشانگر به کار رفته است. مخروط بازتابنده نور از تفلون یا ماده سرامیکی سفید ساخته می شود که زاویه  $30^\circ$  دارد و نور باید به نوک مخروط هدف گیری شود.

روش اندازه گیری به ترتیب زیر است [۴]:

ابتدا سیگنال زمینه اندازه گیری می شود. بدین صورت که خروجی ولت متر،  $V_b$ ، بدون حضور نمونه داخل کره ثبت می گردد. سپس با قرار گرفتن مخروط بازتابنده داخل کره سیگنال پراکندگی از مخروط بازتابنده،  $V_w$ ، اندازه گیری می شود. در نهایت سیگنال پراکندگی از نمونه، با ثبت خروجی ولت متر،  $V_s$ ، پس از قرار گرفتن نمونه در خروجی کره اندازه گیری می شود.

آستانه تخریب لیزری قطعات عامل مهمی در کنترل توان لیزرها می باشد.  $\text{TiO}_2$  و  $\text{ZrO}_2$  به علت پایداری زیاد و مقاومت بالا در برابر تخریب لیزری می توانند نقش مهمی در آماده سازی قطعات اپتیکی مورد نیاز برای لیزرهای پر قدرت داشته باشند. همچنین در قطعات اپتیکی مورد نیاز برای لیزرهای پر قدرت اندازه گیری هدررفت انرژی بر اثر پراکندگی نیز بسیار مهم است [۳]. پراکندگی در این لیزرهای توان بالا، باعث اتلاف و کاهش انرژی خروجی لیزر می شود. بنابراین اندازه گیری پراکندگی از لایه های نازک ساخته شده، به منظور کاهش دادن مقدار پراکندگی بسیار ضروری است. علاوه بر آن، این قطعات باید پایداری خوبی از لحاظ تغییرات دمایی مشخصات اپتیکی داشته باشند.

### ۲. روش ساخت

نمونه ها با روش تبخیر فیزیکی با تفنگ الکترونی لایه نشانی شده است. نمونه ۱ شامل زیر لایه  $\text{BK7}$  و یک لایه نازک  $\text{ZrO}_2$  به ضخامت حدود  $300 \text{ nm}$  است و نمونه ۲ شامل زیر لایه  $\text{BK7}$  و یک لایه نازک  $\text{TiO}_2$  به ضخامت حدود  $300 \text{ nm}$  می باشد. فشار پایه محفظه در حین لایه نشانی  $\text{ZrO}_2$ ،  $10^{-5} \text{ Torr}$  و دما  $185^\circ\text{C}$  بوده است. فشار محفظه در حین لایه نشانی  $\text{TiO}_2$ ،  $10^{-5} \text{ Torr}$ ، دما  $200^\circ\text{C}$  و فشار جزئی اکسیژن،  $6 \times 10^{-5} \text{ Torr}$  بوده است. همچنین نرخ نشست  $\text{TiO}_2$  و  $\text{ZrO}_2$ ، مقدار  $0/1 \text{ nm/s}$  بوده است.

1 Total integrated scattering method

2 Beam expanding collimator

$$TS = TIS \times R \quad (۳)$$

### ۲-۳. روش AFM

در این روش از نمونه ها تصاویر AFM تهیه می شود و با استفاده از تصاویر تهیه شده زبری سطوح ( $\sigma$ ) را بدست

می آوریم. سپس با استفاده از رابطه ۴ مقدار پراکندگی کل نور برخورد کننده با طول موج  $\lambda$  برای هر سطح را به دست می آوریم.

$$TS = R \left( 4\pi\sigma / \lambda \right)^2 \quad (۴)$$

که  $\sigma$  زبری سطح، R ضریب بازتاب سطح می باشد.

### ۴. اثر زبری روی پراکندگی و آستانه تخریب

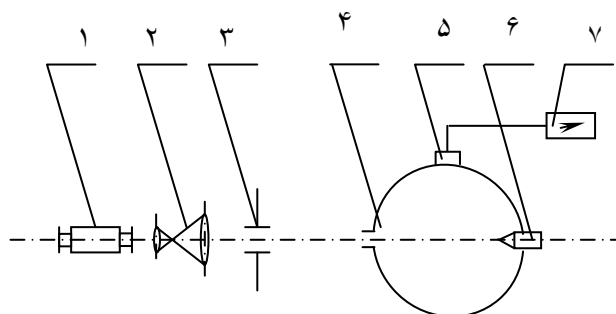
#### لیزری

برای اینکه ارتفاع سطح را بصورت آماری توصیف کنیم، از پارامتر  $\sigma$ ، یعنی زبری جذر میانگین مربعی استفاده می شود. زبری جذر میانگین مربعی از مقادیر ارتفاع در هر نقطه  $Z_n$  و ارتفاع میانگین  $\bar{Z}$  و تعداد نقاط اندازه گیری شده، طبق رابطه زیر بدست می آید [۶].

