



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



مطالعه و بهینه‌سازی نمایه پرتو در سلول جذبی چندعبوری چندضلعی و حلقوی

پدرام آشفته اردکانی^۱؛ محمدعلی حداد^{۱،۲}

^۱دانشکده فیزیک دانشگاه یزد، صفائیه، بلوار دانشگاه، یزد، صندوق پستی: ۸۹۱۹۵-۷۴۱

^۲گروه پژوهشی فوتونیک، آزمایشگاه تحقیقاتی بینابنگاری لیزری، دانشگاه یزد، صفائیه، بلوار دانشگاه، یزد.

ashofte@stu.yazd.ac.ir | mahaddad@yazd.ac.ir

چکیده - بینابنگاری جذبی با استفاده از پرتوی لیزر یکی از روشهای بسیار حساس و دقیق در آشکارسازی و شناسایی مولکولهای گازی مختلف است. به کارگیری سلولهای چندعبوری گوناگون منجر به افزایش طول مسیر پرتو (عمق اپتیکی) در محیط نمونه و نیز بهبود دقت ثبت بینابهای جذبی خواهد شد. در این مقاله سه هندسه از سلول چندعبوری انتخاب و شکل نمایه پرتو لیزری و همچنین نسبت شدت پرتوی خروجی به پرتوی فرودی در این سه هندسه مورد بررسی قرار گرفته شده است. نشان داده شده است که سلول چندعبوری چندضلعی نسبت به نمونههای حلقوی از مزیت‌های ویژه خود برخوردار است.

کلید واژه- بینابنگاری جذبی لیزری، ردیابی پرتو، سلول بازتابی حلقوی، سلول چندعبوری

Beam profile study and optimization in polygonal and circular Multipass absorption cell

Pedram Ashofteh Ardakani¹; Mohammad Ali Haddad^{1,2}

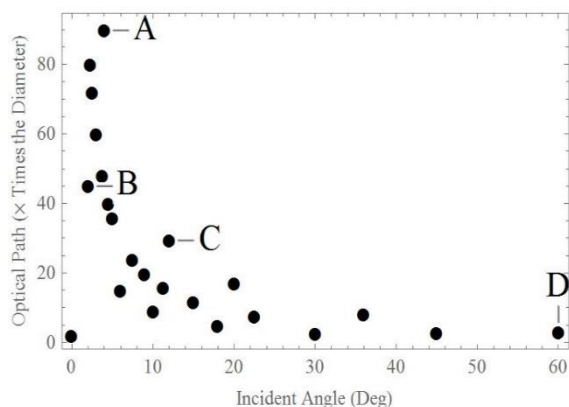
1. Department of Physics, Yazd University, Yazd, Iran. PO Box 89195-74

2. Photonic Research Group, Laser Spectroscopy Research Laboratory, Yazd University, Yazd, Iran.

ashofte@stu.yazd.ac.ir | mahaddad@yazd.ac.ir

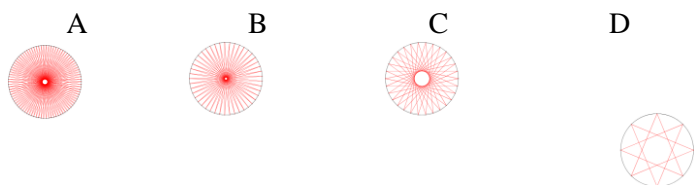
Abstract- Laser -based absorption spectroscopy is an elegant method for identifying and detection of molecular gases in different environments. Utilizing various Multipass cells provides longer absorption length (absorption depth) and consequently improves the sensitivity of this method. In this article we present ray tracing simulations for beam profile optimization and the optical design of three polygons and circular Multipass reflection cells. It is found the polygon geometry has its own significant advantages compared to other geometries.

