بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

طراحی و ساخت طیف‌سنج با تفکیک پذیری ۰/۰۴ nm در طول موج مرکزی ۷۸۰ nm

عباس باقری یزدآبادی، مجید ناظری، احمد ساجدی بیدگلی، میلاد کلاهی

دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان

چکیده– در این مقاله طراحی و ساخت طیف‌سنج با توان تفکیک بالا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این طیف‌سنج از عنصر پاشنده توری برای جداسازی طیفی استفاده شده است. طراحی اپتیکی طیف‌سنج توسط نرم افزار زیمکس انجام شد و در آن از یک توری پراش ۱۲۰۰ خط بر میلیمتر و یک آینه مقعر با فاصله کانونی ۷۰ *cm* استفاده شده است. ورودی طیف‌سنج یک فیبر نوری با اتصال *FCPC* است که بسته به قطر دهانه آن قدرت تفکیک تغییر می‌کند. آشکارساز استفاده شده یک آشکارساز آرایه خطی از نوع *CCD* با ۳۶۴۸ پیکسل و از جنس سیلیکون است. قدرت تفکیک این طیف سنج در طول موج ۷۸۰ *nm* با استفاده از یک فیبر ۹ میکرونی ۰/۰۴ *nm* و ناحیه آزاد طیفی آن نیز ۲۷ *nm* است.

کلید واژه- تفکیک پذیری، توری پراش، زیمکس، طیف‌سنجی، سی‌سی‌دی

Design and Construction of a Spectrometer With 0.04 nm Resolution at 780 nm Central Wavelength

Abbas Bagheri Yazdabadi, Majid Nazeri, Ahmad Sajedi Bidgoli, Milad Kolahi

Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan

Abstract- In this paper design and construction of a high-resolution spectrometer is studied. In this spectrometer, a grating is used as a dispersive element for spectral separation. Optical design of spectrometer is done by Zemax, and a 1200 groove/mm grating and a concave mirror with 70 cm focal length have used in that. The entrance of spectrometer is an optical fiber with FCPC connection which depends on its diameter of aperture the resolution varies. The used detector is a silicon linear array CCD with 3648 pixels. By using a 9 μm optical fiber the resolution of this spectrometer is 0.04 nm at 780 nm and it's free spectral range is 27 nm too.

Keywords: Resolution, Grating, Zemax, Spectroscopy, CCD

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

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

طیف‌سنج‌ها (Spectrometer) عنصر اصلی سامانه های طیف‌سنجی هستند که نور را به فرکانس‌های مختلف تفکیک کرده و توزیع فرکانسی نور ورودی را معین می‌کنند. از سامانه‌های طیف‌سنجی پر کاربرد می‌توان به سامانه‌های طیف‌سنجی فروشکست القایی لیزری، فلورسانس القایی لیزری، رامان، طیف‌سنجی جذبی و نشری اشاره کرد. طیف-سنجی با آزمایش‌هایی که نیوتون در قرن هفدهم میلادی با استفاده از منشور گزارش کرد شروع شد. بعد از آن در اوایل قرن نوزدهم، جوزف فرانهوفر توری پراشنده را به عنوان عامل تجزیه نور جایگزین منشور کرد و نتایج دقیق‌تر و علمی‌تری بدست آورد. در سال‌های اخیر نیز ترکیب آرایه‌های آشکارساز (CCD) و تکفام‌سازها (spectrograph) مجموعه مناسبی را برای طیف‌سنجی بوجود آورده است[۱-۲].

طیف‌سنجی از پر کاربردترین روش‌های تشخیصی است و کاربرد آن در کلیه علوم از شیمی، فیزیک و نجوم گرفته تا زیست شناسی و علوم کشاورزی به خوبی به اثبات رسیده است[۳].

