

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

اندازه گیری پاشندگی تاخیر گروه آینههای پاشنده توسط تداخلسنجی فابری-پرو

صدیقه ملکمحمدی ^۱، حسین سلطانی سامانی^۱، مهدی موسوی^۲، مرتضی حاجی محمودزاده^{۲۹۱}، حمیدرضا فلاح^{۲۹۱}، مهدی مردیها^۱

^۱ گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان

^۲ گروه پژوهشی اپتیک کوانتومی دانشگاه اصفهان

^۳گروه 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 ±5 fs محاسبه کنیم.

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

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

S. Malekmohamadi¹, H. Soltani Samani¹, M. Mousavi³, M. Hajimahmoodzade^{1,2}, H.R Fallah^{1,2} and M. Mardiha¹

¹Physics department, University of Isfahan, Isfahan, Iran

²Quantum Optics Research Group, University of Isfahan

³Physics 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 ± 5 fs² was obtained by optimizing the mirrors distance of FPI.

Keywords: Fabry-Perot Interferometer, Group Delay Dispersion.

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 تیهای فوق کوتاه تاثیر بسزایی دارد [۲و۲]. 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 می شود 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 اندازه گیری تجربی آن ضروری است زیرا بنابه دلايل گوناگون آينهها دقيقا مشابه پارامترهاي طراحی شده ساخته نمی شوند [۲و۳]. چند روش برای اندازه گیری GDD چنین آینه هایی وجود دارد که از آن جمله می توان 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 اندازه گیری 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 دی الکتریک که فاز نور بازتابیده را به اندازه (ω) جابه جا می کند را در نظر می گیریم. اگر چنین آینه ای بخشی از یک تداخل سنج فابری-پرو (FPI) با فاصله بین دو آینه h (خلا) را تشکیل دهد، بیشینه های عبوری از FPI در بسامد معین به $(\omega)\phi$ وابسته خواهد بود و به طور کلی می تواند از رابطه زیر بدست آید [۴]:

$$\delta(\omega) = 2 \left[\frac{h \cos \alpha}{c} \omega + \phi(\omega) \right] = 2\pi i \qquad (1)$$

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) می-تواند محاسبه شود[۴]:

$$\tau(\omega_{i,i-1}) = \frac{d\phi}{d\omega}\Big|_{\omega_{i,i-1}}$$
$$\approx \frac{\phi(\omega_i) - \phi(\omega_{i-1})}{\omega_i - \omega_{i-1}} = -\frac{h\cos\alpha}{c} + \frac{\lambda_i\lambda_{i-1}}{2c(\lambda_i - \lambda_{i-1})}$$
(7)

که $2/(1-\omega_i + \omega_{i-1}) = (\omega_i + \omega_{i-1})$ به دلیل اینکه این روش بر تداخل چند-پرتویی استوار است، انتظار می ود که بازآوایی تیزتر باعث دقت بالاتری شود. دقت اندازه گیری FPI توسط خطای $\Delta \Delta$ در اندازه گیری طول موج تعیین می شود. این خطا را می توان به این صورت توضیح داد که موقعیت دقیق بیشینه های عبوری (یا کمینه های بازتابی) GDI بالاتر از یک شدا برسی وابسته است. با استفاده از شود [۴]. این مقدار بهینه در عمل به آینه های تداخل سنج و گستره طیفی مورد بررسی وابسته است. با استفاده از رابطه ۲ می توان GDD آینه ها را بصورت زیر محاسبه کرد[۴]:

$$GDD = \frac{d\tau}{d\omega} \bigg|_{\omega_{i}} \approx \frac{\tau(\omega_{i+1,i}) - \tau(\omega_{i,i-1})}{\omega_{i+1,i} - \omega_{i,i-1}} \\ = \frac{1}{2\pi c^{2}} \times \left(\frac{\lambda_{i+1}\lambda_{i-1}}{\lambda_{i-1} - \lambda_{i+1}}\right) \left(\frac{\lambda_{i+1}\lambda_{i}}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i}} - \frac{\lambda_{i}\lambda_{i-1}}{\lambda_{i} - \lambda_{i-1}}\right)^{(\Upsilon)}$$

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 می شود.

۳- چیدمان آزمایشگاهی

برای اندازه گیری GDD آینه های پاشنده توسط تداخل-سنجی فابری پرو بسته به میزان بازتابندگی این آینه ها می توان از آرایش عبوری یا آرایش بازتابی استفاده کرد. در آرایش بازتابی اگر بازتابندگی یکی از آینه ها تقریبا ۱۰۰٪ باشد و آینه دیگر، بخشی بازتابنده باشد این تداخل سنج، جیرس-تورنویز نامیده می شود. در چنین تداخل سنجی کمینه های جذبی در طیف بازتاب شده از تداخل سنج

۲۳ تا ۲۵ دیماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

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-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 اندازه گیری شده برای آینههای آلومینوم

آزمایش اندازه گیری 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 ۱۵۴s²-) در گستره ۷۵۰ تا ۸۵۰ نانومتر و دسته سوم آینههای با GDD بالاتر(نزدیک ۵۰۶s-) در گستره ۸۷۰تا ۸۲۰ نانومتر است. نمودار GDD اندازه گیری 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 می کند.



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 اندازه گیری GDD این آینهها در شکلهای ۳ و ۴ نشان داده شده است. دقت آزمایش در این روش برابر 5fs² اندازه گیری شد.



شکل ۴: نمودار GDD طراحی (خط پیوسته) و اندازه گیری 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 اندازه گیری 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 برای منحنی deل موج منظم به سمت طول موجهای کمتر برای منحنی GDD اندازه گیری شده در این آینهها مشاهده میشود. همانگونه که دیده میشود این جابجایی طول موج برای هر دو دسته آینه پاشنده دیده میشود. این نسبت به بوتهها در محفظهی لایه نشانی است. روش رایج نسبت به بوتهها در محفظهی لایه نشانی است. روش رایج دیگر اندازه گیری GDD، معمولا روش تداخل سنجی مایکلسون است که در این روش به الگوریتمهای برازش مایکلسون است که در این روش به الگوریتمهای برازش 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 (F5fs²) محاسبه شد. در این روش مقادیر GDD مستقیما از دادههای آزمایشگاهی بدست میآید بدون اینکه به هیچ نوع الگوریتم برازش توابع چند میآید بدون اینکه به هیچ نوع الگوریتم برازش توابع چند دلیل عدم نیاز به اندازه گیری دقیق فاصله بین آینهها و همچنین سرعت اندازه گیری بالای این روش (بدلیل نداشتن هیچگونه الگوریتم محاسباتی پیچیده) نسبت به روشهای دیگر برتری دارد.

مراجع

- 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.