بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

# طراحی و ساخت قطبنده‌ی لیزری $HfO_2/SiO_2$ به روش ضخامت سنجی اپتیکی برای لیزر پرتوان Nd:YAG و اندازه گیری آستانه 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 قطبنده‌ی 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 گستره‌ی 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 $TiO_2/SiO_2$ و $HfO_2/SiO_2$ انجام شد. در نهایت، تیغه قطبنده‌ی لیزری با توان تفکیک $T_p/T_s$:95 وآستانه آسیب لیزری بیش از ۷ ژول بر سانتیمتر مربع ساخته شد.**

کلید واژه: آستانه‌ی آسیب لیزری، توزیع میدان الکتریکی، ضخامت سنجی اپتیکی، قطبنده‌ی 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 $\mathbf{T_p/T_s:95}$ and laser induced damage threshold more than 7 J/cm$^2$ has been fabricated.

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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]

## ۱- مقدمه

قطبنده‌ی لایه‌ی نازک دی‌الکتریک تک طول موج از عناصر پایه در سامانه‌های لیزری به شمار می‌آید که برای تولید پرتو قطبیده‌ی خطی استفاده می‌شود. مبنای عملکرد این قطبنده به بروز خواص وابسته به قطبش در تابش‌های مایل باز می‌گردد. امروزه با افزایش توان لیزرها، نیاز به قطبنده‌های دارای توان تفکیک بالا و مقاوم در برابر انرژی لیزرهای پر توان افزایش یافته است.

در این پژوهش طراحی و ساخت قطبنده تیغه‌ای تمام دی‌الکتریک $HfO_2/SiO_2$ به روش PVD و با استفاده از ضخامت‌سنجی اپتیکی مورد بحث قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری 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 قطبشS و نگاه داشتن عبور قطبش P در نزدیکی واحد، مجموعه‌ی چندلایه از دو ماده با ضریب شکست بالا و پائین به صورت یک در میان با ضخامت‌های متفاوت بر بستره قرار می‌گیرند. محاسبات نظری مربوط به طراحی چنین مجموعه‌ای نسبتاً سر راست است و در اغلب کتاب‌های اپتیک لایه‌ی نازک موجود می‌باشد[۱].

پهنای ناحیه‌ی بازتاب بالا برای مجموعه‌ی قطبنده تابعی از گذارایی اپتیکی دو ماده است که وابسته به زاویه‌ی تابش و برای قطبش‌های S و P متفاوت می‌باشد. پهنای ناحیه‌ی تراگسیل بالا برای نور قطبیده‌ی P همواره از پهنای ناحیه‌ی دارای بازتاب بالا برای قطبش S کوچک‌تر است[۲] بنابراین قطبنده تنها برای محدوده‌ی باریکی از طول موج‌ها می‌تواند عملکرد مناسبی داشته باشد. از آنجا که ضخامت سنجی به روش اپتیکی انجام می شود و به منظور افزایش دقت اندازه گیری در حین لایه نشانی، ضخامت اپتیکی لایه ها چارک موج یا نیم موج در نظر گرفته می شوند.

### ۲-۱- گزینش مواد لایه نشانی

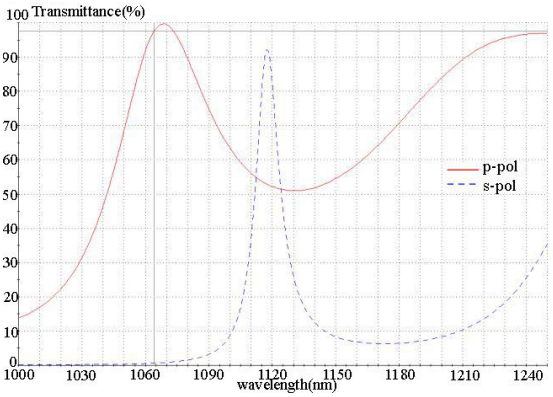
مواد انتخابی باید در ناحیه‌ی فروسرخ نزدیک شفاف بوده و چسبندگی مناسبی به بستره و یکدیگر داشته باشند و در برابر تابش های پرتوان و نیز شرایط محیطی نامناسب از مقاومت قابل قبولی برخوردار باشند.

