بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

تصحیح ابیراهی آستیگماتیسم و کما در طیف سنج آرایه ای رامان

هادی برزویی

[1]دانشکده مهندسی، دانشگاه فناوری‌های نوین سبزوار، کد پستی ۹۶۱۵۹۱۸۳۳۹
h_borzouei@yahoo.com

آستیگماتیسم و کما دو عامل اصلی و محدود کننده دقت و توان دریافتی در طیف‌سنجی رامان هستند. قسمت دریافت کننده در طیف سنج رامان در بازه طول موجی ۷۸۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر بر اساس ساختار زرنی-ترنز طراحی شده است. این سیستم، دو آینه‌ای و بدون کانون با سرعت دریافت F/4.5 است. اثر ابیراهی آستیگماتیسم با افزودن عدسی استوانه‌ای و ابیراهی کما با تنظیم محل جسم و تصویر کمینه شده‌اند. از توری ۶۰۰ خط بر میلی‌متر یک اینچ استفاده شده و توان تفکیک ۰,۲۵ نانومتر بدست آمده است.

کلید واژه- طیف سنج آرایه ای، طیف سنجی رامان، ابیراهی کما، ابیراهی آستیگماتیسم.

Astigmatism and Coma aberration Correction in Raman array spectrometer

Hadi Borzouei

Engineering Faculty, Sabzevar university of new technology, Iran, 9615918339
h_borzouei@yahoo.com

The very weak signal of Raman scattering needs the optimized array spectrometer. The Astigmatism and Coma aberrations are the main problem in received energy and wavelength resolution. An optimized array spectrometer in range of 780 to 1100 nm with F/number of 4.5 has been designed. A cylindrical lens added to correction of Astigmatism aberration. The optimum point of object and image respect to mirrors calculated. This special design minimizes the Coma aberration. The 600 line per millimeter grating has been used and the resolution of 0.25 nm has achieved.

Keywords: Array spectrometer, Raman spectroscopy, Coma aberration, Astigmatism aberration.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

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

مقدمه

طیف سنج رامان یک ابزار بسیار قدرتمند و انعطاف پذیر در شناسایی و تشخیص مواد شیمیای، مواد زیستی و سرطان است [۱]. سیگنال رامان بسیار ضعیف بوده و معمولا نسبت سیگنال به نویز پایینی دارد. برای افزایش بازدهی اپتیکی در طیف‌سنج رامان، باید دهانه عددی در طراحی طیف‌سنج افزایش پیدا کند که با افزایش ارتفاع پرتو بر روی آینه‌ها همراه است. ابیراهی‌های کما و آستیکماتسیم به ارتفاع باریکه روی آینه‌ها وابسته هستند [۲]. طراحی‌های مختلفی برای کاهش ابیراهی‌ها و افزایش زاویه دریافت نور در این نوع طیف‌سنج‌ها انجام شده است [۳-۶]. در این مقاله، تصحیح هر دو ابیراهی آستیگماتیسم و کما انجام شده است.

اصول طراحی

چیدمان طیف‌سنج آرایه‌ای با هندسه زرنی-ترنر در شکل ۱ آمده است. در طراحی زرنی-ترنر طول‌موج‌های تابیده شده به توری بازتابی بر حسب مشخصات توری و زاویه فرود نور پاشیده می‌شوند. زاویه تابش و فرود باریکه بر توری از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$d(\sin\theta_i+\sin\theta_r)=m\lambda \qquad (۱)$$

که λ طول موج نور تابشی، d فاصله بین خطوط در توری پراش، θ_i زاویه تابش بر روی توری و θ_r زاویه بازتاب از توری است. مخروط نوری که مرکز آن در وسط توری قرار دارد پاشندگی طول‌موج‌ها توسط توری را مشخص می-کند.با مشتق‌گیری از رابطه توری بدست می‌آید:

