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

اندازه‌گیری پاشندگی تاخیر گروه آینه‌های پاشنده توسط تداخل‌سنجی فابری-پرو

صدیقه ملک‌محمدی [۱]، حسین سلطانی سامانی[۱]، مهدی موسوی[۳]، مرتضی حاجی محمودزاده[۱و۲]، حمیدرضا فلاح[۱و۲]، مهدی مردیها[۱]

[۱] گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان

[۲] گروه پژوهشی اپتیک کوانتومی دانشگاه اصفهان

[۳]گروه فیزیک، دانشگاه شیراز

چکیده – در این مقاله با استفاده از تداخل‌سنجی فابری-پرو به اندازه‌گیری پاشندگی تاخیر گروه آینه‌های چند لایه‌ای پرداختیم. در این روش آینه‌های پاشنده لیزری یکی از آینه‌های تداخل‌سنج را تشکیل می‌دهد، سپس با استفاده از الگوی کمینه‌ها و بیشینه‌های طیفی ایجاد شده، پاشندگی تاخیر گروه این آینه‌ها با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌شود. در این مقاله توانستیم با بهینه ساختن فاصله آینه‌های تداخل‌سنج، این کمیت را با دقت $\pm 5\ fs^2$ محاسبه کنیم.

کلید واژه- پاشندگی تاخیر گروه، تداخل‌سنج فابری-پرو.

Measurement of Group Delay Dispersion of Dispersive Mirrors by a Fabry-Perot Interferometer

S. Malekmohamadi [1], H. Soltani Samani[1], M. Mousavi [3], M. Hajimahmoodzade [1,2], H.R Fallah [1,2] and M. Mardiha[1]

[1]Physics department, University of Isfahan, Isfahan, Iran

[2]Quantum Optics Research Group, University of Isfahan

[3]Physics department, University of Shiraz, Shiraz, Iran

Abstract- In this paper the group delay dispersion (GDD) of some laser mirrors was measured by a Fabry-Perot interferometer (FPI). For this purpose, the Fabry-Perot interferometer was formed by dispersive mirrors. Then GDD of these mirrors was calculated by using of determining the spectral position of transmission maxima or reflection minima. In this paper, an accuracy of better than $\pm 5\ fs^2$ was obtained by optimizing the mirrors distance of FPI.

Keywords: Fabry-Perot Interferometer, Group Delay Dispersion.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

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

۱- مقدمه

با توسعه لیزرهای فوق کوتاه فمتوثانیه و کوتاهتر مشخص شد که پاشندگی تاخیر گروه (GDD: Group Delay Dispersion) آینه‌های چند لایه‌ای، بر ماندگاری زمانی و ساختار فازی تپهای فوق کوتاه تاثیر بسزایی دارد [۱و۲]. آینه‌های یک لیزر فمتوثانیه علاوه بر آنکه باید دارای بازتابندگی بالا باشند، باید دارای پاشندگی جزیی در گستره طیفی مورد نیاز باشند. اخیرا پاشندگی درون بازآواگر لیزری توسط یک جفت آینه چیرپ دی الکتریک کنترل می شود که می‌توانند یک GDD منفی نسبتا تخت در یک گستره طیفی پهن ایجاد کنند که باعث می‌شود تپهای زیر 10 فمتوثانیه در گستره فروسرخ نزدیک و ناحیه مریی تولید شود[۲]. گرچه منحنی‌های پاشندگی آینه‌های دی الکتریک میتواند از هندسه چند لایه‌ای آن محاسبه شود اما اندازه‌گیری تجربی آن ضروری است زیرا بنابه دلایل گوناگون آینه‌ها دقیقا مشابه پارامترهای طراحی شده ساخته نمی‌شوند [۲و۳]. چند روش برای اندازه‌گیری GDD چنین آینه هایی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش تداخل سنجی فابری-پرو، تداخل سنجی نور سفید بروش مایکلسون (WLI) و تداخل سنجی جیرس-تورنویز(GTI) اشاره کرد [۳]. ما در این مقاله توسط روش تداخل‌سنجی فابری-پرو به اندازه‌گیری GDD آینه‌های ساخته شده پرداخته‌ایم. GDD این آینه‌ها با دقت خوبی محاسبه شد که نتایج آن در ادامه متن نشان داده شده است.