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_n - \bar{Z})^2}}{N} \quad (۵)$$

مقدار زبری به عنوان یک اثر قابل توجه روی پراکندگی شناخته شده است و توسط رابطه ۲ به مقدار پراکندگی جمعی کلی مربوط می شود.

آستانه تخریب یک سطح زبر به مساحت موثر که در معرض تابش لیزر می باشد وابسته است. زبری واقعی



۱-لیزر هلیوم-نئون ۲-پهن کننده و موازی کننده نور لیزر ۳-دیافراگم قابل تنظیم ۴-کره جمع کننده ۵-آشکارساز ۶-نمونه و مخروط بازتابنده نور ۷-ابزار نمایش

شکل ۱. آرایه اپتیکی برای اندازه گیری پراکندگی با روش TIS

پراکندگی کل ( $TS$ )<sup>۱</sup> از رابطه زیر بدست می آید:

$$TS = \frac{V_s - V_b}{V_w - V_b} \quad (۱)$$

که این مقدار برابر نسبت توان انعکاس یافته پخش شده بر اثر پراکندگی به توان برخوردی است.

مقدار پراکندگی جمعی کلی<sup>۲</sup> ( $TIS$ ) برابر نسبت توان انعکاس یافته پخش شده بر اثر پراکندگی به بازتاب کل است و از طریق رابطه ۲ به زبری جذر میانگین مربعی<sup>۳</sup> سطح ( $\sigma$ ) مربوط می شود.

$$TIS = \left( 4\pi\sigma / \lambda \right)^2 \quad (۲)$$

بین  $TS$  و  $TIS$  رابطه زیر برقرار است [۵]:

- 1 Total scattering
- 2 Total integrated scattering
- 3 Rms roughness

$$\frac{K_f}{K_{bulk}} = (1 - \varphi)^3 \quad (7)$$

که در آن  $k_{bulk}$  رسانندگی کپه ای ماده،  $k_f$  رسانندگی گرمایی لایه نازک و  $\varphi$ ، نسبت تخلخل است که می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\varphi = \frac{V_p}{V_T} \quad (8)$$

که  $V_p$  حجم منافذ و  $V_T$  حجم قسمت توپر ماده می باشد.

با توجه به رابطه (۷) با افزایش تخلخل، رسانندگی فیلم کاهش می یابد.

مقدار تخلخل در فیلم ها را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$\varphi = 1 - \left( \frac{n_{film}^2 - 1}{n_{bulk}^2 - 1} \right) \quad (9)$$

که  $n_{film}$  ضریب شکست فیلم و  $n_{bulk}$  ضریب شکست حالت کپه ای می باشد.

## ۶. نتایج و بحث

### ۶-۱. طیف عبوری

طیف عبوری لایه های نازک  $\text{TiO}_2$  و  $\text{ZrO}_2$  در شکل ۲ آمده است:

سطح بصورت قله ها و شیارهایی که بطور تصادفی روی سطح توزیع شده اند، نشان داده می شود و مساحت واقعی چنین سطحی بطور طبیعی از مساحت هندسی آن بزرگتر است و افزایش مساحت موثر به معنی افزایش شمار نواقص و میزان آلودگی روی سطح است، و افزایش نواقص و آلودگیها باعث افزایش آستانه تخریب لیزری

می شود [۷]. بنابراین افزایش زبری سطح، باعث خواهد شد که سطح زودتر تخریب شده و آستانه تخریب لیزری پایین بیاید. در مرجع ۷ رابطه میدان الکتریکی آستانه با زبری سطح به صورت رابطه زیر آمده است:

$$E_{LIDT} \propto \sigma^{-1/2} \quad (6)$$

## ۵. اثر رسانندگی گرمایی روی آستانه تخریب

### لیزری

رسانندگی گرمایی پارامتر مهمی برای پیشگویی آستانه تخریب لیزری است و لایه هایی با رسانندگی گرمایی بالاتر، مقاومت تخریبی بهتری دارند.

کاهش رسانندگی گرمایی یکی از مهمترین نتایج وجود تخلخل در ساختار لایه های نازک است و مدل های تئوری بسیاری از جمله مدل ماکسول، مدل Percolation و مدل Phonon base برای توصیف رابطه بین تخلخل و رسانندگی وجود دارد [۸].

