بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طراحی و ساخت سلول جذبی چند بازتابی با آینه‌های استوانه‌ای برای بیناب‌نمایی

محمدحسین اسدیان، سعید قوامی صبوری و علیرضا خورسندی

دانشگاه اصفهان-گروه فیزیک

چکیده – یک سلول جذبی چند بازتابی که از یک آینه‌ی استوانه‌ای جلویی با یک سوراخ مرکزی ورود/خروج پرتو و یک آینه‌ی پشتی تشکیل شده است. از سلول جذبی چند بازتابی برای افزایش طول برهم‌کنش پرتو با محیط در بیناب نمایی جذبی استفاده می‌شود. رهیافت اصلی برای مشخصه‌یابی این سلول استفاده از انتشار پرتو گوسی دارای آستیگماتیسم است. در این مقاله با استفاده از رهیافت ماتریسی به چیدمان مناسب از یک سلول چند بازتابی دست یافته و یک نمونه‌ی آزمایشگاهی آن را ساخته و مشخصه‌یابی کرده‌ایم.

کلید واژه- آینه‌ی استوانه‌ای،بیناب نمایی،سلول جذبی چند بازتابی.

Design and construction of a multipass absorption cell with astigmatic mirrors for spectroscopy

Mohammad Hosein Asadian, Saeed Ghavami Sabouri and Alireza Khorsandi

Department of Physics, Isfahan University

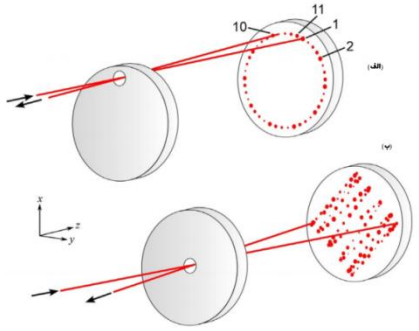
Abstract- A multipass optical cell based upon a front cylindrical mirror with a central input/output hole and a rear cylindrical mirror is used for application to laser absorption spectroscopy. The main approach to characterize this cell is use of propagation of a gaussian beam with a general astigmatism. In this paper, we found an appropriate setup for multipass cell by using matrix approach and then we produced & characterized a laboratory sample.

Keywords: cylindrical mirror, multipass absorption cell, spectroscopy

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱- مقدمه

روش‌های گوناگون بیناب نمایی اپتیکی برای رسیدن به حداقل غلظت قابل آشکارسازی وجود دارد. در بیشتر این روش‌ها طول مسیر برهم کنش نور و ماده بر توان آشکارسازی تأثیر دارد. از طرفی نیازهای مختلف پزشکی، محیط زیست، امنیت،آشکارسازی‌های دقیق‌تر را طلب می‌کند.یکی از روش‌های افزایش طول جذب استفاده از سلول‌های چند بازتابی است. اولین سلول چند بازتابی توسط وایت در سال ۱۹۴۲ ساخته شد[۱]. این سلول از سه آینه کروی تشکیل شده است که پرتو لیزر چند بار در بین آن رفت و برگشت انجام می‌دهد اما این ترکیب دارای اندازه‌ی بزرگ بوده و هم راستا کردن آن مشکل است. در سال ۱۹۶۴ هریوت این نوع سلول را به وسیله‌ی دو آینه‌ی کروی ساخت[۲]. در سال ۱۹۹۵ مانوس از آینه های استوانه ای استفاده کرد که توانست در یک حجم ثابت تعداد بیشتری رفت و برگشت ایجاد کند[۳].شکل (۱) نشان دهنده‌ی نمایی شماتیک از سلول‌های هریوت و مانوس است.

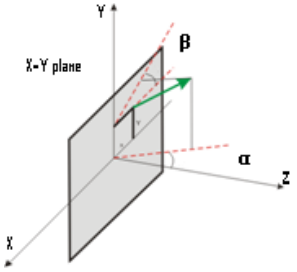


شکل ۱:تفاوت در تعداد رفت و برگشت‌ها در دو نوع سلول الف)سلول هریوت ب)سلول مانوس مشاهده می‌شود.