۲- بررسی نظری

یک آینه دی‌الکتریک که فاز نور بازتابیده را به اندازه $\phi(\omega)$ جابه‌جا می‌کند را در نظر می‌گیریم. اگر چنین آینه‌ای بخشی از یک تداخل‌سنج فابری-پرو (FPI) با فاصله بین دو آینه h (خلا) را تشکیل دهد، بیشینه‌های عبوری ازFPI در بسامد معین به $\phi(\omega)$ وابسته خواهد بود و به طور کلی می‌تواند از رابطه زیر بدست آید[۴]:

$$\delta(\omega)=2\left[\frac{\mathrm{h}\cos\alpha}{\mathrm{c}}\omega+\phi(\omega)\right]=2\pi i \qquad (۱)$$

که i مرتبه تداخل ، α زاویه فرود و c سرعت نور در خلا است. بنابراین از موقعیت طیفی بیشینه‌های عبوری همسایه، جابه‌جایی فازی و تاخیر گروه τ آینه(GD) می‌تواند محاسبه شود[۴]:

$$\begin{aligned}\tau(\omega_{i,i-1})&=\left.\frac{d\phi}{d\omega}\right|_{\omega_{i,i-1}}\\&\approx\frac{\phi(\omega_i)-\phi(\omega_{i-1})}{\omega_i-\omega_{i-1}}=-\frac{h\cos\alpha}{c}+\frac{\lambda_i\lambda_{i-1}}{2c(\lambda_i-\lambda_{i-1})}\end{aligned} \qquad (۲)$$

که $\omega_{i,i-1}=(\omega_i+\omega_{i-1})/2$. به دلیل اینکه این روش بر تداخل چند-پرتویی استوار است، انتظار می‌رود که بازآوایی تیزتر باعث دقت بالاتری شود. دقت اندازه‌گیری FPI توسط خطای $\lambda\Delta$ در اندازه‌گیری طول‌موج تعیین می‌شود. این خطا را می‌توان به این صورت توضیح داد که موقعیت دقیق بیشینه‌های عبوری (یا کمینه‌های بازتابی) FPI، بالاتر از یک شدت ویژه قابل اندازه‌گیری نیست. می‌توان نشان داد که خطای اندازه‌گیری تاخیر گروه به ازای یک فاصله بهینه برای آینه‌های تداخل‌سنج (h)کمینه می‌شود [۴]. این مقدار بهینه در عمل به آینه‌های تداخل‌سنج و گستره طیفی مورد بررسی وابسته است. با استفاده از رابطه ۲ می‌توان GDD آینه‌ها را بصورت زیر محاسبه کرد[۴]:

$$\begin{aligned}GDD&=\left.\frac{d\tau}{d\omega}\right|_{\omega_i}\approx\frac{\tau(\omega_{i+1,i})-\tau(\omega_{i,i-1})}{\omega_{i+1,i}-\omega_{i.i-1}}\\&=\frac{1}{2\pi c^2}\times\left(\frac{\lambda_{i+1}\lambda_{i-1}}{\lambda_{i-1}-\lambda_{i+1}}\right)\left(\frac{\lambda_{i+1}\lambda_i}{\lambda_{i+1}-\lambda_i}-\frac{\lambda_i\lambda_{i-1}}{\lambda_i-\lambda_{i-1}}\right)\end{aligned} \qquad (۳)$$

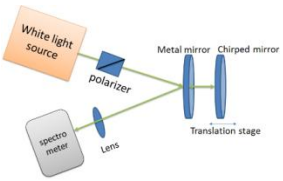
بدست آوردن مقدار دقیق h دراین آزمایش به دلیل اثرات پاشندگی آینه‌های تداخل‌سنج ممکن نیست. اما در رابطه‌ی ۳ هیچ‌گونه وابستگی به مقدار دقیق h وجود ندارد و نیازی به محاسبه این کمیت نیست. همین امر یکی از برتری‌های این روش محسوب می‌شود.

۳- چیدمان آزمایشگاهی

برای اندازه‌گیری GDD آینه‌های پاشنده توسط تداخل‌سنجی فابری پرو بسته به میزان بازتابندگی این آینه‌ها می‌توان از آرایش عبوری یا آرایش بازتابی استفاده کرد. در آرایش بازتابی اگر بازتابندگی یکی از آینه‌ها تقریبا ۱۰۰٪ باشد و آینه دیگر، بخشی بازتابنده باشد این تداخل‌سنج، جیرس-تورنویز نامیده می‌شود. در چنین تداخل‌سنجی کمینه‌های جذبی در طیف بازتاب شده از تداخل‌سنج

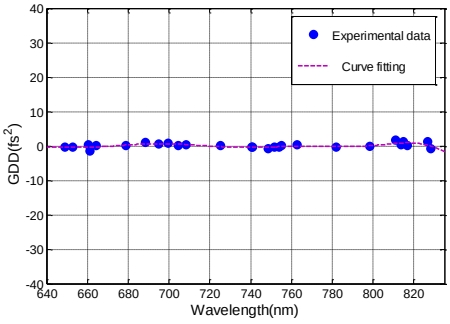
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

دیده می‌شود. در این مقاله به دلیل بالا بودن درصد بازتابندگی آینه‌های ساخته شده، از تداخل‌سنجی جیرس-تورنویز استفاده کردیم(شکل ۱).