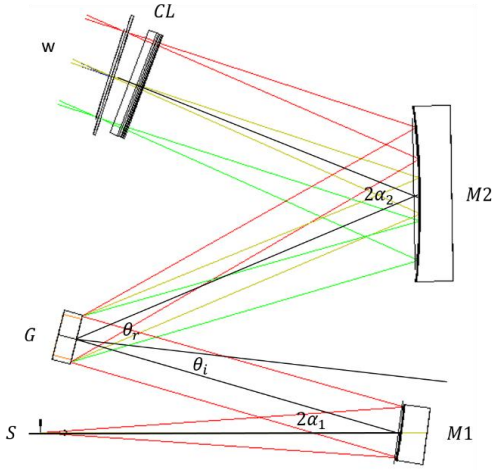
$$\Delta\theta_r=\frac{m\Delta\lambda}{d\cos\theta_r} \qquad (۲)$$

در این رابطه تغییرات زاویه ناشی از پاشیدگی، بر حسب تغییرات طول موج محاسبه می‌شود.

اگر به صورت معکوس به مساله نگاه کنیم، باریکه‌های مرکزی در هر مخروط نوری که به آشکارساز رسیده‌است با هم موازی‌اند و انگار از آشکارساز ساطع شده و در وسط توری متمرکز شده‌اند. پس رابطه زیر بین پهنای آشکارساز، مشخصات توری و هندسه آینه دوم برقرار است:

$$w=2f_2\cos\alpha_2\tan\frac{\Delta\theta_r}{2}=R_2\cos\alpha_2\tan\frac{\Delta\theta_r}{2} \qquad (۳)$$

که f_2 فاصله کانونی آینه دوم، α_2 زاویه چرخش آینه دوم نسبت به محور اصلی و R_2 شعاع انحنای آینه دوم است.



شکل ۱: چیدمان قطعات اپتیکی در هندسه زرنی-ترنر برای طراحی طیف سنج آرایه‌ای رامان. S شکاف ورودی نور، M1 آینه اول، G توری پراش، M2 آینه دوم، CL عدسی استوانه‌ای، W پهنای آشکارساز است.

از طرفی مساله را به صورت مستقیم و با دیدگاه اپتیک موجی و حد پراش بررسی می‌کنیم. فرض می‌شود که توری پراش تنها عامل محدود کننده توان اپتیکی و نیز دهانه بند دستگاه اپتیکی باشد و آینه دوم، تمام نور رسیده به سطح مقطع توری را روی آشکارساز متمرکز می‌کند. برای آنکه دو قله متوالی ناشی از پراش قابل تفکیک باشند باید به اندازه نیم‌پهنای پراش از یکدیگر فاصله داشته باشند. در این حالتحداقل به دو پیکسل در آشکارساز نیاز است. اندازه هر پیکسل (a) در آشکارساز از این رابطه بدست می‌آید:

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

$$a=\frac{\lambda}{G\sin\theta_r}f_2\cos\alpha_2=\frac{1}{2}\frac{\lambda}{G\sin\theta_r}R_2\cos\alpha_2 \qquad (۴)$$

که G پهنای توری پراش است. فاصله کانونی موثر آینه دوم در رابطه‌های ۲ و ۳ بر اساس دو رابطه مختلف بدست آمده‌اند. از ترکیب این دو رابطه زاویه بازتاب از توری بدست می‌آید:

$$\theta_r=\arctan(\frac{\lambda d w}{\Delta\lambda G a}) \qquad (۵)$$

برای محاسبه نسبت اندازه شعاع انحنای دو آینه، از بزرگ-نمایی سیستم اپتیکی استفاده می‌کنیم. این سیستم به صورت هم‌کانون طراحی شده و یک سیستم بدون کانون است که بزرگ‌نمایی آن از رابطه زیر بدست می‌آید[۷]:

$$m=\frac{R_2\cos\alpha_2}{R_1\cos\alpha_1} \qquad (۶)$$

و آستیگماتیسم TA و ابیراهی کروی CC به ترتب از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$TA=\frac{1}{R}\alpha^2 \qquad (۷)$$

$$CC=\frac{(R-p)}{pR^2}\alpha \qquad (۸)$$

اختلاف بین دو کانون ناشی از پرتوهای ساجیتال و تانژانتی توسط رابطه زیر محاسبه شده و در نهایت قبل از رسیدن به آشکارساز توسط عدسی استوانه‌ای جبران می-شود [۴].

