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

طراحی و ساخت آینه پاشنده TiO_2/SiO_2 به روش تبخیر پرتو الکترونی

حسین سلطانی سامانی، مرتضی حاجی محمودزاده، حمیدرضا فلاح، مهدی مردیها و صدیقه ملک‌محمدی

گروه فیزیک دانشگاه اصفهان

چکیده - در این پژوهش طراحی و ساخت آینه پاشنده برای جبران پاشندگی ناشی از محیط لیزر و اجزای اپتیکی بررسی شده است. لایه نشانی در محفظه ای از خلا از مرتبه 10^{-6} میلی بار و توسط تفنگ الکترونی صورت گرفت . نمونه‌ها با طیف سنج دو پرتویی و تداخل سنج فابری پرو مشخصه یابی شدند. در پایان، آینه پاشنده با بازتابندگی بالا ($R>$ ۹۹,۷ ٪) و پاشندگی تاخیر گروه $-50\ fs^2$ با پهنای باند متوسط در ناحیه طیفی ۷۷۰ تا ۸۳۰ نانومتر ساخته شد .

کلید واژه- آینه پاشنده، پاشندگی، جبران پاشندگی، پاشندگی تاخیر گروه .

Design and fabrication of TiO_2/SiO_2 chirped mirrors by electron beam evaporation method

H. Soltani samani, M. Hajimahmoodzadeh, H.R Fallah, M. Mardiha, S. Malekmohamadi

Physics department, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract- In this research design and fabrication of chirped mirrors for dispersion compensation has been investigated. Thin film deposition was performed in vacuum chamber using electron gun deposition method. The coatings were characterized by dual-beam spectrophotometer and white light interferometry. Finally, the moderate bandwidth TiO_2/SiO_2 chirped mirrors have been designed and manufactured with very high reflectance (R>99.7%) and GDD = -50 fs^2 in the wavelength range of 770–830 nm.

Keywords: Chirped mirror, dispersion, dispersion compensation, Group delay dispersion

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

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

۱- مقدمه

آینه‌های پاشنده[1] به طور گسترده برای کنترل پاشندگی در اپتیک فوق سریع استفاده می‌شوند. این آینه‌ها معمولا برای جبران پاشندگی داخل کاواک در لیزرهای فمتوثانیه استفاده می‌شوند. در تکنولوژی لیزرهای با تپ کوتاه، پاشندگی موادی مانند تیتانیوم-یاقوت که برای تولید بهره در این لیزرها به کار می‌روند، عامل اصلی محدودیت در تولید تپ‌های کوتاه است. آینه‌های پاشنده می‌توانند برای جبران این محدودیت به کار گرفته شوند. مبنای عملکرد این آینه‌ها به گونه‌ای است که نور در طول موج های متفاوت به مقادیر متفاوتی در ساختار آینه نفوذ می‌کند و تاخیر گروه[2]های (GD) متفاوتی را می‌پذیرد. این پدیده اثر محیط بهره لیزر و آینه‌ها را جبران می‌کند و تپ مجددا کوتاه می‌شود. آینه‌های پاشنده کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف دارند از جمله این کاربردها می توان به تقویت تپ چرپ[3](CPA) و جبران پاشندگی اشاره کرد.

در این پژوهش طراحی و ساخت آینه پاشنده دی‌الکتریک از مواد TiO_2/SiO_2 به روش تبخیر با پرتو الکترونی انجام شده است.

۲- نظریه آینه پاشنده

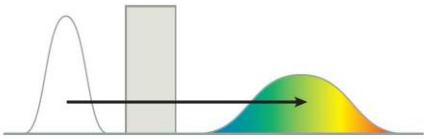
تپ نوری از تعداد زیادی مولفه‌های فرکانسی تشکیل شده است. در محیط پاشنده، مولفه‌های فرکانسی با سرعت‌های متفاوتی حرکت می‌کنند. پهنای تپ نوری هنگام عبور از مولفه‌های اپتیکی توسط فرآیندی به نام پاشندگی سرعت گروه[4] (GVD) تغییر می‌کند و تپ چرپ[5] می‌شود.