در این مقاله طراحی و ساخت یک طیف‌سنج با توان تفکیک بهتر از ۰/۰۴ nm مورد بررسی قرار گرفته است. از مزایای خاص این طیف‌سنج علاوه بر قدرت تفکیک بالا، عدم استفاده از یک شکاف ورودی ثابت و نیز استفاده از یک آینه بازتابی به جای دو آینه بازتابی در طیف سنج‌های متداول زرنی-ترنر است. در این مقاله اصول نظری ساخت طیف‌سنج توری بررسی شده و نمونه‌هایی از طیف‌های ثبت شده آورده شده است.

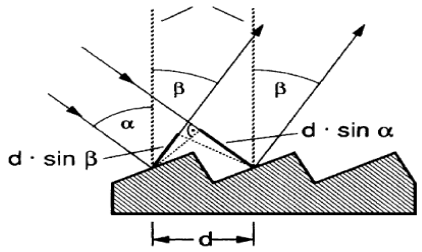
۲- مبانی نظری طیف‌سنج توری پراشنده

متداول‌ترین طیف‌سنج‌ها بر مبنای استفاده از پاشنده‌های اپتیکی(منشور)، پراشنده‌ها(توری پراش) و تداخل‌سنج‌ها هستند. طیف‌سنج‌های منشوری ضمن این که مزایای بسیاری دارند اما قدرت تفکیک بالایی ندارند. از طرفی میزان پراکندگی پرتو فرودی در طول‌موج‌های مختلف پس از عبور از منشور متغیر است (پاشندگی در طول‌موج های کوتاه‌تر بیشتر از طول‌موج های بلندتر است). در مورد توری پراش، علاوه بر پراکندگی بیشتر نسبت به منشور، پراکندگی در طول‌موج‌های مختلف مقدار نسبتاً ثابتی دارد که با یک تقریب بسیار جزئی می‌توان آن را ثابت در نظر گرفت. این مسأله باعث افزایش توان تفکیک طیف‌سنج توری نسبت به طیف‌سنج منشوری شده و مدرج کردن طیف‌سنج را آسان‌تر می‌کند. همچنین طیف‌سنجی با روش‌های تداخلی سرعت پایینی دارد و بسیار به لرزش حساس است. طیف‌سنج‌های توری چیدمانی ساده‌تر و ارزان‌تری نسبت به طیف‌سنج‌های تداخلی دارد که دسترسی و کارآیی آن را بیشتر کرده است. اگرچه به دلیل اتلاف زیاد توری پراش، درصد قابل ملاحظه-ای از پرتو از دست می‌رود.

توری‌های پراش شامل تعداد زیادی شیار هستند که اگر به صورت همدوس تحت تابش قرار گیرند می‌تواند به عنوان منابع تابشی کوچک در نظر گرفته شود. رابطه پراش حاصل از برخورد یک باریکه نور به توری پراش به صورت زیر است:

$$d(\sin\alpha \pm \sin\beta) = m\lambda \qquad (۱)$$

که طبق شکل۱، α و β به ترتیب زاویه پرتو فرودی با خط عمود بر توری و زاویه بین پرتو بازتابی و خط عمود است. λ طول موج پرتو فرودی و m مرتبه پراش توری می‌باشد. بنابراین هرگاه اختلاف راه (اختلاف فاز) برابر با مضرب صحیحی از طول‌موج (π2) باشد تداخل سازنده است.



شکل ۱:پراش باریکه نوری از توری پراش

اگر توری در چیدمان لیترو (β=α) قرار گیرد آنگاه رابطه ۱ به صورت زیر خواهد شد.

$$2d(\sin\alpha) = m\lambda \qquad (۲)$$

برای یک توری پراش که فاصله شیارهای آن d باشد هنگامی که نوری با طول‌موج λ و با زاویه فرود α به آن فرود می آید، پراکندگی زاویه‌ای ناشی از آن به صورت زیر می‌باشد.