برای رفع ابیراهی کما محل جسم و تصویر به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که اندازه ابیراهی کمای آن‌ها روی توری با هم برابر و علامت مخالف داشته باشند.

شبیه سازی

در کاربردهای پزشکی، طول موج ۷۸۰ نانومتر میزان جذب کمی در بافت دارد از این رو برای تحریک ترازهای رامان لیزر ۷۸۰ نانومتر انتخاب شده و طیف پاداستوکس رامان در گستره ۷۸۰ تا ۱۱۰۰ اندازه گیری می‌شود. پس، پهنای طیفی ۳۲۰ نانومتر و طول موج مرکزی، ۹۴۰ نانومتر است. از بین آشکارسازهای رایج در این حوزه، آشکارساز S11639 متعلق به شرکت هاماماتسو انتخاب شده است [۸]. این آشکارساز ۲۰۴۸ پیکسل دارد که هر کدام ۱۴ میکرومتر پهنا دارند. پهنای کل آشکارساز ۲۸,۶۷۲ میلی‌متر است. در ورودی دستگاه شکاف ۱۵ میکرونی قرار داده شده و از توری پراش با ابعاد یک اینچ با مشخصه ۶۰۰ خط در میلی‌متر جهت تفکیک طول موجی بهره برده‌ایم. ابیراهی آستیگماتسیم و کما هر دو به ارتفاع پرتو تا محور اپتیکی حساس هستند بدین جهت قطعات اپتیکی استفاده شده در این طراحی دایروی انتخاب شده‌اند.

زاویه تابشی α_1 و α_2 تابع‌های مستقل در طراحی هستند و توسط محدودیت‌های مکانیکی مشخص می‌شوند و باید به گونه‌ای انتخاب شوند که قابلیت ساخت وجود داشته باشد. تمام متغیرهای دیگر توسط روابط معرفی شده در قسمت قبل در محیط متلب محاسبه می‌شوند. مشخصات اولیه ایجاد شده به عنوان طراحی اولیه در قسمت غیر متوالی محیط نرم افزاری زیماکس وارد می‌شوند.

سیگنال رامان بسیار ضعیف است و سامانه دریافت کننده باید برای دریافت بیشترین انرژی ورودی و بیشترین توان تفکیک بهینه سازی شود. پهنا و ارتفاع لکه روی آشکارساز به عنوان قید طراحی معرفی شده توسط الگوریتم کمترین شیب بهینه سازی می‌شود.

جدول ۱: جزییات طراحی نهایی در طیف سنج آرایه‌ای رامان.
زاویه‌ها بر حسب درجه و اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر هستند.

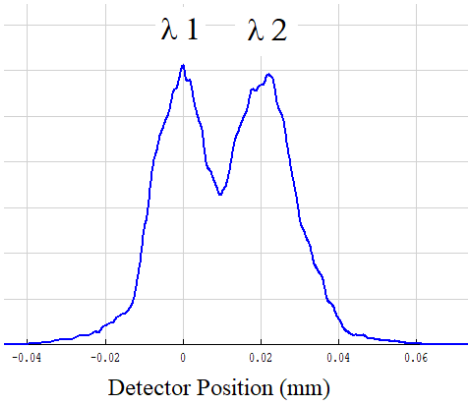
مشخصه	محاسبه	متغیرها	شبیه‌سازی
آلفا_۱	۸	خیر	8
آلفا_۲	۲۰	خیر	20
آر_۱	235	بله	227

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

آر_۲	248	مقید	247
تتا_آر	38.3	بله	141.7
تتا_آی	-3.2	بله	۱۷۶٫۸
جسم	132	بله	118
تصویر	103	بله	106
فاصله کانونی_۱	116	مقید	102
فاصله کانونی_۲	117	بله	116
زاویه آشکارساز	۰	بله	۳٫۸۶
محل عدسی استوانه‌ای	104	بله	95

