

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 آینهی تمام دیالکتریک دوگانهی لیزری ۱۰۶۴ و ۵۳۲ نانومتر

محمد جان نثاری، حسین زابلیان، مهدی مردیها، علیرضا فیروزیفر و محمد محمود ورپایی

دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده – در این پژوهش طراحی و ساخت آینهی دوگانهی لیزری تمام دیالکتریک لایهی نازک برای طولموجهای ۱۰۶۴ و ۵۳۲ نانومتر در زاویهی عمود و برای لیزرهای پالسی گزارش شده است. این آینهی ۳۰ لایهای بر بسترهی شیشهی BK7 طراحی و ساخته شده و به کمک پرتو الکترونی و استفاده از ضخامتسنج کریستالی در محفظهی با خلأ پایه از مرتبه ی <sup>5-</sup>۱۰ میلی بار لایهنشانی شده است. طراحی این مجموعه به گونهای انجام شده که توزیع میدان اکتریکی در سطوح بین لایهای کمینه گردد و بنابراین آستانه آسیب لیزری آن نیز افزایش یابد. با انجام بهینهسازیهای مناسب، میزان عبور در طول موج ۱۰۶۴ و ۵۳۲ نانومتر در طیف نهایی به کمتر از ۳٫۰٪ کاهش یافته است.

کلید واژه- آینه دو گانهی لیزری تمام دی الکتریک، آستانه آسیب لیزری، بسترهی BK7

# Design and fabrication of dual wavelength all-dielectric laser mirror at 532 and 1064 nm

Hosein Zabolian, Mohammad Jannesari, Mehdi Mardiha, Alireza Firoozifar and Mohammad Mahmood Varpaei

Faculty of Physics, Isfahan University

Abstract. In this research we report design and fabrication of all dielectric thin film laser mirror at wavelengths 1064 and 532 nm for pulse lasers and for incident angle of 90 degree. This 30 layers mirror was deposited on BK7 substrate with base pressure in order  $10^{-6}$  mbar by using Electron gun and crystal monitoring. This stack was designed to reduce electric field at first interface and therefore to increase laser induced damage threshold. By suitable refinement finally we found that transmission was reduced to less than %0.3 at wavelengths 1064 and 532 nm.

Keywords: thin film all dielectric mirror, laser induced damage threshold, BK7 Substrate

#### ۱– مقدمه

آینههای تمام دیالکتریک لایهی نازک، از عناصر پایه در سامانههای لیزری به شمار میآیند. سختی و پایداری محیطی مناسب و فقدان جذب در طول موجهای لیزری باعث شده که از این آینههای مشدد، در لیزرهای پرتوان استفاده گردد. مبنای عملکرد آینههای تمام دیالکتریک به پدیدهی تداخل امواج در لایههای نازک باز میگردد. با الهام از این ویژگیها و با لایهنشانی مجموعهی لایهی نازک با ضرایب شکست و ضخامت مناسب میتوان ابزار بازتابندهی کامل را تولید نمود. آینههای تمام دیالکتریک برای بازهی مشخص طول موجی که میتواند از UV تا IR را دربر گیرد

و برای زاویه فرود معین طراحی و استفاده می شوند [۱]. با وجود پیشرفتهای زیاد در ساخت سامانههای لیزری، نیاز به آینههای تمام دی الکتریک با دو طول موج بازتاب افزایش یافته است. آینه های دو گانه، برای لیزرهایی که از یکی از هارمونیک های خود در مسیر پرتو یکسان استفاده می کند لازم می باشد. در این پژوهش، طراحی و ساخت بازتابنده ی تمام دی الکتریک بر بستره ی شیشه ی BK7 توصیف می شود. نشان داده خواهد شد که این مجموعه، در طول موجهای نشان داده.

