



## طراحی و ساخت قطبندی لیزری $HfO_2/SiO_2$ به روش ضخامت سنجی اپتیکی برای لیزر پرتوان Nd:YAG و اندازه گیری آسیب لیزری آن

حسین زابلیان، مهدی مردیها، محمد جان نثاری و سید علیرضا فیروزی فر

دانشکده فیزیک دانشگاه اصفهان

چکیده - در این پژوهش طراحی و ساخت تیغه‌ی قطبندی لیزری برای استفاده در لیزر پرتوان Nd:YAG بررسی شده است. لایه نشانی در محفظه‌ی خلا از مرتبه‌ی  $10^{-5}$  میلی بار و توسط تفنگ الکترونی صورت گرفت. ضخامت لایه‌ها به روش ضخامت سنجی اپتیکی کنترل شد. تراگسیل نمونه‌ها به وسیله‌ی یک طیف سنج دو پرتویی در گسترده‌ی فرو سرخ نزدیک اندازه گیری شد. همچنین آزمون اندازه گیری آستانه آسیب لیزری بر طبق استاندارد ISO-11254-1 برای نمونه‌های ساخته شده از مواد  $HfO_2/SiO_2$  و  $TiO_2/SiO_2$  انجام شد. در نهایت، تیغه قطبندی لیزری با توان تفکیک  $T_p/T_s:95$  و آستانه آسیب لیزری بیش از ۷ ژول بر سانتیمتر مربع ساخته شد.

کلید واژه: آستانه آسیب لیزری، توزیع میدان الکتریکی، ضخامت سنجی اپتیکی، قطبندی لایه نازک

## Design and fabrication of $HfO_2/SiO_2$ polarizer by optical monitoring method for high power Nd:YAG Laser and measurement of laser induced damage threshold

H. Zabolian, M. Mardiha, M. Jannesari, S.A.R. Firoozifar

Faculty of Physics, Isfahan University

**Abstract:** In this research Design and fabrication of laser polarizer plate for high power Nd: YAG laser has been investigated. Thin film deposition was performed in vacuum chamber using electron gun deposition method. Optical monitoring system was used to control the thickness of thin films. Transmission spectra of coated samples was measured using a dual-beam spectrophotometer in near IR range. Also laser induced damage threshold was performed on all samples according to standard ISO-11254-1. At last, laser polarizer plate with resolution  $T_p/T_s:95$  and laser induced damage threshold more than  $7 \text{ J/cm}^2$  has been fabricated.

**Keywords:** Laser induced damage threshold, Electric field distribution, Optical monitoring, Thin film polarizer

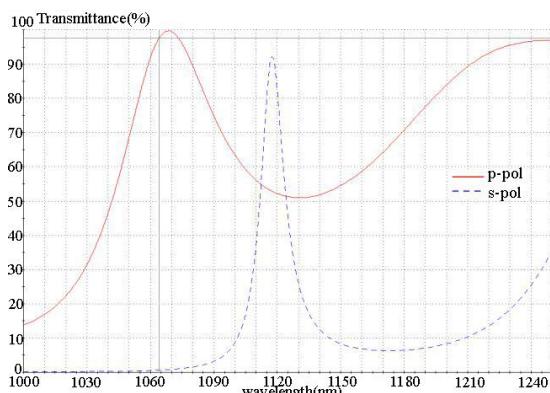
در برابر تابش های پرتوان و نیز شرایط محیطی نامناسب از مقاومت قابل قبولی برخوردار باشند.

با توجه به این ملزمومات، دی اکسید سیلیکون ( $\text{SiO}_2$ ) به عنوان ماده دارای ضریب شکست پایین و دی اکسید هاففیوم ( $\text{HfO}_2$ ) به عنوان ماده با ضریب شکست بالا با گسترهای شفافیت به ترتیب  $0.2-0.23-0.23-0.23$  میکرومتر [۳] انتخاب شدند. پس از لایه نشانی تک لایه های این دو ماده، ضرایب شکست  $\text{SiO}_2$  و  $\text{HfO}_2$  با استفاده از اندازه گیری بازتاب تک لایه ها در طول موج  $1030$  نانومتر به ترتیب  $1.43$  و  $1.98$  به دست آمد.