هنگامی که یک تپ نوری از یک مجموعه چند لایه ای با لایه‌های متناوب ضریب شکت بالا و ضریب شکست پایین(آینه لیزر) منعکس می‌شود و یا از یک محیط عبور می‌کند، تغییر فازی بین تپ نوری اولیه و تپ نوری منعکس شده به وجود می‌آید که به بسامد وابسته است. به طور کلی تغییر فاز $\varphi(\omega)$ در نزدیکی بسامد مرکزی ω_0 به صورت زیر بسط داده می‌شود :

$$\varphi(\omega)=\varphi(\omega_0)+\varphi'(\omega_0)(\omega-\omega_0)+\frac{1}{2}\varphi''(\omega_0)(\omega-\omega_0)^2 + \frac{1}{6}\varphi'''(\omega_0)(\omega-\omega_0)^3+\dots \quad (۱)$$

در معادله (۱) مشتق‌ها عبارت اند از : مشتق مرتبه اول تاخیر گروه(GD)، مشتق مرتبه دوم پاشندگی تاخیر گروه[6](GDD) و مشتق مرتبه سوم، پاشندگی مرتبه سوم[7](TOD). تجزیه و تحلیل ریاضی تغییر فاز تپی که از محیط عبور کرده است یا به وسیله یک آینه منعکس شده است، نشان می‌دهد که خواص فیزیکی اصلی توصیف کننده این پدیده پاشندگی تاخیر گروه GDD و مرتبه سوم پاشندگی TOD هستند و این خواص هستند که باعث پهنای تپ لیزر می‌شوند[۱, ۲]. اگر تغییر فاز در سرتاسر پهنای باند تپ نسبت به بسامد خطی باشد (GD≠0، TOD=0،GDD=0)، تپ منعکس شده با یک تاخیر گروه ثابت به تعویق می‌افتد و طیف تپ بدون آشفتگی می‌ماند. اگر GDD≠0 باشد دو اثر مهم مشاهده می‌شود. در اثر اول پهنای تپ منعکس شده تغییر می‌کند و این تغییر فقط به مقدار GDD بستگی دارد و در اثر دوم این تپ چرپ می‌شود به این معنی که بسامد لحظه ای آن در طول تپ تغییر می‌کند. این اثر به علامت GDD بستگی دارد، به طوری که بسامد لحظه ای ممکن است افزایش یابد (GDD>0، چرپ مثبت) یا کاهش یابد (GDD<0، چرپ منفی). TOD طول تپ و شکل تپ را تعیین می‌کند و عامل مهمی در پالس‌های ۲۰فمتوثانیه و کوتاه تر از آن است.

GDD مثبت طول موج‌های کوتاهتر را نسبت به طول موج‌های بلندتر کند می‌کند، این تاخیر منجر به گسترش زمانی تپ نوری می‌شود(شکل ۱).



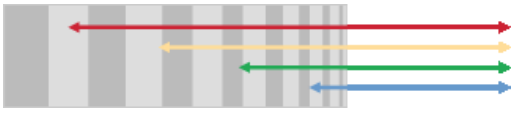
شکل ۱: پهن شدگی تپ با عبور از محیط نوری با GDD متبت[۱].

می‌توان GDD مثبت را با استفاده از GDD منفی جبران کرد. آینه‌های پاشنده دارای پوشش چند لایه‌ی دی الکتریک ویژه‌ای هستند. آنها طول موج های کوتاه تر را از

[1] Dispersion Mirror
[2] Group Delay
[3] Chirped Pulse Amplification
[4] Group Velocity Dispersion
[5] Chirped pulse
[6] Group Delay Dispersion
[7] Third Order Dispersion

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

لایه‌های نزدیک به سطح ساختار منعکس می‌کنند، در حالی که اجازه می‌دهند طول موج‌های بلند تر قبل از اینکه منعکس شوند به لایه‌های عمیق تر نفوذ کنند (شکل ۲).



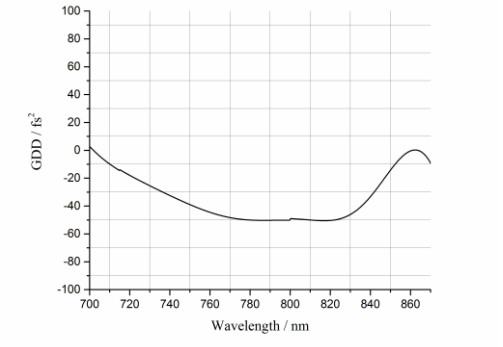
شکل ۲: قاعده عملکرد آینه چرپ. طول موج‌های بلند به عمق بیشتری داخل ساختار آینه نفوذ می‌کنند و تاخیر بیشتری را می پذیرند.