## ۲- طراحی

آینهی تمام دیالکتریک، مجموعهی چند لایهای از دو ماده با ضرایب شکست بالا و پائین میباشد که یک در میان در کنار یکدیگر قرار گرفتهاند. در صورتی که حتی ضرایب انعکاس فرنل از مرز لایهها کوچک باشد، تداخل سازندهی پرتوهای منعکس شده از تعداد زیاد مرزها، انعکاس زیاد در طول موج طراحی را فراهم میآورد. در عمومی و سادهترین طراحی، مقادیر ضخامت اپتیکی همهی لایهها برابر چارک-موج طول موج طراحی میباشد. این طرح، بیشترین انعکاس تعداد لایههای مجموعهی بازتابنده، به انعکاس مورد نظر و اختلاف ضرایب شکست دو ماده بستگی دارد. پهنای ناحیهی بازتاب نیز تابع اختلاف ضریب شکست دو ماده است. محاسبات نظری مربوط به طراحی چنین میباشد[۲].

طراحی آینهی دوگانه که در دو طولموج لیزری انعکاس بالا داشته باشد از طراحیهای مشکل به شمار میآید. برای داشتن دو ناحیهی انعکاس بالا، لازم است که دو مجموعهی چارک موجی در کنار یکدیگر قرار گیرند. هر مجموعه، انعکاس بیشینه در یک طول موج را فراهم می آورد. در صورتی که چینش لایهها مناسب نباشد، ریپلهای غیر قابل کنترل در طرح ایجاد می شود. نسبت ضخامتهای دو مجموعه باید از نسبت طول موجهای هدف بیشتر باشد زیرا در طولموجهای بلندتر، ضریب شکست لایهها کاهش می-یابد. در طراحی آینه باید این نکته لحاظ شود که برای جلوگیری از تنشهای مضر در لایهها، لازم است که مجموعهها در یک پروسه و بر روی یکدیگر لایهنشانی شوند. ویژگیهای مجموعه لایههای دیالکتریک را میتوان با نرم افزارهای شبیهسازی لایههای نازک بررسی نمود. این نرم افزارها بر روش ماتریسی که هر ماتریس ۲×۲ به یک لایه نسبت داده می شود بنا شده است. می توان ویژگی های عبور، انعكاس، توزيع ميدان الكتريكي و ... مجموعه لايهها را از ماتریس حاصلضرب همهی ماتریسها محاسبه و بهینه نمود نمود.

#### ۲-۱ انتخاب مواد

مواد انتخابی باید در ناحیهی مادون قرمز نزدیک و مرئی شفاف بوده، چسبندگی مناسبی به بستره و یکدیگر داشته باشند و در فرود انرژیهای بالا و شرایط محیطی نامناسب از مقاومت قابل قبولی برخوردار بوده و بین ضرایب شکستشان اختلاف هر چه بیشتر وجود داشته باشد.

با توجه به این ملزومات، دی اکسید سیلیکون (SiO<sub>2</sub>) و دی اکسید تیتانیوم (TiO<sub>2</sub>) به ترتیب به عنوان مواد با ضریب شکست پایین و بالا و با گسترهی شفافیت به ترتیب ۹–۲٫۲ و ۲۲–۲۹٫۹ میکرومتر [۳] انتخاب شدند. این ترکیب در میان مواد اکسیدی مورد استفاده در کاربردهای لیزری بیشترین اختلاف ضریب شکست را دارا می باشد. SiO2 بهترین ماده از نظر مقاومت لیزری شناخته می شود [۴]. برای شناخت دقیق نظر مقاومت لیزری شناخته می شود [۴]. برای شناخت دقیق طراحی، به انباشت تک لایه های این دو ماده نیازمندیم. با انجام محاسبه ای که در قسمت ۳ خواهد آمد، ضرایب شکست OS و SiO2 در طول موج ۲٫۳۸ نانومتر، به ترتیب ۱٫۴۹

با طراحی و بهینهسازی توسط نرمافزار طراحی لایههای نازک، طرح نهایی ۲۹ لایه، به دست آمد. ترتیب و ضخامت اپتیکی لایهها به صورت زیر میباشد:

 $BK7/(2.14 TiO_2/2.14 \ SiO_2)^7/2.14 TiO_2/( \ SiO_2/TiO_2)^7/Air$ 

طول موج مرجع طراحی، ۵۳۲ نانومتر و زاویه یتابش، عمود در نظر گرفته شده است. در این زاویه، انعکاس در طول موجهای ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر به ترتیب برابر ۹۹٬۹ و ۹۹٬۸ می باشد.