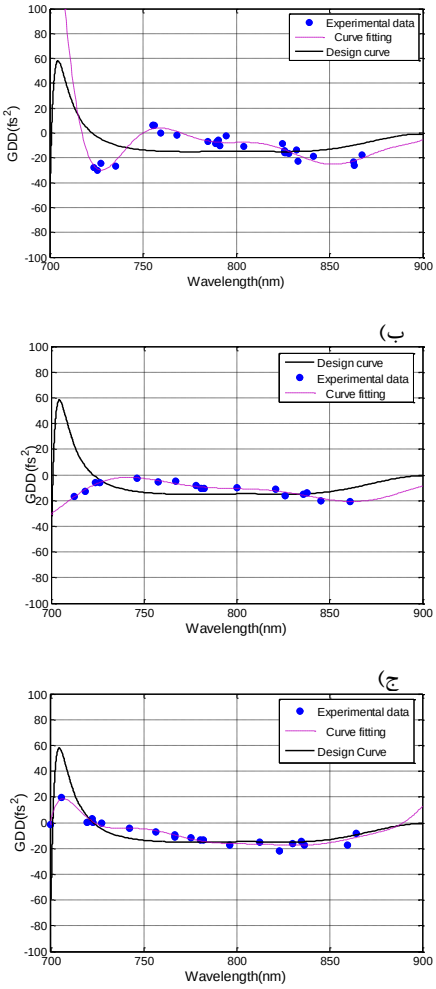
شکل ۱: الگوی شماتیک تداخل سنج جیرس-تورنویز

در این چیدمان از یک لامپ هالوژن با گستره طیفی مناسب و شدت کافی در گستره ۶۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر استفاده کردیم. یکی از آینه‌های تداخل‌سنج یک آینه آلومنیوم با بازتابندگی نزدیک ۸۰٪ (دلیل گزینش این آینه اثرات پاشندگی بسیار جزیی و نزدیک به صفر آن است) و آینه دیگر یک آینه پاشنده با درصد بازتاب بالاتر از ۹۹,۵٪ است. می‌توانستیم این آینه‌ها را توسط پایه تنظیم میکرومتری جابه‌جا کنیم و تعداد کمینه‌ها را کم یا زیاد کنیم. الگوی تداخلی و کمینه‌های ناشی از تداخل-سنج را در چندین حالت توسط طیف نگار ذخیره کرده و توسط هر سه کمینه پی‌درپی یک داده از GDD در گستره طول‌موجی مورد نظر را بدست آوردیم. مکان دقیق کمینه‌ها به لرزش‌های پس زمینه بسیار حساس است. بنابراین فراهم کردن شرایط آزمایشی مناسب برای کاهش لرزش‌های مکانیکی ضروری است.



شکل ۲: نمودار GDD اندازه‌گیری شده برای آینه‌های آلومینوم

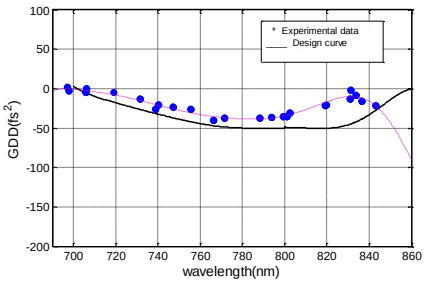
آزمایش اندازه‌گیری GDD را برای سه دسته آینه گوناگون انجام دادیم. دسته اول شامل آینه‌های آلومنیوم با GDD نزدیک به صفر، دسته دوم آینه‌های با GDD کم (نزدیک ۱۵fs^2-) در گستره ۷۵۰ تا ۸۵۰ نانومتر و دسته سوم آینه‌های با GDD بالاتر(نزدیک ۵۰fs^2-) در گستره ۷۸۰تا ۸۲۰ نانومتر است. نمودار GDD اندازه‌گیری شده برای این آینه‌ها در شکل‌های زیر نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ داده‌های تجربی بدست آمده برای آینه‌های آلومنیوم، اثرات پاشندگی ناچیز و نزدیک به صفر این آینه‌ها را کاملا تایید می‌کند.



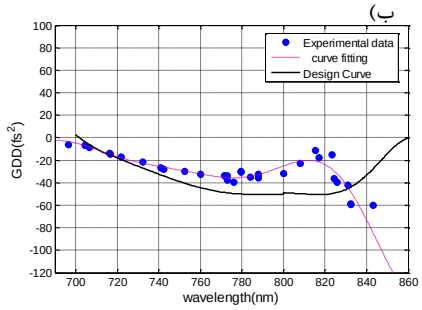
شکل ۳: نمودار GDD طراحی (خط پیوسته) و اندازه‌گیری شده (نقاط و نمودار برازش خط چین) برای آینه با پاشندگی کم در موقعیت‌های لایه‌نشانی الف)نزدیک، ب)میانه و ج)دور.