۳- گزینش مواد لایه نشانی

اختلاف ضریب شکست مواد ضریب شکست بالا و ضریب شکست پایین در دستیابی به ناحیه بازتاب بالا اهمیت زیادی دارد. برای تولید تپ‌های کوتاه تر به آینه‌های چرپ پهن باند با بازتابندگی بالا نیاز داریم. معمولا برای آینه های چرپ از Nb_2O_5 Ta_2O_5 TiO_2 و HfO_2 برای ماده با ضریب شکست بالا و SiO_2 برای ماده با ضریب شکست پایین استفاده می‌کنند[۳]. ضریب شکست دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) و دی اکسید سیلیکون (SiO_2) در طول موج ۸۰۰ نانومتر به ترتیب برابر با ۲,۱۸ و۱,۴۳ است که دارای اختلاف زیادی هستند. (نحوه محاسبه در بخش۵) از دیگر ویژگی‌های این دو ماده می‌توان به شفافیت، پایداری محیطی و چسبندگی خوب این دو ماده به هم اشاره کرد. با توجه به این ملزومات این دو ماده به عنوان مواد با ضریب شکست بالا و پایین انتخاب شدند.

۴- طراحی و بهینه سازی

هدف از این پژوهش طراحی آینه پاشنده با پهنای باند متوسط (۶۰ نانومتر) مورد نیاز برای تولید تپ زیر ۵۰ فمتوثانیه است. پوشش‌های نوری هم بر دامنه و هم بر فاز نور فرودی اثر می‌گذارند. در طراحی آینه‌های پاشنده فاز نور فرودی در نظر گرفته شده و تغییرات آن بررسی می‌شود و با تنظیم مناسب پارامترهای آینه، این فاز به شکل مورد نیاز تغییر داده می‌شود. در آینه‌های پاشنده ضخامت لایه‌ها تحت عنوان رابطه ای به نام قانون‌چرپ[۸] تغییر می‌کند. در این پژوهش از قانون چرپ ارائه شده در مرجع [۴] استفاده کرده‌ایم. چندین لایه نزدیک بستره چارک موج هستند، زیرا به آینه‌های با بازتاب بالا نیاز داریم و بعد از آن لایه‌های چرپ قرار دارد. محاسبات طراحی با نرم افزار طراحی لایه نازک انجام شده است. هدف، طراحی GDD برابر با fs^2 ۵۰- در ناحیه طول موجی ۷۷۰ تا ۸۳۰ نانومتر است. طراحی در طول موج مرکزی ۸۰۰ نانومتر انجام شد. طراحی اولیه دارای GDD صفر در مرکز ناحیه مورد نظر و افت‌وخیزهای زیادی در منحنی GDD بود. با استفاده از بهینه سازی ضخامت لایه‌ها به روش بهینه سازی سوزنی[۹]، در پایان به یک طراحی ۲۲ لایه ای با مجموع ضخامت تقریبا ۳میکرومتر رسیدیم. TiO_2 ماده با ضریب شکست بالا و SiO_2 ماده با ضریب شکست پایین و بستره از جنس شیشه BK7 است. نمودار GDD نظری آینه طراحی شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: منحنی شبیه سازی شده برای GDD .

همانطور که در شکل دیده می‌شود نمودار GDD طراحی شده دارای افت وخیزهایی کمتر از fs^2 ۵ حول مقدار مورد نظر (GDD = -50 fs^2) می‌باشد.

۵- فرآیند ساخت

لایه نشانی در محفظه ای از خلا و در حضور اکسیژن توسط تفنگ الکترونی انجام پذیرفت. پیش از لایه نشانی بستره توسط امواج فراصوت شسته شد و به منظور حذف کامل آلودگی‌ها قطعات در محفظه‌ی خلا تحت بمباران یونی قرار گرفت. فشار پایه در حین لایه نشانی $۱۰^{-۵}$ میلی بار بود و ضخامت سنجی به روش کریستالی انجام گرفت. پیش از انجام لایه نشانی به منظور تعیین ضریب شکست دقیق مواد و ضریب دستگاه[۱۰] لایه نشانی تک لایه انجام گردید، با استفاده از روابط[۲] و از روی طیف بازتاب ضرایب شکست مواد تعیین گردید.

