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

طراحی سلول جذبی چند عبوری حلقوی برای بیناب نمایی لیزری

امین صادقی فراز، سعید قوامی صبوری، علیرضا خورسندی

چکیده- در این مقاله یک سلول جذبی حلقوی چند عبوری برای بیناب نمایی جذبی لیزری با طول مسیر جذب زیاد در اندازه فیزیکی کم معرفی شده است. با استفاده از رهیافت اپتیک هندسی، مسیر پرتو در داخل سلول ردیابی و به ازای زاویه ورود معینی تعداد بازتاب ها از سطوح داخلی سلول حلقوی بهینه شده است. سپس نمایه پرتوی ورودی پس از خروج از سلول شبیه سازی شده و با بررسی های تجربی مقایسه شده است. نتایج نشان از همخوانی میان نتایج شبیه سازی شده در این مقاله و گزارشات تجربی دارند.

کلید واژه: بیناب نمایی جذبی، سلول جذبی چند عبوری، طول مسیر نوری

Design of a circular multipass absorption cell for laser spectroscopy

Amin Sadeghi Faraz ,Saeed Ghavami Sabouri and Alireza Khorsandi

Department physics, University of Isfahan

Abstract- In this work a circular multipass absorption cell with low physical size and long path length is introduced. By using geometrical optics ray path inside the cell is traced and optimized for a certain entering angle to obtain maximum reflection. Then profile of the entering beam is simulated after exiting from the cell and the results have been compared with a reported experimental one. The obtained results indicate that simulation and experiment are in good agreement.

Keyword: Absorption spectroscopy, Multipass absorption cell, Optical path length

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

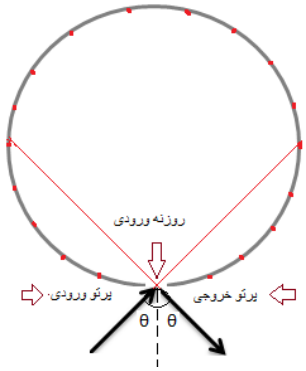
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

امروزه بیناب نمایی جذبی لیزری برای تشخیص واندازه‌گیری غلظت گازها با استفاده از مشخصات ذاتی به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. این روش کاربردهای وسیعی در حوزهای مختلف از جمله صنعت و پزشکی دارد. بسیاری از گازهای آلاینده در اندازه‌گیری‌های میدانی غلظت بسیار پایینی دارند. از این رو بر اساس قانون بیرلامبرت[1] تغییر شدت لیزر در اثر جذب گاز چندان محسوس نیست. یک راه آن است که طول برهمکنش را زیاد کرد. برای این منظور از سلول‌های جذبی چند عبوری استفاده می‌کنند که اولین نمونه آن در سال ۱۹۴۲ توسط وایت ساخته شد. این سلول از سه آینه کروی تشکیل شده است[۱]. دو دهه بعد هریوت سلولی طراحی کرد که ازدو آینه با شعاع انحنای یکسان ساخته شده بود[۲]. در سال ۱۹۹۵ مانوس از آینه‌های استوانه‌ای در سلول استفاده کرد که پرتو لیزر می‌توانست در یک حجم ثابت تعداد رفت و برگشت بیشتری انجام دهد. در سال ۲۰۰۱ سلول حلقوی‌ای طراحی و ساخته شد که بر خلاف انواع مرسوم آن که از دو آینه با فاصله معین تشکیل شده‌اند، آن از یک حلقه دایره‌ای با سطوح داخلی بازتابنده ساخته شده است. چنین ساختاری این امکان را فراهم می‌کند تا طول مسیر نوری متناسب با تغییر زاویه پرتو ورودی به داخل آن، تغییر کند. در این پژوهش، با استفاده از رهیافت هندسی مسیر پرتو در داخل سلول را ردیابی و شبیه‌سازی کرده و پارامترهای موثر برطول مسیر نوری را بررسی کرده‌ایم. نتایج این شبیه سازی با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند و با استفاده از رهیافت ماتریس پرتو، نمایه پرتو را پس از یک بازتاب از سطح سلول حلقوی شبیه سازی کرده‌ایم.