طراحی اولیه که با کمک نرم افزار طراحی لایه های نازک به انجام رسید به صورت زیر است:

$$\text{BK7}(\text{HL})^2\text{H2L}(\text{HL})^5(\text{HL})^2\text{H}\backslash\text{Air}$$

که در آن حرف H نشان دهنده یک چارک موج از ماده با ضریب شکست بالا یعنی  $\text{HfO}_2$  و حرف L نشان دهنده یک چارک موج از ماده با ضریب شکست پایین یعنی  $\text{SiO}_2$  است. ۲L نیز نشان دهنده ضخامت اپتیکی نیم موج از ماده  $\text{SiO}_2$  است. همانطور که مشاهده می شود این طرح شامل ۲۱ لایه است. طول موج طراحی  $1030$  نانومتر و زاویه تابش  $56$  درجه است. شکل ۱ طیف تراگسیل قطبنده که توسط نرم افزار طراحی لایه های نازک طراحی شده است را نشان می دهد.



شکل ۱: نمودار تراگسیل قطبنده طراحی شده که توسط نرم افزار طراحی لایه های نازک رسم شده است.

## ۲-۲- بهینه سازی توزیع میدان الکتریکی

از جمله عوامل تاثیرگذار بر آسیب پذیری لیزری لایه های نازک اپتیکی، توزیع میدان الکتریکی درون لایه ها و

قطبندهای لایه های نازک دی الکتریک تک طول موج از عناصر پایه در سامانه های لیزری به شمار می آید که برای تولید پرتو قطبیده خطی استفاده می شود. مبنای عملکرد این قطبنده به بروز خواص وابسته به قطبش در تابش های مایل باز می گردد. امروزه با افزایش توان لیزرها، نیاز به قطبنده های دارای توان تفکیک بالا و مقاوم در برابر انرژی لیزرها پر توان افزایش یافته است.

در این پژوهش طراحی و ساخت قطبنده تیغه ای تمام دی الکتریک  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  به روشن PVD و با استفاده از ضخامت سنجی اپتیکی مورد بحث قرار می گیرد. اندازه گیری آستانه آسیب لیزری قطعه پس از در نظر گرفتن تمهیدات مناسب در راستای افزایش آستانه آسیب پذیری، بررسی خواهد شد.

## ۲- طراحی قطبنده

برای افزایش بازتاب قطبش S و نگاه داشتن عبور قطبش P در نزدیکی واحد، مجموعه ی چند لایه از دو ماده با ضریب شکست بالا و پائین به صورت یک در میان با ضخامت های متفاوت بر بستره قرار می گیرند. محاسبات نظری مربوط به طراحی چنین مجموعه ای نسبتاً سر راست است و در اغلب کتاب های اپتیک لایه های نازک موجود می باشد [۱].

پهنهای ناحیه ای بازتاب بالا برای مجموعه قطبنده تابعی از گذارایی اپتیکی دو ماده است که وابسته به زاویه های تابش و برای قطبش های S و P متفاوت می باشد. پهنهای ناحیه ای تراگسیل بالا برای نور قطبیده P همواره از پهنهای ناحیه ای دارای بازتاب بالا برای قطبش S کوچکتر است [۲] بنابراین قطبنده تنها برای محدوده باریکی از طول موج ها می تواند عملکرد مناسبی داشته باشد. از آنجا که ضخامت سنجی به روش اپتیکی انجام می شود و به منظور افزایش دقیق اندازه گیری در حین نشانی، ضخامت اپتیکی لایه ها چارک موج یا نیم موج در نظر گرفته می شوند.