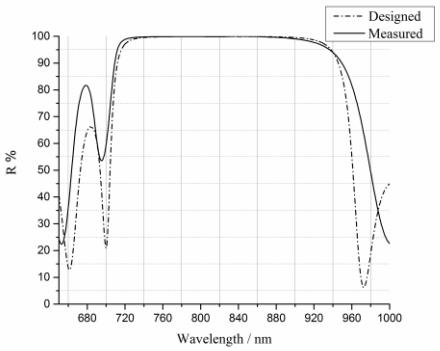
[8] Chirp Law

[9] Needle Optimization

[10] Tooling Factor

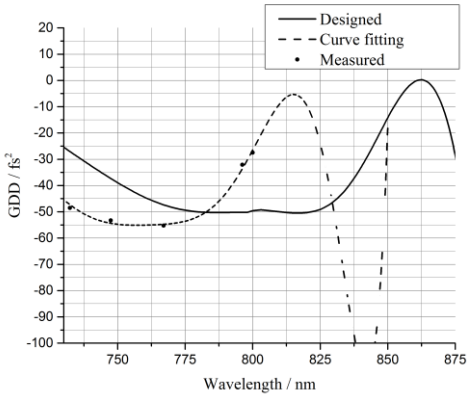
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

پس از لایه نشانی طیف عبور توسط طیف سنج دو پرتویی و GDD آینه توسط تداخل سنج فابری‌پرو اندازه‌گیری شد. نتایج تجربی در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۴ نمودار بازتابندگی آینه را در ناحیه مورد نظر نشان می‌دهد. با توجه به شکل، بازتابندگی طراحی شده و اندازه گیری شده انطباق خوبی با یکدیگر دارند و بازتابندگی بالای ٪۹۹,۷ است.



شکل ۴: منحنی‌های بازتابندگی طراحی شده و اندازه گیری شده .

شکل ۵ نمودار GDD اندازه گیری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵: منحنی GDD اندازه گیری شده .

همانطور که از شکل ۵ پیداست منحنی‌های طراحی شده و اندازه گیری شده با هم اختلاف دارند. با توجه به شبیه سازی های انجام شده دریافتیم که آینه‌های پاشنده به تغییر ضخامت لایه‌ها بسیار حساس هستند. برطبق پژوهش های انجام شده ضخامت‌سنجی به روش کریستالی نسبت به روش اپتیکی خطای بیشتری دارد[۳].همچنین SiO_2 ماده خوش رفتاری نیست و نرخ انباشت آن تغییرات زیادی دارد و این نیز باعث خطا در اندازه‌گیری ضخامت‌ها می‌شود. با این حال تلاش‌های اولیه برای ساخت آینه پاشنده نسبتا موفقیت آمیز بوده است.

۶- نتیجه گیری

با لایه نشانی یک مجموعه چند لایه ای از مواد دی الکتریک با ضرایب شکست بالا و پایین (TiO_2/SiO_2) آینه پاشنده با پهنای باند متوسط با بازتابندگی بالا (بیشتر از ٪۹۹,۷) و افت وخیزهای نسبتا خوب در منحنی GDD در ناحیه طول موج ۷۷۰ تا ۸۳۰ نانومتر طراحی و ساخته شد. در محفظه لایه نشانی بسترهارا در سه موقعیت متفاوت نسبت به بوته‌ها قرار دادیم، بعد از اندازه‌گیری و محاسبات لازم مشخص شد این تغییر موقعیت، تاثیر چشمگیری در GDD ندارد و فقط بازه مورد نظر به سمت طول موج‌های کمتر جابجا می‌شود. به منظور تکرار پذیری فرآیند ساخت، لایه نشانی چند لایه چند بار تکرار شد و نتایج نشان داد که طراحی و لایه نشانی از تکرار پذیری بالایی برخوردار است.

انتظار می‌رود ایده ارائه شده در این پژوهش گامی به سمت ساخت آینه‌های چرپ با منحنی‌های GDD تخت تر و پهنای باند بزرگتر برای شامل شدن تپ‌هایی در ناحیه ۲۰ فمتوثانیه و کمتر از آن باشد.

سپاسگزاری

مولفین از تحصیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان به خاطر حمایت‌هایشان قدردانی می‌نمایند.

۷- مراجع

[1]. M. C. T. Bahaa E. A. Saleh, *Fundamentals of Photonics* (John Wiley & Sons,Inc, New Jersey, 2007).

[2]. H. A. MacLeod, "Thin-Film Optical Filters," in *Thin-Film Optical Filters*(CRC Press, New York, 2010).

[3]. Z. Jinlong, C. Xinbin, W. Zhanshan, J. Hongfei ,and D. Tao, "HfO2/SiO2 chirped mirrors manufactured by electron beam evaporation," **Appl. Opt**. 50, C388-C391 (2011).

[4]. F. X. Kärtner, N. Matuschek, T. Schibli, U. Keller, H. A. Haus, C. Heine, R. Morf, V. Scheuer, M. Tilsch, and T. Tschudi, "Design and fabrication of double-chirped mirrors," **Opt. Lett**. 22, 831-833 (1997).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]