با فرض اینکه همه منافذ در نمونه ها اندازه یکسان و توزیع تصادفی داشته باشند، مدل Percolation بهترین توصیف را دارد. در این مدل برای محیط متخلخل، رسانندگی گرمایی به صورت زیر به نسبت تخلخل مربوط می شود.

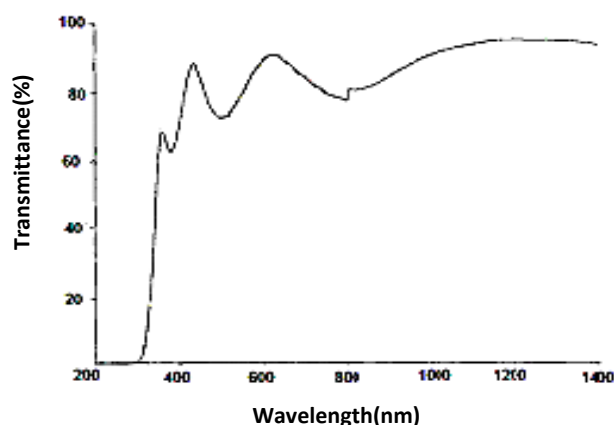
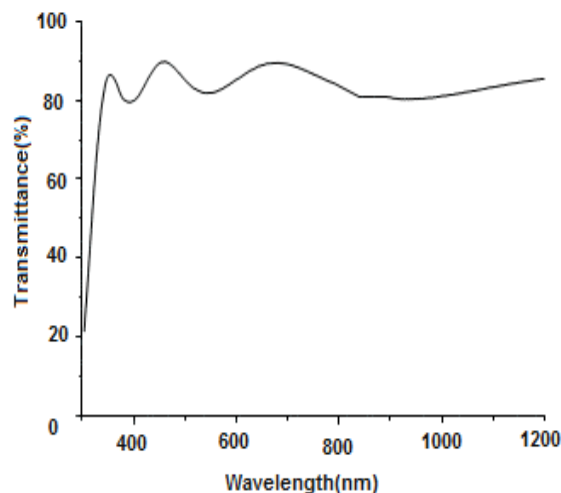
### اندازه گیری پراکندگی از روش TIS

مقدار پراکندگی کلی از دو لایه نازک  $TiO_2$  و  $ZrO_2$  با استفاده از دستگاه شکل ۱ در طول موج  $632/8$  نانومتر اندازه گیری شده است سپس، با استفاده از طیف عبوری نمونه ها (شکل ۲)، عبور (T) مربوط به هر نمونه در طول موج  $632/8$  nm به دست آمده است. با توجه به جذب بسیار پایین مواد لایه‌نشانی شده در این ناحیه مقدار بازتاب (R) را در این طول موج از رابطه  $(R=1-T)$  تعیین نموده‌ایم. سپس با استفاده از رابطه ۳ مقدار پراکندگی کلی جمع‌ی را برای دو نمونه بدست می‌آوریم که در جدول ۱ آمده است :

از مقادیر اندازه گیری شده برای پراکندگی لایه های نازک  $TiO_2$  و  $ZrO_2$  به روش TIS مشاهده می‌شود که لایه های نازک  $ZrO_2$  پراکندگی کمتری نسبت به لایه های نازک  $TiO_2$  دارد.

### ۲-۶. به دست آوردن نسبت تخلخل و رسانندگی گرمایی

با استفاده از طیف عبوری، ضریب شکست فیلمها،  $n_{film}$ ، در طول موج  $632/8$  نانومتر با استفاده از روش پوش<sup>۱</sup>، به دست آمده است، که در جدول ۲ مشاهده می‌شود. حال با داشتن ضریب شکست حالت کپه ای،  $n_{bulk}$ ، و استفاده از رابطه ۹، نسبت تخلخل  $\phi$  برای دو لایه نازک  $TiO_2$  و  $ZrO_2$  بدست آمده است، سپس با توجه به مقادیر رسانندگی گرمایی حالت کپه ای  $TiO_2$  و



شکل ۲. طیف عبوری لایه های نازک  $TiO_2$  (بالا) و  $ZrO_2$  (پایین)