#### ۲-۲ بررسی توزیع میدان الکتریکی

از عوامل مؤثر بر آستانه آسیب پذیری لیزری پوششهای لایه ازک، توزیع میدان الکتریکی در سطوح بین لایه ای میباشد[۵]. به دلیل انعکاسی بودن این مجموعه، تخریب لیزری به دامنه میدان در سطح مقطع لایه ی مجاور هوا بستگی بیشتر دارد[۵]. توزیع میدان الکتریکی مجموعه، در شکل ۱ آورده شده است. از این شکل واضح است که بیشینه میدان در طرح ۲۹ لایه، در اولین مرز 2OiT و SiO قرار دارد. با توجه به اینکه ناخالصی و در نتیجه بیشترین آسیب پذیری در این مرز میباشد، لازم است که بیشینه به گونه ای که ویژگی طیفی مجموعه نیز مختل نشود جابجا گردد. این کار با قرار دادن لایه ی SiO در مجاورت هوا با ضخامت چهار برابر چارک موج طول موج طراحی انجام می شود بنابراین طرح نهایی را میتوان به صورت زیر نوشت:

 $BK7/(2.14 TiO_2/2.14 \ SiO_2)^7/2.14 TiO_2/(\ SiO_2/TiO_2)^7/4 SiO_2/Air$ 



شکل۱) تغییرات میدان الکتریکی در مجموعهی ۲۹ لایه با افزایش ضخامت اپتیکی. خطوط عمود، مرز لایهها هستند. بیشینهی میدان الکتریکی، در اولین مرز لایهی SiO<sub>2</sub> و TiO میباشد. این منحنی به کمک نرم افزار طراحی لایههای نازک تهیه شده است.



شکل۲) تغییرات میدان الکتریکی در مجموعه ۳۰ لایه نسبت ضخامت اپتیکی. خطوط عمود، مرز لایهها را معین میکنند.



شکل۳) منحنیهای خطچین و پیوسته به ترتیب، بازتاب و تراگسیل از مجموعهی ۳۰ لایه بر بستره BK7، با لحاظ اثرات سطح دوم را نمایش میدهد. کلیهی طراحی و شبیهسازیها توسط نرم افزار طراحی لایههای نازک انجام شده است.

چنانچه در شکل ۲ مشاهده می شود با افزودن لایه ی SiO2 چنانچه در شکل ۲ مشاهده می شود با افزودن لایه SiO2 و SiO2 مینه شدت میدان الکتریکی در اولین مرز TiO2 و SiO2 کمینه شده و به مقدار صفر رسیده است. این پدیده منجر به بهبود توزیع میدان الکتریکی به نفع افزایش آستانهی آسیب خواهد شد.

محاسبات نرمافزاری نشان میدهد که با لایهنشانی مجموعهی ۳۰ لایه، طیف بازیاب و تراگسیل با لحاظ اثر بازتاب سطح دوم بسترهی BK7، به صورت شکل ۳ خواهد بود.

## ۳- فرآیند ساخت

لایهنشانی به روش تبخیر فیزیکی در محفظهی خلأ و در حضور فشار جزئی اکسیژن، توسط تفنگ الکترونی انجام پذیرفت. قبل از لایهنشانی، قطعات به کمک مواد شیمیایی و

در حضور امواج فراصوت شستشو داده شده و بلافاصله قبل از لایهنشانی به منظور حذف کامل آلودگیها، در محفظهی خلاً در معرض بمباران یونی قرار گرفتند. خلاً پایهی محفظه در حین لایهنشانی، <sup>۶</sup>-۱۰×۳ میلیبار در نظر گرفته شد. ضخامت و نرخ انباشت لایهها توسط کریستال پیزوالکتریک اندازه گیری شدند.