هر گروه از آینه‌های پاشنده، از سه نوع آینه با موقعیت لایه‌نشانی گوناگون (که آنها را موقعیت نزدیک، میانه و دور می‌نامیم) تشکیل شده است. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیریGDD این آینه‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. دقت آزمایش در این روش برابر $\pm 5fs^2$ اندازه‌گیری شد.

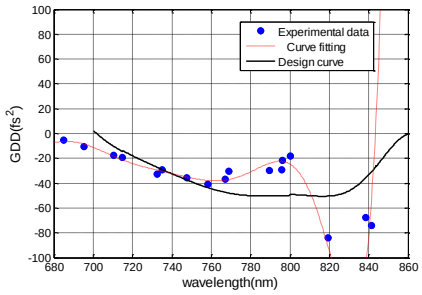
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]



ب)



ج)



شکل ۴: نمودار GDD طراحی (خط پیوسته) و اندازه‌گیری شده (نقاط و نمودار برازش خط چین) برای آینه با پاشندگی بالاتر در در موقعیت‌های لایه‌نشانی الف)نزدیک، ب)میانه و ج)دور.

همانطور که از نمودارها پیداست منحنی‌های GDD طراحی و اندازه‌گیری شده با هم اختلاف دارند. آینه‌های پاشنده به تغییر ضخامت لایه‌ها بسیار حساس هستند. مهمترین دلیل این اختلاف، دقت ضخامت‌سنجی دستگاه لایه‌نشانی و نیاز به کنترل دقیق این نمونه‌ها است. یک جابه‌جایی طول‌موج منظم به سمت طول موج‌های کمتر برای منحنی GDD اندازه‌گیری شده در این آینه‌ها مشاهده می‌شود. همانگونه که دیده می‌شود این جابجایی طول‌موج برای هر دو دسته آینه پاشنده دیده می‌شود. این جابجایی طول‌موج به دلیل موقعیت متفاوت بسترها نسبت به بوته‌ها در محفظه‌ی لایه نشانی است. روش رایج دیگر اندازه‌گیری GDD، معمولا روش تداخل‌سنجی مایکلسون است که در این روش به الگوریتم‌های برازش (*fitting*) نمودار و پردازش داده سنگین نیاز است. اما همانگونه که از نمودارها مشاهده می‌شود، روش FPI به هیچ نوع عملیات محاسباتی پیچیده‌ای نیاز ندارد و داده‌ها مستقیما و در زمان کوتاهی از آزمایش بدست می‌آید.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله پاشندگی تاخیر گروه (*GDD*) آینه‌ها به روش تداخل‌سنجی *FPI* و با کمینه کردن خطای اندازه-گیری با دقت بالایی ($\pm 5fs^2$) محاسبه شد. در این روش مقادیر GDD مستقیما از داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آید بدون اینکه به هیچ نوع الگوریتم برازش توابع چند جمله‌ای همچون روش مایکلسون نیاز باشد. بنابراین به دلیل عدم نیاز به اندازه‌گیری دقیق فاصله بین آینه‌ها و همچنین سرعت اندازه‌گیری بالای این روش(بدلیل نداشتن هیچگونه الگوریتم محاسباتی پیچیده) نسبت به روش‌های دیگر برتری دارد.

مراجع

[1] Trubetskov M., Pechmann M., Angelov I., Vodopyanov K., Krausz F., and Pervak V., *Measurements of the group delay and the group delay dispersion with resonance scanning interferometer*, **Opt. Exp.** 21 (2013) 6658-6669.

[2] Anastassia G., Markus H., Ruediger P., and Ursula K., *Noise-related resolution limit of dispersion measurements with white-light interferometers*, **Journal of the Optical Society of America B.** 22 (2005) 1868.1874.

[3] Yan-zhi W., Jian-da S., Wei-li Z., Chao-yang W., Jian-bin H., Yun-xia J. and Zheng-xiu F., *Investigation of the errors of thickness and refractive index in manufacturing Gires–Tournois interferometer negative-dispersion mirrors*, **J. Opt. A: Pure Appl. Opt.** 11 (2009)1464-1468.

[4] Osvay K., Kurdi G., Hebling J., Kov´ acs A. P., and Bor Z., *Measurement of the group delay of laser mirrors by a Fabry–Perot interferometer*, **Opt. Lett.** 20 (1995) 2339-2341.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]