## ۲- گزینش مواد لایه نشانی

مواد انتخابی باید در ناحیه فروسرخ نزدیک شفاف بوده و چسبندگی مناسبی به بستره و یکدیگر داشته باشند و

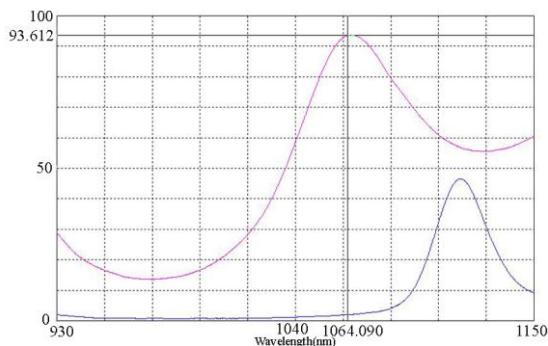
عبور قطبش S کمتر از ۷٪ درصد است.

همچنین مرز بین لایه‌ها می‌باشد [۴ و ۵].

### ۳- فرآیند ساخت

لایه نشانی به روش تبخیر فیزیکی در محفظه‌ی خلا و در حضور فشار جزئی اکسیژن، توسط تفنگ الکترونی انجام پذیرفت. پیش از لایه نشانی، بستره به کمک امواج فراصوت شسته شد و بلافاصله قبل از لایه نشانی به منظور حذف کامل آلودگی‌ها، در محفظه‌ی خلا در برابر بمباران یونی قرار گرفت. فشار پایه‌ی محفظه در حین لایه نشانی  $1 \times 10^{-5}$  میلی بار بود. نرخ انباشت لایه‌ها توسط کریستال پیزوالکتریک اندازه‌گیری شد و ضخامت سنجی به روش اپتیکی در طول موج طراحی  $10^3$  نانومتر انجام گرفت.

پس از لایه‌نشانی، طیف عبور توسط طیفسنج دو پرتویی اندازه‌گیری شد. شکل ۳ منحنی عبور پوشش ساخته شده را نشان می‌دهد. این طیف که بیانگر تفکیک کامل قطبش‌ها در طول موج  $1064$  نانومتر است پس از چندین مرحله بهینه سازی به دست آمده است. در نهایت توان تفکیک قطبنده  $T_p/T_s = 95$  اندازه‌گیری شد. از طرفی استفاده از روش ضخامت سنجی اپتیکی منجر به بهبود تکرارپذیری ساخت پوشش شد که به نوبه خود از اهمیت زیادی برخوردار است.



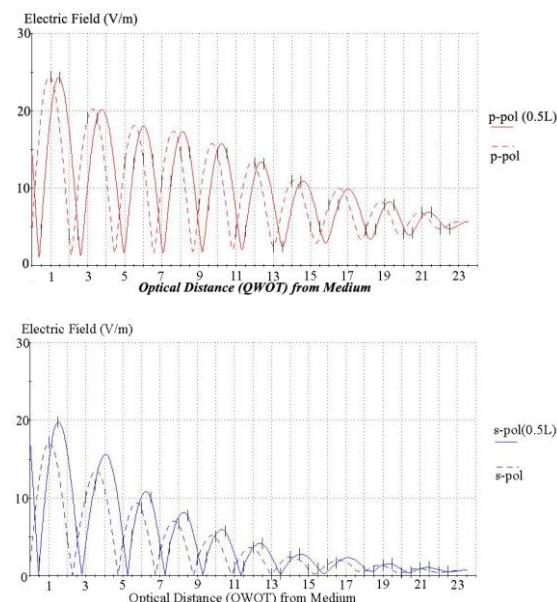
شکل ۳: نمودار تراگسیل قطبنده‌ی ساخته شده که توسط طیفسنج دو پرتویی اندازه‌گیری شده است. تفکیک قطبش در طول موج کاری قطبنده،  $T_p/T_s = 95$  است.