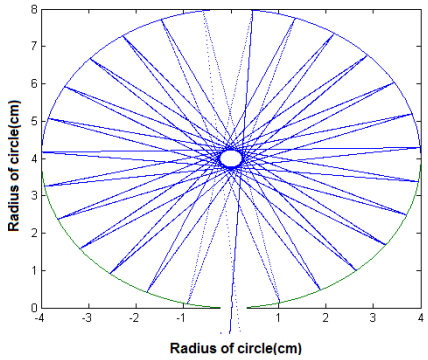
۲-تعیین مسیر پرتو در داخل سلول

در این بررسی پرتو فرودی با زاویه دلخواه θ وارد سلول می‌شود و در اثر بازتاب‌های منظم با همان زاویه از سلول خارج می‌شود.



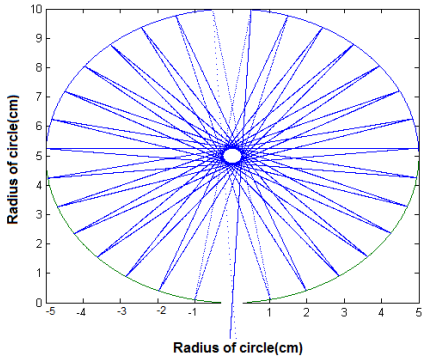
شکل ۱: سلول جذبی چند عبوری حلقوی

اگر زاویه پرتو ورودی به داخل سلول حلقوی $\theta = ۳/۳^0$ و شعاع سلول r=۴ سانتی‌متر باشد. پرتو بعد از ۲۷ بازتاب و طی مسیر نوری ۲/۱۶متر با همان زاویه ورودی از سلول خارج می‌شود که میان مدل ارائه شده و نتیجه تجربی توافق خوبی برقرار است[۳]. نتیجه‌ی این بررسی در شکل (۲) آمده است.



شکل ۲: ردیابی پرتو ورودی به سلول حلقوی با زاویه ورودی $\theta = ۳/۳^0$ و r=۴ سانتی‌متر[۳].

شکل(۳) نشان می‌دهد که با تغییر زاویه ورودی پرتو به $\theta = ۲/۹^0$ و تغییر شعاع حلقه به r= ۵ سانتی‌متر پرتو بعد از ۳۱ بازتاب و طی مسیر نوری ۳/۱ متر و با همان زاویه ورودی از سلول حلقوی خارج شده است. این مورد نیز با نتیجه تجربی در مرجع شماره [۴] توافق دارد.

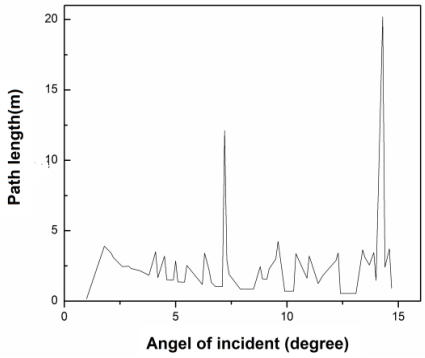


شکل ۳: ردیابی پرتو ورودی به سلول حلقوی در حالی که شعاع سلول به ۵سانتی‌متر افزایش یافته و زاویه ورودی $\theta = ۲/۹^0$ کاهش یافته است[۴].

دیده می‌شود که شعاع سلول و زاویه ورودی پرتو به سلول تعداد بازتاب‌ها و طول مسیر نوری را در بازه نسبتا گسترده‌ای تغییر می‌دهد. بنابراین می‌توان به ازای تغییر زاویه ورودی پرتو به داخل سلول طول مسیر نوری بیشینه را به ازای یک شعاع ثابت حلقه بدست‌آورد. نتایج این محاسبه در شکل (۴) نشان داده شده است.

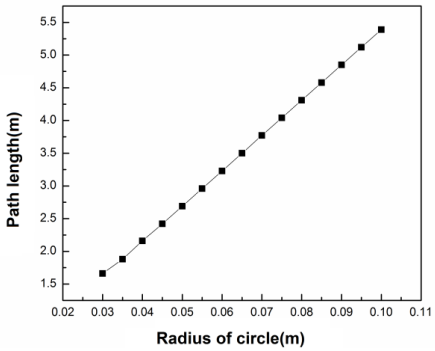
[1] Beer – Lambert

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]



شکل۴: تغییر طول مسیرنوری به ازای تغییر اندازه زاویه ورودی پرتو به سلول درشعاع r=۴ سانتی‌متر. ملاحظه می‌شود در زوایای $\theta=۷/۲^0$ و $\theta=۱۳/۸^0$ طول مسیر نوری به ترتیب ۱۳/۵و ۲۱/۵متر می‌شود.