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\beta} \qquad (۳)$$

با جایگذاری رابطه ۱ داریم:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{\sin\alpha \pm \sin\beta}{\lambda\cos\beta} \qquad (۴)$$

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

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

که نشان می‌دهد پراکندگی زاویه‌ای تابع زاویه فرود و بازتاب و مستقل از تعداد شیارهای توری است. اگر چیدمان لیترو مد نظر باشد این رابطه به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2\tan\alpha}{\lambda} \qquad (۵)$$

توان تفکیک نظری برای توری پراش از رابطه زیر بدست می‌آید که شامل حاصلضرب مرتبه پراش توری، در تعداد شیارهای روشن شده توسط پرتو فرودی است.

$$R = \frac{\lambda}{D\lambda} = \frac{Nd(\sin\alpha \pm \sin\beta)}{\lambda} = mN \qquad (۶)$$

رابطه (۶) توان تفکیک توری پراش است اما این تنها عامل محدود کننده تفکیک پذیری طیف‌سنج نیست. تفکیک پذیری طیفی طیف‌سنج توسط پهنای شکاف ورودی و ابعاد توری پراش نیز ممکن است طبق رابطه زیر محدود شود.

$$\Delta\lambda \geq \left(\frac{\lambda}{a} + \frac{b}{f_1}\frac{d\beta}{d\lambda}\right)^{-1} \qquad (۷)$$

که a قطر پرتو فرودی بر توری پراش (در صورتی که قطر پرتو کمتر از قطر توری باشد ولی در صورتی که قطر لکه پرتو بیشتر باشد a برابر با قطر توری خواهد بود) و f_1 فاصله کانونی آینه موازی ساز می‌باشد. b پهنای شکاف ورودی است که برای جلوگیری از اتلاف پرتو از اطراف توری باید به گونه‌ای باشد که قطر مرتبه صفر پرتو پراشیده شده حداکثر برابر با قطر توری پراش شود. اگر قطر پرتو فرودی بر توری پراش بیشتر از قطر توری شود علاوه بر اینکه قدرت تفکیک بیشتر نخواهد شد، شدت و حساسیت طیف‌سنج هم کاهش می‌یابد. با توجه به نکته ذکر شده کمترین مقدار b از رابطه زیر تبعیت می‌کند[۴].

$$b_{min} \geq \frac{2\lambda f_1}{a} \qquad (۸)$$

در نهایت تفکیک پذیری طیف‌سنج از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\Delta\lambda = \mathrm{Max}\left\{\left(\frac{\lambda}{a} + \frac{b}{f_1}\frac{d\cos\beta}{m}\right), \frac{\lambda}{mN}\right\} \qquad (۹)$$

که این یعنی بسته به اینکه کدام جمله مقدار بزرگتری دارد تفکیک پذیری طیف‌سنج محدود به آن خواهد شد.

۳- طراحی و ساخت طیف‌سنج

برای ساخت طیف‌سنج با تفکیک پذیری بالا ابتدا لازم است آن را طراحی و شبیه سازی لازم را انجام دهیم. در مدلسازی از یک آینه مقعر با فاصله کانونی ۷۰ cm و قطر ۱۰ cm و یک توری پراش ۱۲۰۰ خط بر میلیمتر با قطر ۲ inch استفاده شده است. شبیه سازی در محیط نرم‌افزار زیمکس و با استفاده از روابط بخش قبل برای طول موج مرکزی ۷۸۰ nm صورت گرفت. تفکیک پذیری طیف‌سنج با استفاده از شبیه سازی انجام شده ۰/۰۳ nm محاسبه شد.