جدول ۱. مقادیر پراکندگی و ضریب بازتاب و پراکندگی کلی جمع‌ی نمونه ها

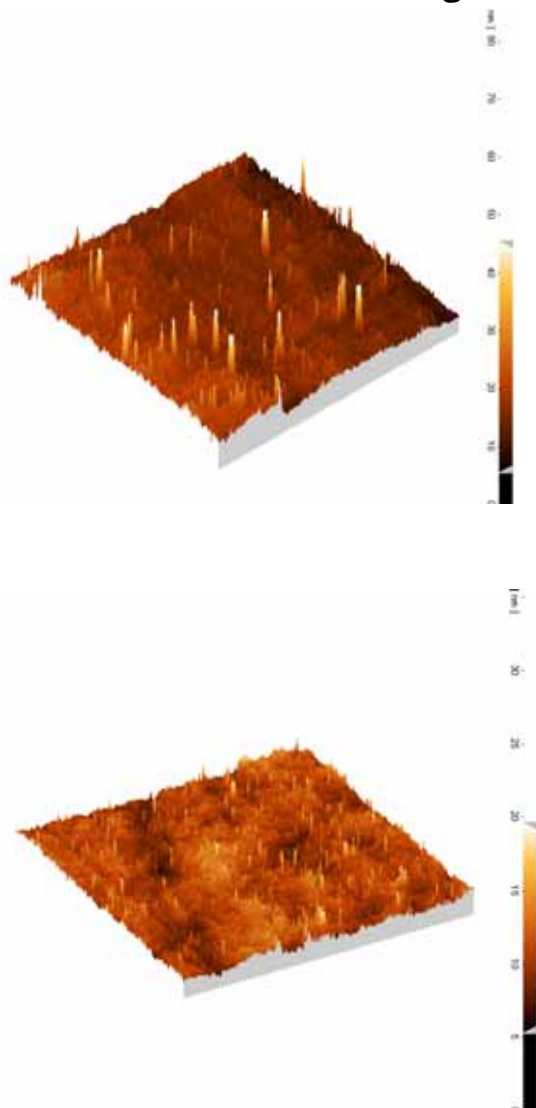
نمونه	TS	R	TIS
$TiO_2$	$1.55 \times 10^{-3}$	0.1	$1.55 \times 10^{-2}$
$ZrO_2$	$1.35 \times 10^{-3}$	0.15	$9 \times 10^{-3}$

1 Envelope method

به دست آورده ایم که در جدول ۴ آمده است.  $TS_{AFM}$  برخورد کننده با طول موج  $\lambda$  برای هر سطح را

نمونه	$TS_{AFM}$
TiO <sub>2</sub>	$1.05 \times 10^{-3}$
ZrO <sub>2</sub>	$8.2 \times 10^{-4}$

روش AFM نیز صحت اندازه گیری به روش TIS را تایید می کند.



شکل ۳: تصاویر AFM تهیه شده از لایه های نازک TiO<sub>2</sub> (بالا) و ZrO<sub>2</sub> (پایین)

$ZrO_2$ ,  $k_{bulk}$ ، و استفاده از رابطه ۷ مقدار رسانندگی گرمایی لایه ها،  $k_f$ ، به دست آمده است.

نمونه	$n_{film}$	$n_{bulk}$	$\varphi$	$K_{bulk}$	$k_{film}$
TiO <sub>2</sub>	1.94	2.58	0.51	0.083	0.010
ZrO <sub>2</sub>	1.78	2.15	0.40	0.105	0.023

### ۳-۶. به دست آوردن زبری سطح

برای هر نمونه از دو نقطه مختلف تصویر AFM تهیه گردید و با استفاده از هر تصویر زبری سطح به دست آمد. که میانگین این دو نقطه به عنوان زبری سطح هر نمونه،  $\sigma$ ، در نظر گرفته شده است که در جدول ۳ آمده است. شکل ۳ تصاویر AFM گرفته شده از لایه های نازک TiO<sub>2</sub> و ZrO<sub>2</sub> را نشان می دهد.

نمونه	$\sigma$ (nm)
TiO <sub>2</sub>	5.15
ZrO <sub>2</sub>	3.72

### ۴-۶. به دست آوردن پراکندگی از روش AFM

با استفاده از تصاویر AFM تهیه شده از نمونه ها و زبری سطوح ( $\sigma$ ) به دست آمده از تصاویر و مقدار بازتاب

به دست آمده از طیف عبوری در طول موج  $632/8nm$  و با استفاده از رابطه ۴ مقدار پراکندگی کلی نور

ضریب شکست بر اثر تغییرات دمایی بررسی شده اند، با توجه به اندازه گیری های انجام شده و بحثهای ارائه شده، مشاهده می شود که لایه نازک  $ZrO_2$  نسبت به  $TiO_2$  از پراکندگی لیزری کمتر، آستانه تخریب لیزری بالاتر و پایداری حرارتی بهتری برخوردار است، بنابراین لایه های نازک  $ZrO_2$  برای استفاده در قطعات اپتیکی لیزرهای پر توان نسبت به لایه های نازک  $TiO_2$  مناسب تر هستند.