بهینه‌سازی طول مسیر نوری را با تغییر شعاع حلقه در زاویه ورودی ثابت نیز می‌توان انجام داد. در این بررسی مشخص شد طول مسیر نوری با افزایش شعاع نسبت مستقیم دارد. شکل (۵) نتایج این بررسی را نشان می‌دهد.



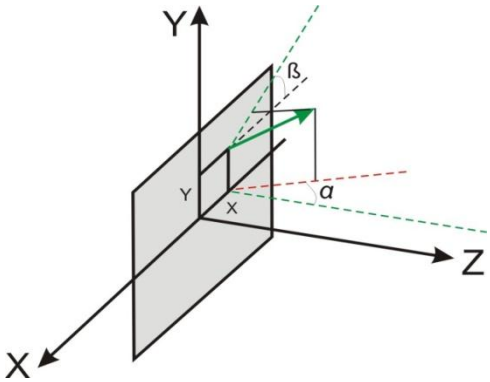
شکل ۵: تغییر طول مسیر نوری به ازای تغییر شعاع در حالی که زاویه ورود پرتو $\theta=۳/۳^0$ است.

۳-انتشار پرتو گاوسی دارای آستیگماتیسم:

نمایه پرتو ورودی به داخل سلول در اثر بازتاب‌های متوالی در داخل سلول تغییر شکل پیدا می‌کند و از حالت دایره‌ای اولیه خارج می‌شود. به همین دلیل علاوه بر طول مسیر نوری، به نمایه پرتو نیز باید توجه داشت. برای بررسی تغییر نمایه پرتو از رهیافت اپتیکی ماتریس‌ها استفاده می‌شود. ماتریس‌های دو بعدی که برای توصیف موقعیت پرتو و اثر المان اپتیکی بر ردیابی پرتو گاوسی استفاده می‌شود برای دستگاه‌هایی مفید هستند که دارای تقارن چرخشی باشند. با توجه به این که اجزای اپتیکی تقارن چرخشی ندارند. هر پرتو توسط ۴ مختصه-ی زیر توضیح داده می‌شود:

$$r=(x,y,\alpha,\beta) \qquad (۱)$$

که α وβ به ترتیب زاویه چرخش با محور z و x می‌باشد..



شکل ۳: مشخصه‌های پرتو در دو بعد.

پارامتر Q پرتو بعد از عبور از المان اپتیکی تغییر می‌کند. با استفاده از قانون ABCD برای ماتریس‌ها پارامتر Q را می‌توان به صورت زیر مشخص کرد[۵]:

$$Q_{out}^{-1}=\frac{C+DQ_{in}^{-1}}{A+BQ_{in}^{-1}} \qquad (۲)$$

Q^{-1} تانسور مختلط انحناست و A، B، C و D ماتریس‌های دو بعدی هستند. میدان یک پرتو گاوسی در مختصات دکارتی در راستای محور oz به شکل زیر است:

$$E(r,z)=E(z)exp\left[-\frac{ik}{2}(r^TQ^{-1}r)\right] \qquad (۳)$$

که در آن r معرف ماتریس مکان پرتو و r^T ترانهاده آن و عناصر تانسور انحنای مختلط Q^{-1} در زیر آمده است:

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

اجزای Q^{-1} در رابطه‌ی (۴) به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{q_{ij}}=\frac{1}{R_{ij}}-\frac{2i}{kw_{ij}^2} \qquad i,j=x,y,z \qquad (۵)$$

که در آن w_{ii} اندازه لکه در راستاهای x وy و R_{ii} شعاع انحنای پرتو است. توزیع شدت متناسب است با:

$$I\propto EE^* \qquad (۶)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

با توجه به توزیع شدت، نمایه سطح مقطع پرتو به صورت بیضوی در می‌آید:

$$\left(\frac{x^2}{w_{xx}^2}+\frac{y^2}{w_{yy}^2}+\frac{2xy}{w_{xy}^2}\right)=\text{const} \qquad (۷)$$