با توجه به این ملزومات، دی‌اکسید سیلیکون ($SiO_2$) به عنوان ماده‌ی دارای ضریب شکست پایین و دی‌اکسید هافنیوم ($HfO_2$) به عنوان ماده‌ی با ضریب شکست بالا با گستره‌ی شفافیت به ترتیب ۹-۰٫۲ و ۸-۰٫۲۳ میکرومتر [۳] انتخاب شدند. پس از لایه نشانی تک لایه های این دو ماده، ضرایب شکست $SiO_2$ و $HfO_2$ با استفاده از اندازه گیری بازتاب تک لایه ها در طول موج ۱۰۳۰ نانومتر به ترتیب ۱٫۴۳ و ۱٫۹۸ به دست آمد.

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

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

که در آن حرف H نشان دهنده‌ی یک چارک موج از ماده‌ی با ضریب شکست بالا یعنی $HfO_2$ و حرف L نشان دهنده‌ی یک چارک موج از ماده‌ی با ضریب شکست پایین یعنی $SiO_2$ است. 2L نیز نشان دهنده‌ی ضخامت اپتیکی نیم موج از ماده‌ی $SiO_2$ است. همانطور که مشاهده می شود این طرح شامل ۲۱ لایه است. طول موج طراحی ۱۰۳۰ نانومتر و زاویه تابش ۵۶ 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 لایه‌ها و

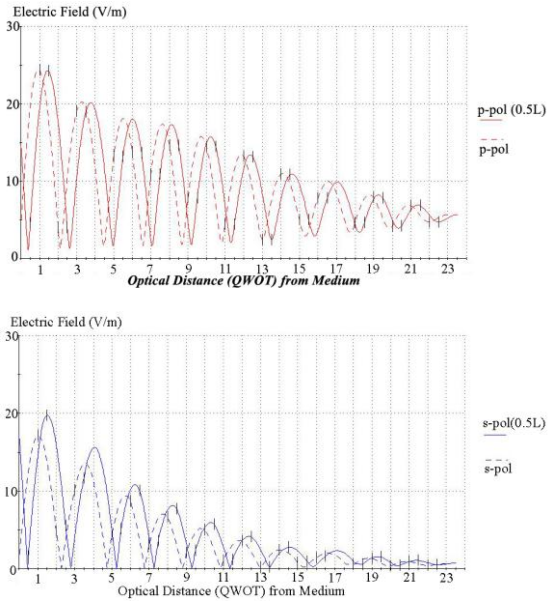


[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]

همچنین مرز بین لایه‌ها می‌باشد[۴و ۵ و ۶].

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 لایه‌ی SiO2 با ضخامت نصف چارک موج توانستیم بدون ایجاد تغییر محسوسی در طیف تراگسیل قطبنده، بیشینه‌ی میدان الکتریکی در مرز لایه ی اول را تا اندازه ی 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 اندازه ی میدان برای قطبش P حدود ۱۹ ولت بر متر و برای قطبش S حدود ۱۵ ولت بر متر است.



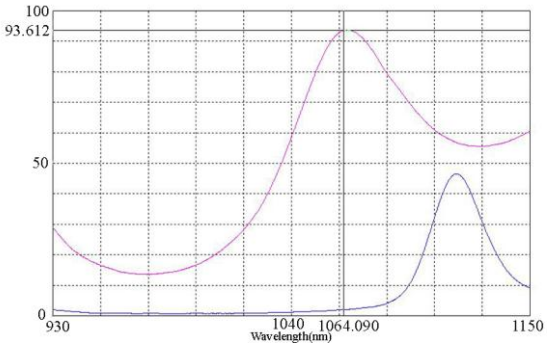

شکل۲: نمودار تغییرات میدان الکتریکی در مجموعه ی ۲۲ لایه برحسب افزایش ضخامت اپتیکی از سمت هوا. نمودار بالایی مربوط به قطبش p و نمودار پایینی مربوط به قطبش s است. خطوط عمودی کوتاه نشان دهنده ی مرز لایه ها هستند. نمودارهای پیوسته مربوط به طراحی بهینه سازی شده برای توزیع میدان الکتریکی می باشند.

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 ۱۰۶۴ نانومتر بیش از ۹۷ درصد و عبور قطبش s کمتر از ۰/۷ درصد است.