زاویه‌های آلفا قید ثابت بوده و تغییر نکرده‌اند. شعاع انحنای آینه دوم به علت چرخش ۳٫۸۶ درجه‌ای آشکارساز کمی تعدیل شده و از ۲۴۸ به ۲۴۷ کاهش یافته است. محل جسم و تصویر برای برآورده شدن شرط یکسان بودن ابیراهی کما تغییر کرده اند. اندازه لکه بعد از بهینه سازی همچنان بزرگ بوده و با پهنای جسم یکی نشده است. شعاع انحنای آینه اول بر حسب رابطه ۵ تغییر می‌کند تا اندازه جسم و تصویر یکسان باقی بماند. نتیجه بهینه سازی در توان تفکیک دستگاه دیده نمایش داده می‌شود که در شکل ۲: رسم شده است. توان تفکیک این دستگاه ۰٫۲۵ نانومتر محاسبه شده است.



شکل ۲: اختلاف مکانی دو طول موج متوالی برای حد تفکیک ریلی. طول موج اول ۹۴۰ نانومتر و طول موج دوم ۹۴۰٫۲۵ نانومتر و اختلاف بین دو قله ۲۲ میکرومتر است.

نتیجه‌گیری

در این گزارش، طراحی و شبیه‌سازی طیف‌سنج آرایه‌ای انجام شده و مشخصات اپتیکی برای ساخت طیف‌سنج ۷۸۰ تا ۱۱۰۰ نانومتر استخراج شده‌اند. بعد از تصحیح ابیراهی آستیگماتیسم و کما، دقت طول موجی ۰٫۲۵ نانومتر بدست آمده است. شکاف ورودی ۱۵ میکرونی بوده و زاویه پذیرش سیستم (دهانه عددی) در حالت بهینه سازی شده ۰٫۱۱ رادیان است. توری پراشی یک اینچ استفاده شده و تمام قطعات ارتفاع یک اینچ دارند.

مرجع‌ها

[1] Santos, Inês P, Elisa M Barroso, Tom C Bakker Schut, Peter J Caspers, Cornelia GF van Lanschot, Da-Hye Choi, Martine F van der Kamp, Roeland WH Smits, Remco van Doorn, and Rob M Verdijk. "Raman Spectroscopy for Cancer Detection and Cancer Surgery Guidance: Translation to the Clinics." *Analyst* 142, no. 17 (2017): 3025-47.

[2] Gomez-Vieyra, Armando and Daniel Malacara-Hernández. "Geometric Theory of Wavefront Aberrations in an Off-Axis Spherical Mirror." *Applied optics* 50, no. 1 (2011): 66-73

[۳] هادی برزویی، محمد چهارسوقی، محمد رضا طاهری، فاطمه طاهری، احسان احدی اخلاقی. "طراحی و بهینه طیف سازی آرایه سنج بازتابی"، کنفرانس فیزیک ایران .مشهد: انجمن فیزیک ایران, ۱۳۹۴.

[4] Austin, Dane R, Tobias Witting, and Ian A Walmsley. "Broadband Astigmatism-Free Czerny-Turner Imaging Spectrometer Using Spherical Mirrors." *Applied optics* 48, no. 19 (2009): 3846-53

[5] Lee, Kye-Sung, Kevin P Thompson, and Jannick P Rolland. "Broadband Astigmatism-Corrected Czerny–Turner Spectrometer." *Optics express* 18, no. 22 (2010): 23378-84.

[6] Xue, Qingsheng. "Astigmatism-Corrected Czerny–Turner Imaging Spectrometer for Broadband Spectral Simultaneity." *Applied optics* 50, no. 10 (2011): 1338-44.

[7] Goodman, Douglas S. "Magnification Equations for a Two-Lens System." *Applied optics* 24, no. 12 (1985): 1732-32

[8] ILX511B, Sony and Toshiba TCDDG. "Line Array Sensor Comparison." (2016).

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]