گام نخست در ساخت یک پوشش اپتیکی، ساخت تکلایهها میباشد. پارامترهای انباشت تک لایههای SiO<sub>2</sub> و TiO در جدول ۱ آورده شده است. با بهینهسازی ضخامت و اصلاح فرایند لایهنشانی به کمک نرم افزار طراحی، ضخامتهای چارکموج در طول موج ۵۳۲ نانومتر به دست آمد. این ضخامت برای SiO<sub>2</sub> و SiO<sub>1</sub> به ترتیب ۸۳/۹ و ۵۵/۵۱ نانومتر میباشد. با استفاده از رابطهی ۱ [۵] میتوان ضریب شکست لایهی نازک را در طول موج بیشینه و یا کمینهی طیف به دست آورد:

$$n_{\rm f} = ((1+(R)^{1/2})/(1-(R)^{1/2}))^{1/2} n_{\rm s}^{1/2}$$
(1)

که در آن، n<sub>s</sub> و n<sub>f</sub> به ترتیب ضرایب شکست بستره و لایه نازک و R درصد بازتاب در بیشینه یا کمینه هستند. با لحاظ ضخامت اپتیکی هر لایه و نیز ضخامت چارکموچ مواد، ضخامت فیزیکی هر لایه در مجموعهی ۳۰ لایه به دست آمد و فرآیند لایهنشانی با این ضخامتها انجام پذیرفت. در انجام این پروسه، پارامترهای جدول ۱ برای هر ماده دقیقاً لحاظ گردیدند. پس از لایهنشانی، طیف عبور ماده دقیقاً لحاظ گردیدند. پس از لایهنشانی، طیف عبور توسط یک طیفسنج دو پرتویی اندازه گیری شد. شکل ۴ منحنی عبور پوشش ساخته شده را نشان میدهد. این طیف که بیانگر انعکاس کامل در طول موجهای ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر است پس از چندین مرحله بهینه سازی و حذف خطاهای متقارن و غیر متقارن حین انباشت به دست آمد.

جدول ۱) پارامترهای انباشت تکلایهها.

مادہ	نرخ انباشت (nm/s)	فشار جزئی اکسیژن (mbar)	دما (C°)
SiO <sub>2</sub>	٠٫٧۵	۲×۱۰ <sup>-۴</sup>	۲۵۰
TiO <sub>2</sub>	• ، ۲۵	۱/۵×۱۰ <sup>-۴</sup>	۲۵۰



شکل۴) طیف عبور اندازهگیری شده از نمونه توسط طیف سنج دو پرتویی. عبور در طول موجهای ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر نزدیک به صفر میباشد.

## ۴- نتیجه گیری

می توان با لایه نشانی یک مجموعه ی چند لایه از مواد که یکی از آن ها ضریب شکست بالا و دیگری ضریب شکست پایین داشته باشند و کنترل شرایط انباشت، انعکاس کامل در طول موجهای ۵۳۲ و ۱۰۶۴ نانومتر را فراهم آورد. با افزودن یک لایه با ضخامت چهار برابر چارک موج طول موج طراحی، می توان توزیع میدان الکتریکی در لایه ی مجاور هوا را به نفع افزایش آستانه ی آسیب لیزری مجموعه ی لایه ی نازک افزایش داد. در صورت اجرای پروسه در شرایط یکسان، پروسه تکرار پذیری مناسبی دارد.

## مراجع

- Alfered Thelen, *Design of optical interference coatings*, p. 87, McGRAW-HILL Press, New York 1989
- [2] H.Angus Macleod, J., *Thin Film Optical Filter*, p 209, CRC Press, New York (2010).
- [3] Palik, E. D., Handbook of Optical Constants in Solids, Academic Press (1985)
- [4] J.Kogler, Laser Damage In Thin Film Optical Coatings, Published by GACIAC IIT Reasech Institutee, Chicagi, 1992,
- [5] H. A. Macleod, *Thin film optical filters*, p. 74, (IOP publishing, 2002).