## ۳- فرآیند ساخت

لایه نشانی به روش تبخیر فیزیکی در محفظه ی خلأ 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 لایه‌نشانی به منظور حذف کامل آلودگی ها، در محفظه ی خلأ در برابر بمباران یونی قرار گرفت. فشار پایه‌ی محفظه در حین لایه نشانی $۱\times۱۰^{-۵}$ میلی بار بود. نرخ انباشت لایه‌ها توسط کریستال پیزوالکتریک اندازه‌گیری شد و ضخامت سنجی به روش اپتیکی در طول موج طراحی ۱۰۳۰ نانومتر انجام گرفت.

پس از لایه‌نشانی، طیف عبور توسط طیف‌سنج دو پرتویی اندازه‌گیری شد. شکل۳ منحنی عبور پوشش ساخته شده را نشان می‌دهد. این طیف که بیانگر تفکیک کامل قطبش‌ها در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر است پس از چندین مرحله بهینه سازی به دست آمده است. در نهایت توان تفکیک قطبنده $\mathbf{T_p/T_s:95}$ اندازه گیری 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.




شکل۳: نمودار تراگسیل قطبنده ی ساخته شده که توسط طیف سنج دو پرتویی اندازه گیری شده است. تفکیک قطبش در طول موج کاری قطبنده، $T_p/T_s$:95 است.

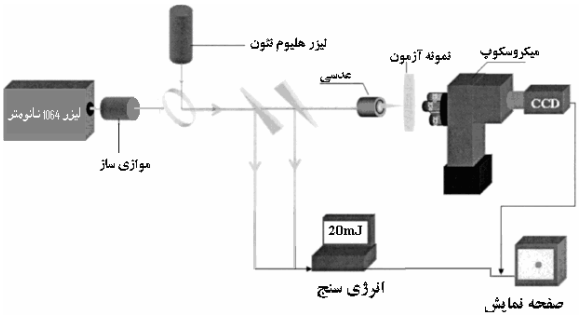
## ۴- اندازه گیری و مقایسه آستانه آسیب لیزری

برای اندازه گیری 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



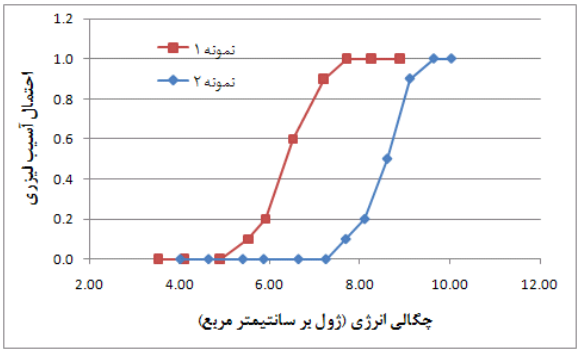
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]

هلیوم-نئون هم راستا شدند. لیزر مورد استفاده یک لیزر Nd:YAG پرقدرت با نمایه پرتو شبه گاوسی بود که بیشینه‌ی انرژی آن در حالت کلیدزنی Q به ۲۵۰ میلی ژول می‌رسید. پیش از انجام آزمایش نمایه‌ی پرتو لیزر با دستگاه Beam profiler سنجیده می‌شد تا در صورت انحراف، تنظیمات لازم انجام گردد. آزمایش در اتاق تمیز انجام گرفت و نمونه از پیش به دقت تمیز شده بود.




شکل۴: 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].




شکل۵: نمودار احتمال آسیب لیزری قطبنده ها 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 افزون بر قطبنده‌ی ساخته شده، قطبنده‌ی دیگری که با ترکیب $TiO_2/SiO_2$ ساخته شده بود نیز مورد آزمایش قرار گرفت. شکل۵ نتایج آزمون آستانه آسیب لیزری را برای دو نمونه قطبنده‌ی ساخته شده نشان می-دهد.

ماده‌ی $TiO_2$ یکی از مواد پرکاربرد در ساخت پوشش‌های اپتیکی است و برای ساخت قطبنده‌ها نیز به کار می‌رود همچنین به علت ضریب شکست بالایی که دارد تراگسیل قطبش p را بهبود می‌بخشد اما همانطور که شکل (۵) نشان می دهد آستانه آسیب لیزری آن پایینتر از قطبنده-ی ساخته شده با ماده‌ی $HfO_2$ است.

پس از انجام این آزمون آستانه‌ی آسیب لیزری، برای نمونه ۱، مقدار۴/۹۰ ژول بر سانتیمتر مربع و برای نمونه ۲ مقدار ۷/۲۵ 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 انباشت، 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*, jornal 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,



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04 ]