### ۴- اندازه‌گیری و مقایسه آستانه آسیب لیزری

برای اندازه‌گیری آستانه آسیب لیزری از چینش آزمایشگاهی منطبق بر استاندارد ISO-11254-1 استفاده گردید [۴]. آرایش نمادین این چینش در شکل ۴ مشخص شده است. پیش از انجام آزمایش، ابزارها با استفاده از لیزر

در این پژوهش سعی شده است تا با افزایش یک لایه با ضخامت مناسب و با در نظر گرفتن ویژگیهای طیفی، بیشینه‌ی میدان الکتریکی موج ایستاده در لایه‌ها به گونه‌ای تنظیم شود که آستانه آسیب قطبنده افزایش یابد.

پس از تحلیل نرم افزاری و بررسی میدان الکتریکی در درون لایه‌ها با اضافه کردن یک لایه SiO<sub>2</sub> با ضخامت نصف چارک موج توانستیم بدون ایجاد تغییر محسوسی در طیف تراگسیل قطبنده، بیشینه‌ی میدان الکتریکی در مرز لایه‌ی اول را تا اندازه‌ی زیادی کاهش دهیم. شکل (۲) نمودار میدان الکتریکی را بر حسب ضخامت اپتیکی لایه‌نشانی شده برای هردو قطبش P و S نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است کاهش اندازه‌ی میدان برای قطبش P حدود ۱۹ ولت بر متر و برای قطبش S حدود ۱۵ ولت بر متر است.



شکل ۲: نمودار تغییرات میدان الکتریکی در مجموعه‌ی ۲۲ لایه بر حسب افزایش ضخامت اپتیکی از سمت هوا. نمودار بالایی مربوط به قطبش p و نمودار پایینی مربوط به قطبش s است. خطوط عمودی کوتاه نشان دهنده‌ی مرز لایه‌ها هستند. نمودارهای پیوسته مربوط به طراحی بهینه سازی شده برای توزیع میدان الکتریکی می‌باشند.

لازم به ذکر است که پس از اضافه کردن لایه‌ی نصف چارک موج نمودار تراگسیل قطبنده تغییر محسوسی نسبت به شکل ۱ از خود نشان نمی‌دهد. در شکل ۱ عبور قطبش p در طول موج  $1064$  نانومتر بیش از ۹۷ درصد و

همچنین به علت ضریب شکست بالایی که دارد تراگسیل قطبش p را بهبود می‌بخشد اما همانطور که شکل (۵) نشان می‌دهد آستانه آسیب لیزری آن پایینتر از قطبنده‌ی ساخته شده با ماده‌ی  $HfO_2$  است.

پس از انجام این آزمون آستانه‌ی آسیب لیزری، برای نمونه ۱، مقدار  $4/۹۰$  ژول بر سانتیمتر مربع و برای نمونه ۲ مقدار  $7/۲۵$  ژول بر سانتیمتر مربع به دست آمد که با توجه به کاربرد مورد نظر، قطبنده‌ی نمونه ۲ برای به کارگیری مناسب تر ارزیابی می‌شود.

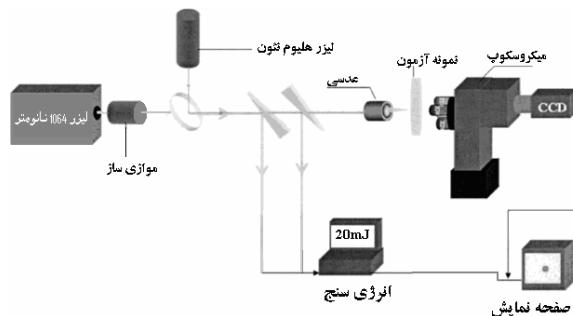
### ۵- نتیجه گیری

می‌توان با لایه‌نشانی یک مجموعه‌ی چند لایه از مواد دی الکتریک با ضرایب شکست بالا و پایین و نیز از طریق کنترل شرایط انباست، یک قطبنده با توان تفکیک بالا  $T_p/T_s:95$  ساخت. یک طراحی مجموعه بر اساس ضخامت های اپتیکی چارک موج یا نیم موج منجر به افزایش دقت اندازه گیری و بهبود تکرار پذیری فرآیند ساخت می‌شود. با کنترل توزیع میدان الکتریکی در برخی از لایه‌ها می‌توان آستانه آسیب لیزری مجموعه‌ی لایه‌ی نازک را به اندازه‌ی قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. همچنین آزمون آستانه آسیب لیزری نشان داد قطبنده‌ی ساخته شده از مواد  $SiO_2$  و  $HfO_2$  از آستانه آسیب لیزری بالایی برخوردار است و می‌توان از آن در ساخت لیزرهای پالسی پرتوان استفاده کرد.