### مراجع

- [1] Kent J. Kogler "LASER DAMAGE IN THIN FILM OPTICAL COATINGS" GACIAC SOAR 91-01
- [2] Guanglei Tian, Shigang Wu, Kangying Shu, Laishun Qin, Jianda Shao, "Influence of deposition conditions on the microstructure of oxides thin films", Applied Surface Science 253 (2007) 8782-8787
- [3] Duparré, A.; Kassam, "Relation between light scattering and the microstructure of optical thin films", S. Appl. Opt. 32, (1993), 5475-5480.
- [4] Deumié, C.; Richier, R.; Dumas, P. Amra, C., " Multiscale roughness in optical multilayers: atomic force microscopy and light scattering", Appl. Opt. 35, (1996), 5583-5594
- [5] James E. Harvey, Sven Schröder, Narak Choi, Angela Duparré, "Total integrated scatter from surfaces with arbitrary roughness, correlation widths, and incident angles", Optical Engineering 51, (2012), 013402

با توجه به مقادیر به دست آمده برای تخلخل و رسانندگی گرمایی و زبری سطح، می توان نتیجه گرفت که لایه نازک  $ZrO_2$  آستانه تخریب لیزری بالاتری نسبت به لایه نازک  $TiO_2$  دارد، زیرا همانطور که قبلا برای لایه های نازک  $ZrO_2$  و  $TiO_2$  بررسی شده است، افزایش مقدار تخلخل و کاهش رسانندگی گرمایی، همچنین افزایش زبری سطح، باعث پایین آمدن آستانه تخریب لیزری می باشد و به صورت تجربی نیز بالاتر بودن آستانه تخریب لیزری لایه نازک  $ZrO_2$  نسبت به لایه نازک  $TiO_2$  اثبات شده است [۸]. همچنین قبلا از لحاظ تئوری و تجربی آستانه تخریب لیزری لایه های نازک  $ZrO_2$  و  $TiO_2$  بررسی شده است [۹].

### ۵-۶. بررسی تغییرات ضریب شکست بر اثر تغییرات حرارتی

با توجه به اینکه در قطعات اپتیکی لیزرهای توان بالا تغییرات حرارتی زیادی وجود دارد، لازم است که تغییرات مشخصه های اپتیکی قطعات مورد استفاده بر اثر تغییرات دما اندازه گیری شود.

با توجه به پژوهش انجام شده روی لایه های نازک  $ZrO_2$  و  $TiO_2$  [۱۰] در اثر تغییرات حرارتی، تغییرات کمتری در ضریب شکست  $ZrO_2$  نسبت به  $TiO_2$  مشاهده شده است.

### ۷. نتیجه گیری

در این مقاله دو لایه نازک  $ZrO_2$  و  $TiO_2$  در راستای استفاده در قطعات اپتیکی لیزرهای پر توان از لحاظ مقدار پراکندگی و آستانه تخریب لیزری و تغییرات

- [6] American National Standard, ASME B-46.1-1995. *Surface Texture*. The American Society of Mechanical Engineers New York, USA.
- [7] RICHARD A. HOUSE, 11, JERRY R. BETTIS, AND ARTHUR H. GUENTHER, "Surface Roughness and Laser Damage Threshold" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, MAY 1977. Pp 361-363
- [8] A. Bananej et al., "The effect of porosity on the laser induced damage threshold of TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> single layer films", *Optics&LaserTechnology*42 (2010)1187-1192
- [۹] امیر حسین حسن پور، علیرضا بنانج و همکاران "بررسی تئوری و تجربی اثر ضرایب تخلخل و هدایت گرمایی بر آستانه تخریب لیزری لایه های نازک اپتیکی"، مقاله نامه کنفرانس مهندسی فوتونیک ۱۳۸۸
- [۱۰] علیرضا بنانج، سمیه امیری و همکاران، "تعیین تجربی ثوابت اپتیکی لایه های نازک TiO<sub>2</sub> و ZrO<sub>2</sub> و بررسی اثر دما بر روی منحنی پاشندگی این لایه ها"، مقاله نامه کنفرانس مهندسی فوتونیک ۱۳۸۷