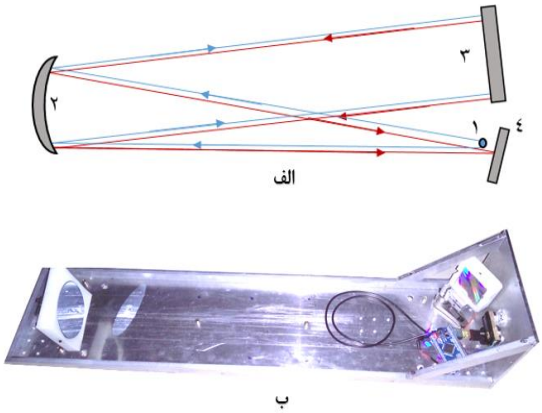
سطح آینه مورد نظر با آلومینیوم لایه نشانی شده است و برای حفاظت از این لایه، آن را با لایه‌ای از MgF2 پوشانده‌ایم. این آینه برای محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک کارآیی دارد. توری انتخاب شده از نوع بازتابی و ۱۲۰۰ خط بر میلیمتر است که خراش‌های آن مناسب برای طول موج ۷۸۰ nm هستند. آشکارساز استفاده شده (مدل TCD1304 CCD)، یک آرایه CCD خطی با ۳۶۴۸ پیکسل است. این CCD با استفاده از یک سخت افزار بر پایه آی‌سی میکروکنترلر XMEGA128A3U که توسط نرم افزار CodeVision برنامه ریزی شده، کنترل می‌شود. همچنین بوسیله کدی نوشته شده در محیط نرم افزاری C# توسط رایانه کنترل شده و خروجی به صورت طیفی نمایش داده می‌شود. این سیستم به ما اجازه می دهد زمان داده‌گیری آشکارساز را با دقت زمانی ۱ میکروثانیه کنترل کنیم.

پرتو نور از طریق یک فیبر نوری چند مد (قطر ۶۲ µm) و یا تک مد (قطر ۹ µm) با استاندارد FCPC وارد طیف‌سنج می‌شود. از خصوصیات طراحی خاص این طیف‌سنج عدم استفاده از شکاف ورودی است. خروجی فیبر نوری نقش شکاف ورودی طیف سنج را بازی می کند. لذا با تعویض فیبر مورد استفاده از نوع چند مد به حالت تک مد، قطر شکاف کمتر شده و قدرت تفکیک طیف‌سنج بهتر می‌شود و در عوض شدت نور ورودی کمتر خواهد شد.

طبق شکل ۲-الف، پرتوها پس از خروج از فیبر نوری به صورت واگرا به سمت آینه رفته و از آنجا که این فیبر در کانون آینه قرار دارد بعد از آینه پرتوها موازی می‌شوند.

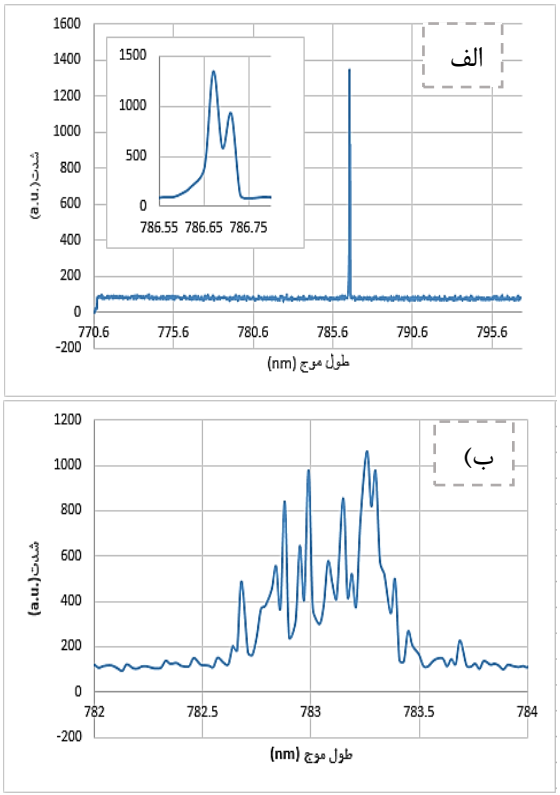
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