۴- تعیین نمایه پرتو

نمایه پرتو پس از یک فرود و بازتاب از سطح در داخل سلول تغییر می‌کند. تغییر نمایه پرتو با استفاده از رهیافت ماتریسی قابل مشاهده است. پرتو ابتدا مسیر آزاد به طول l_1 را طی می‌کند. سپس به یک سطح انحنادار با شعاع انحنای R_x می‌رسد و پس از یک بازتاب، مسیر آزاد به طول l_2 را طی می‌کند. ماتریس های m_3, m_2, m_1 به ترتیب هریک از موارد بالا را نمایندگی می‌کند:

$$m_1=\begin{pmatrix}1&0&l_1&0\\0&1&0&l_1\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}$$

$$m_2=\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\\frac{-2}{R_x}&0&1&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}$$

$$m_3=\begin{pmatrix}1&0&l_2&0\\0&1&0&l_2\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{pmatrix} \qquad (۸)$$

اگر چرخش سلول را نیز نسبت به پرتو ورودی در نظر بگیریم:

$$R(\phi)=\begin{pmatrix}\cos\phi&\sin\phi&0&0\\-\sin\phi&\cos\phi&0&0\\0&0&\cos\phi&\sin\phi\\0&0&-\sin\phi&\cos\phi\end{pmatrix} \qquad (۹)$$

$$M_{rotated}=R(-\phi)*m_2*R(\phi) \qquad (۱۰)$$

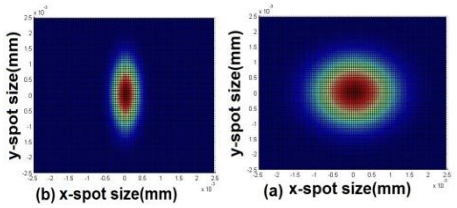
با در نظر گرفتن روابط فوق حاصل ماتریس کلی به صورت زیر است:

$$M_{tot}=m_1*m_{rotated}*m_3 \qquad (۱۱)$$

محاسبه‌ی ماتریس‌ها و مشخصه‌یابی نمایه پرتو برای یک فرود و بازتاب توسط نرم‌افزارMATLAB درسلولی با مشخصات زیر انجام شده است[۳]:

l_1=۷/۹۸ cm، l_2=۸/۰۱cm ، ϕ = ۳/۳^0 ،R_x =۴cm

پارامتر Q پرتو و توزیع شدت از روابط (۲) و (۶) قابل محاسبه است. مشاهده می‌شود، نمایه پرتو بعد از عبور از المان‌های اپتیکی از حالت دایره‌ای خارج شده و به صورت بیضوی در آمده است که توافق خوبی میان مدل ارائه شده و نمونه تجربی برقرار است.



شکل۶ : شکل پرتو و توزیع شدت شبیه سازی شده در داخل سلول (a) هنگام فرود پرتو، (b) پس از یک بازتاب از سطح داخلی سلول

نتیجه‌گیری:

در این مقاله مسیر پرتو در داخل سلول شبیه‌سازی و با نمونه‌های تجربی مقایسه شد و وابستگی طول مسیر نوری با تغییر شعاع و زاویه ورودی پرتو به داخل سلول مشخص گردید. در ادامه تغییر نمایه پرتو در اثر بازتاب در داخل سلول شبیه سازی شده و با نتیجه تجربی گزارش شده توافق خوبی داشت.

[1] Tuazon, E., et al., *A kilometer pathlength Fourier-transform infrared system for the study of trace pollutants in ambient and synthetic atmospheres. Atmospheric Environment (1967), 1978.* ***12****(4): p. 865-875.*
[2] Fork, R., D. Herriott, and H. Kogelnik, A scanning spherical mirror interferometer for spectral analysis of laser radiation. Applied Optics, 1964. **3**(12): p. 1471-1484.
[3] Tuzson, B., et al., *Compact multipass optical cell for laser spectroscopy. Optics letters, 2013.* ***38****(3): p. 257-259.*
[4] Manninen, A., et al., Versatile multipass cell for laser spectroscopic trace gas analysis. Applied Physics B, 2012. **109**(3): p. 461-466.
[5] Hodgson, N. and H. *Weber, Laser resonators and beam propagation. 2005: Springer.*

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]