در این مقاله با استفاده از رهیافت مانوس از طریق اپتیک ماتریسی، برای دو آینه استوانه ای در یک سلول دو آینه ای مکان برخورد پرتو لیزری و همچنین نمایه پرتو در آن نقطه شبیه سازی شده است. نتایج برای پارامترهای مختلف مانند شعاع انحنای آینه‌ها، فاصله جدایی آینه‌ها محاسبه و رسم شده است.همچنین یک نمونه‌ی چهار رفت و برگشتی ساخته شده است و با نتایج حاصل از شبیه سازی مقایسه شده است.

۲- انتشار پرتو گوسی دارای آستیگماتیسم

ماتریس‌های دو بعدی که برای توصیف موقعیت پرتو و اثر المان اپتیکی بر پرتو در ردیابی پرتو گاوسی استفاده می‌شود برای دستگاه‌هایی مفید هستند که نسبت به چرخش ناوردا باشند. در غیر این صورت این ماتریس‌ها به صورت $r=(x \quad y \quad \alpha \quad \beta)$ تغییر پیدا می‌کنند که در شکل زیر نشان داده شده‌اند(αوβ به ترتیب زاویه‌های پرتو با محورz و x هستند.)



شکل ۲:معرفی مشخصه‌های ماتریس پرتو در دو بعد

اثر یک المان اپتیکی بر روی مشخصات پرتو به صورت کلی زیر بیان می‌شود[۴]:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \alpha_2 \\ \beta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{xx} & A_{xy} & B_{xx} & B_{xy} \\ A_{xy} & A_{yy} & B_{xy} & B_{yy} \\ C_{xx} & C_{xy} & D_{xx} & D_{xy} \\ C_{xy} & C_{yy} & D_{xy} & D_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ \alpha_2 \\ \beta_2 \end{pmatrix} \qquad (۱)$$

برای مثال برای یک عدسی نازک که فاصله کانونی چپ و راست آن متفاوت باشد ماتریس متناظر آن در اپتیک ماتریسی به صورت زیر است[۴].

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{F_x} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{F_y} & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (۲)$$

میدان یک پرتو گاوسی در مختصات دکارتی که در راستای OZ در حرکت است به صورت زیر است[۵]:

$$E(r,z) = E_0(z)\exp(-0.5ikr^T Q^{-1} r) \qquad (۳)$$

که در آن:

$$r = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, r^T = (x \quad y), Q^{-1} = \begin{pmatrix} q_{xx}^{-1} & q_{xy}^{-1} \\ q_{xy}^{-1} & q_{yy}^{-1} \end{pmatrix} \qquad (۴)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

r ماتریس معرف مکان پرتو ، r^T معرف ترانهاده‌ی ماتریس مکان پرتو و Q^{-1} تانسور مختلط انحناست؛ و پارامترهای پرتو گاوسی در راستاهای مختلف(q^{-1}_{xx} ,q^{-1}_{yy} ,q^{-1}_{xy}) به صورت زیر است[۶]:

$$\frac{1}{q_{xx}}=\frac{1}{R_{xx}}-\frac{2i}{kw_{xx}^2}$$
$$\frac{1}{q_{yy}}=\frac{1}{R_{yy}}-\frac{2i}{kw_{yy}^2} \qquad (۵)$$
$$\frac{1}{q_{xy}}=\frac{1}{R_{xy}}-\frac{2i}{kw_{xy}^2}$$

که در آن R_{ii} شعاع انحنای جبهه موج است و w_{ii} اندازه‌ی لکه لیزری در راستاهای xوy و راستای خط y=xهستند.

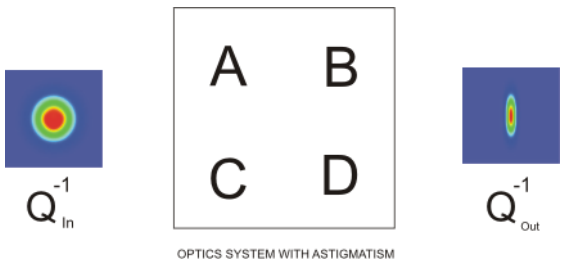
اثر یک المان اپتیکی بر مختصات پرتو لیزری در سه بعد از رابطه (۱) تبعیت می‌کند و می‌توان به صورت کلی زیر نمایش داد:

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ y1 \end{pmatrix} \qquad (۶)$$

که در آن A,B,C,D هر کدام یک ماتریس دو بعدی است.