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



شکل۲: الف)طرح اپتیکی طیف‌سنج (ا : روزنه ورودی باریکه- ۲: آینه مقعر با فاصله کانونی ۷۰ cm - ۳: توری پراش ۴: آشکارساز) ب) تصویر طیف‌سنج ساخته شده

نور موازی شده به توری بازتابی با زاویه ۶۰ درجه (حالت لیترو) برخورد کرده و مرتبه اول پراش در همان مسیر اولیه به سمت آینه مقعر بازتاب می‌شود. آینه اینک پرتوها را به سمت آشکارساز آرایه‌ای (CCD) می تاباند و تصویر روزنه ورودی را روی آشکارساز تشکیل می‌دهد. چیدمان طیف‌سنج ساخته شده در شکل ۲-ب نشان داده شده است.



شکل۳: الف) طیف لیزر تیتانیوم سفایر با اتالون(این طیف شامل دو مد طولی با فاصله ۰/۰۴ nm می‌باشد) ب)طیف لیزر تیتانیوم سفایر بدون اتالون

تفکیک پذیری طیف‌سنج ساخته شده با استفاده از فیبر تک مد ۰/۰۴ nm است. محدوده آزاد طیفی آن برای طول موج مرکزی ۷۸۰ nm برابر با ۲۷ nm می‌باشد. نگهدارنده توری به گونه‌ای طراحی شده که می‌توان با چرخاندن آن طول موج مرکزی طیف‌سنج را تغییر داد و امکان طیف‌سنجی در دیگر محدوده‌های طیفی را برای ما فراهم می‌کند. شکل۳-الف طیف لیزر تیتانیوم سفایر تپی تنظیم پذیر است که درون کاواک آن از اتالون استفاده شده و پهنای طیفی آن ۰/۰۸nmمی‌باشد. تصویر بزرگنمایی شده طیف نشان می‌دهد که طیف شامل دو مد طولی لیزر با فاصله ۰/۰۴ nm می‌باشد و طیف‌سنج قادر به تفکیک این دو مد می‌باشد. شکل ۳-ب مربوط به لیزر تیتانیوم سفایر تنظیم پذیر منشوری بدون اتالون است که توسط این طیف‌سنج ثبت شده است. به دلیل تفکیک پذیری بالای این طیف‌سنج، مدهای طولی مختلفی از لیزر از هم تفکیک شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و ساخت طیف‌سنج با تفکیک پذیری بالا مورد بررسی قرار گرفته است. در این طیف‌سنج از توری پراش به عنوان عامل پراکنده کننده پرتو فرودی استفاده شده است. طیف‌سنج توری علاوه بر هزینه پایین و چیدمان ساده دارای تفکیک پذیری بالایی است که منجر به کاربرد روز افزون این طیف‌سنج شده است. در این طیف‌سنج تنها از یک آینه استفاده شده و نیازی به شکاف ورودی ندارد که همین امر هزینه ساخت آن را کمتر می‌کند. شبیه سازی طیف‌سنج با نرم افزار زیمکس انجام شده و تفکیک پذیری بدست آمده ۰/۰۳nm است. این طیف‌سنج همچنین ساخته شده و با استفاده از یک فیبر با قطر ۹ میکرومتر توانایی تفکیک دو قله از طیف با فاصله ۰/۰۴ nm را دارا می‌باشد و محدوده آزاد طیفی بدست آمده، ۲۷ nm است.

مراجع

[1] Mason, S. (1996). Lines of Light-The Sources of Dispersive Spectroscopy, 1800-1930, by JCD Brand. *Nature*, *381*(6582), 488-488.
[2] Corney, A. (1978). *Atomic and laser spectroscopy*. Oxford: Clarendon Press.
[3] Albani, J. R. (2008). Principles and applications of fluorescence spectroscopy. John Wiley & Sons.
[4] Demtröder, W. (2013). *Laser spectroscopy: basic concepts and instrumentation*. Springer Science & Business media.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

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