### مراجع

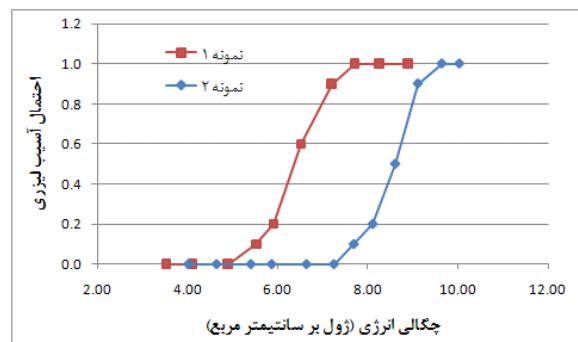
- [1] Alfered Thelen, *Design of optical interference coatings*, p. 155, McGRAW-HILL Press, New York 1989
- [2] H.Angus Macleod, J., *Thin Film Optical Filter*, p 430, CRC Press, New York (2010).
- [3] Palik, E. D., *Handbook of Optical Constants in Solids*, Academic Press (1985).
- [4] R. M. Wood, 2003, *Laser-Induced Damage of Optical Materials*, IOP Publishing Ltd.
- [5] Jagdish.Monga, *Multilayer thin film polarizer with reduced electric field intensity*, journal of modern optics, 1989, vol. 36, No 6, 769-784
- [6] H. He, Y. Zhao, G. Tian, J. Shao, Z. Fan, Overcoat dependence of laserinduced damage threshold of 355 nm HR coatings, *Appl. Surface Sci.*, Vol. 252,

هليوم-نيون هم راستا شدند. ليزر مورد استفاده يك ليزر Nd:YAG پرقدرت با نمایه پرتو شبه گاوسي بود که بيشينه‌ی انرژي آن در حالت كليدينزي Q به ۲۵۰ ميلی ژول می‌رسيد. پيش از انجام آزمایش نمایه‌ی پرتو ليزر با دستگاه Beam profiler سنجيده می‌شد تا در صورت انحراف، تنظيمات لازم انجام گردد. آزمایش در اتاق تميز انجام گرفت و نمونه از پيش به دقت تميز شده بود.



شکل ۴: آرایش نمادین چینش آزمایشگاهی آزمون آستانه آسیب لیزری.

طبق تعریف، آستانه‌ی آسیب لیزری نمونه مقداری از چگالی انرژی است که به ازای آن احتمال آسیب نمونه غیر صفر باشد [۴].



شکل ۵: نمودار احتمال آسیب لیزری قطبنده‌ها بر حسب چگالی انرژی. نمونه ۱ قطبنده‌ی ساخته شده با  $TiO_2$  و نمونه ۲ قطبنده‌ی ساخته شده با  $HfO_2$  است. از نمودار مشخص است که آستانه آسیب لیزری نمونه ۲ بیشتر از نمونه ۱ است.

در این پژوهش افرون بر قطبنده‌ی ساخته شده، قطبنده‌ی دیگری که با ترکیب  $TiO_2/SiO_2$  ساخته شده بود نیز مورد آزمایش قرار گرفت. شکل ۵ نتایج آزمون آستانه آسیب لیزری را برای دو نمونه قطبنده‌ی ساخته شده نشان می‌دهد.

ماده‌ی  $TiO_2$  یکی از مواد پرکاربرد در ساخت پوشش‌های اپتیکی است و برای ساخت قطبنده‌ها نیز به کار می‌رود