تغییرات پارامترهای مختلط پرتو در دو بعد (به عبارت دیگر تغییر تانسور مختلط انحنا) بعد از عبور از یک المان اپتیکی از قانون تانسوری ABCD تبعیت می‌کند[۶].

$$Q_{out}^{-1}=\frac{C+DQ_{in}^{-1}}{A+BQ_{in}^{-1}} \qquad (۷)$$



شکل ۳:اثر المان اپتیکی بر نمایه‌ی پرتو را نشان می‌دهد.

که در آن Q_{in}^{-1} و Q_{out}^{-1} به ترتیب تانسور های مختلط انحنا قبل و بعد از المان اپتیکی است.رابطه (۳) را می‌توان بسط داد و به دو قسمت حقیقی و موهومی جدا کرد بدیهی است که قسمت موهومی برای فرمول بندی توزیع شدت ($I \propto E*E^*$) از بین خواهد رفت.

$$0.5ikr^TQ^{-1}r=0.5ik(\frac{x^2}{q_{xx}}+\frac{y^2}{q_{yy}}+\frac{2xy}{q_{xy}})$$
$$=0.5ik[(\frac{x^2}{R_{xx}}+\frac{y^2}{R_{yy}}+\frac{2xy}{R_{xy}}) \qquad (۸)$$
$$-i\frac{2}{k}(\frac{x^2}{w_{xx}}+\frac{y^2}{w_{yy}}+\frac{2xy}{w_{xy}})]$$

در نتیجه سطح مقطع نمایه‌ی پرتو به صورت زیر خواهد بود:

$$(\frac{x^2}{w_{xx}}+\frac{y^2}{w_{yy}}+\frac{2xy}{w_{xy}})=cons. \qquad (۹)$$

۳- سلول چند عبوری اپتیکی به وسیله‌ی دو آینه‌ی استوانه ای همسان چرخیده

در سلول چند عبوری که به وسیله دو آینه استوانه ای ساخته می‌شود به طور معمول شعاع انحنای آینه اول را در صفحه XZ قرار می‌دهند و شعاع انحنای آینه دوم را در صفحه YZ قرار می‌دهند.برای محاسبه و شبیه سازی این سلول بر اساس رابطه‌ی (۲) به ماتریس‌های زیر نیاز داریم:

$$M_1=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (۱۰)$$

$$M_2=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{F} & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (۱۱)$$

ماتریس انتقال و چرخش به ترتیب به صورت زیر است[۴]:

$$D=\begin{pmatrix} 1 & 0 & d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (۱۲)$$

$$T(\delta)=\begin{pmatrix} \cos(\delta) & \sin(\delta) & 0 & 0 \\ -\sin(\delta) & \cos(\delta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta) & \sin(\delta) \\ 0 & 0 & -\sin(\delta) & \cos(\delta) \end{pmatrix} \qquad (۱۳)$$

رابطه های (۹) و (۱۰) به ترتیب مربوط به آینه های اول (جلویی)و دوم (پشتی)است رابطه‌ی (۱۲) نیز برای چرخش آینه به صورت زیر استفاده می‌شود :

$$M_{rotated}=T(-\delta)*M_2*T(\delta) \qquad (۱۴)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

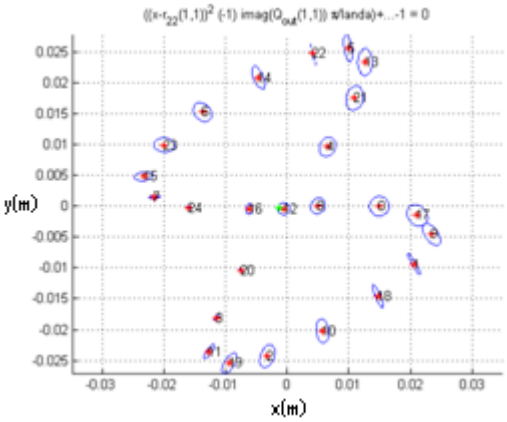
برای یک رفت و برگشت کامل در درون سلول ماتریس نهایی به صورت زیر در می‌آید[۶]:

$$C_{roundtrip} = M_1 * D * T(-\delta) * M_2 * T(\delta) * D \quad (۱۵)$$

محاسبه این ماتریس‌ها و تغییرات پارامترهای مختلط پرتو (به عبارت دیگر تغییر تانسور مختلط انحنا) و مشخصه یابی نمایه پرتو برای هر رفت و برگشت در سلول توسط نرم افزار «Matlab» انجام شد که نتایج آن برای چند پارامتر مختلف رسم شده است.اولین شبیه‌سازی مربوط به سلولی با مشخصات زیر است،که این مشخصات مطابق با یک برپایی عملی در یک مقاله است تا درستی نتایج را بررسی کنیم[۶] :

$$d = 0.59m, \delta = 38.5^\circ, f_1 = f_2 = 0.918m$$
$$x_1 = y_1 = 0m, \beta_1 = 0^\circ, \alpha_1 = 1.46^\circ \quad (۱۶)$$

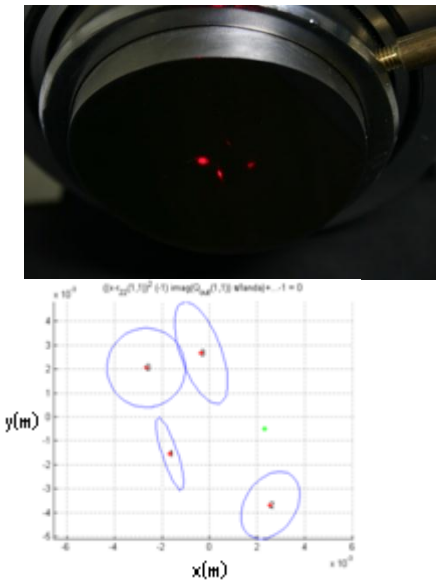
لکه های پرتو لیزر در آینه دوم به صورت زیر است:



شکل ۴:لکه های پرتو لیزر در آینه‌ی دوم با مقادیر رابطه‌ی (۱۶)

تعداد رفت برگشت با این مشخصات ۲۵ بار است که با توجه به فاصله‌ی دو آینه، فاصله موثر برابر با ۲۹.۵ متر می‌شود. سلولی که در آزمایشگاه ساخته شده، برای چهار رفت و برگشت تنظیم شده است که نتیجه‌ی شبیه سازی لکه‌های لیزری و برپایی عملی آن با هم مقایسه شده است، این سلول دارای مشخصات زیر است:

$$d = 0.105m, \delta = 11.7^\circ, f_1 = f_2 = 0.1m$$
$$x_1 = 0.0005m, y_1 = 0.001m, \beta_1 = 0.57^\circ \quad (۱۷)$$
$$\alpha_1 = -1.71^\circ$$



شکل ۵:شبیه سازی و لکه‌های، سلول ساخته شده در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.

مقایسه شبیه سازی و نمایه‌ی واقعی هم خوانی خوبی در نمایه‌ی لکه‌ها دارد ولی در مکان برخورد پرتو به آینه اختلاف دارد که علت آن عدم تطبیق دقیق مکان وارد شدن پرتو به سلول ، زاویه چرخش آینه دوم و شیب پرتو ورودی، بین برپایی عملی و شبیه‌سازی است

۴- نتیجه‌گیری:

در این مقاله با استفاده از رهیافت ماتریسی نمایه و محل برخورد پرتوها در هر رفت و برگشت در سلول چند بازتابی شبیه‌سازی و ساخته شد.

مراجع:

1. J. U. White, "“Long optical path of large aperture,”" J. Opt. Soc.Am **32**, 285-288 (1942).
2. R. L. Fork, D. R. Herriott, and H. Kogelnik, "A Scanning Spherical Mirror Interferometer for Spectral Analysis of Laser Radiation," Applied Optics **3**, 1471-1484 (1964).
3. C. Dyroff, *Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy for Trace Gas Measurements with High Sensitivity and Low Drift* (Univ.-Verlag, 2008)
4. N. Hodgson, and H. Weber, *Optical Resonators: Fundamentals, Advanced Concepts, Applications* (Springer, 2005).
5. J. A. Arnaud, and H. Kogelnik, "Gaussian Light Beams with General Astigmatism," Applied Optics **8**, 1687-1693 (1969).
6. V. L. Kasyutich, "Laser beam patterns of an optical cavity formed by two twisted cylindrical mirrors," Applied Physics B **96**.(۲۰۰۹) ۱۴۸-۱۴۱

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]