Keywords: Circular Reflection Cell, Geometric optical design, Laser Absorption Spectroscopy, Multipass Cells



شکل ۲: طول مسیر اپتیکی به ازای زوایای معین ورود پرتو

ملاحظات اولیه طراحی



A: $P = 90, Q = 43, \theta = 4.0^\circ, L \approx 90.0 \times \text{Unit}$
B: $P = 45, Q = 22, \theta = 2.0^\circ, L \approx 45.0 \times \text{Unit}$
C: $P = 30, Q = 13, \theta = 12.0^\circ, L \approx 29.4 \times \text{Unit}$
D: $P = 8, Q = 3, \theta = 22.5^\circ, L \approx 7.4 \times \text{Unit}$

شکل ۳: نمای چند نمونه از حالت‌های ممکن به ازای زوایای ورودی متفاوت پرتوی لیزر به سلول حلقوی.

پارامترهای اصلی تعیین کننده مسیر نوری در سلول‌های چندباز عبوری از قاعده هندسی چندضلعی ستاره‌ای استخراج می‌شوند. به منظور محاسبه زاویه ورود (θ) و طول مسیر نوری (l_{opt}) کفایت پارامترهای مناسب در معادله (۲) و (۳) جایگذاری شوند.

$$\theta = \frac{\pi}{2} \times \left(1 - \frac{2q}{p} \right)$$

$$(2) \quad l_{opt} = 2 \times n_{pass} \cdot r_{circle} \cdot \cos(\theta)$$

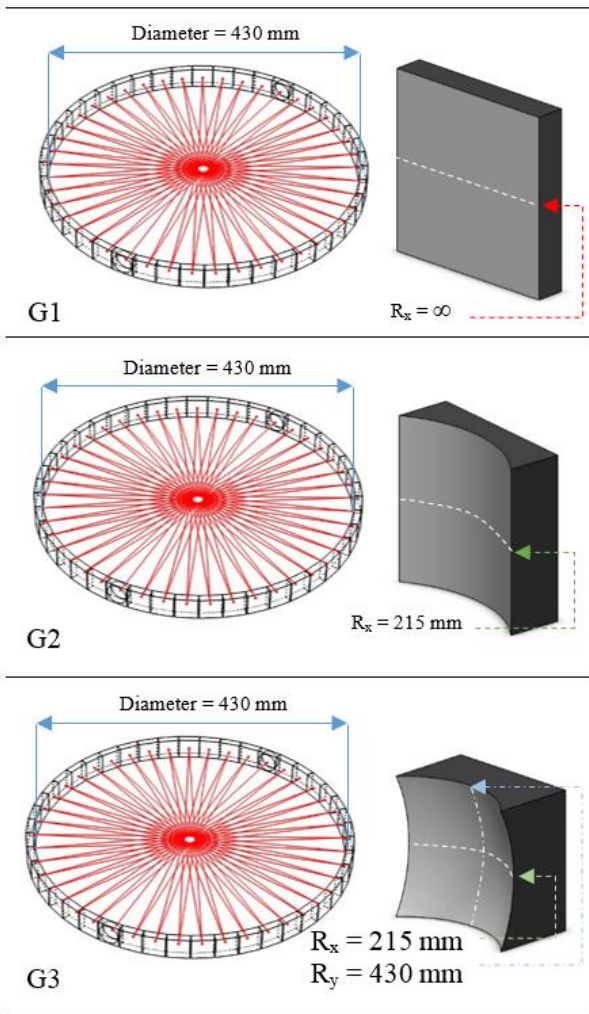
در صورتی که p و q نسبت به تقسیم‌پذیر نباشند، p معادل با تعداد بازتاب نور خواهد بود. در این معادلات، n_{pass} تعداد عبور و r_{circle} شعاع سلول است. نمونه مسیرهای منظم شکل گرفته به ازای زوایای مختلف ورود نور به سلول حلقوی در شکل ۱ قابل مشاهده و مقایسه است.

مقدمه

در بسیاری از کاربردهای بینابنگاری جذبی، اندازه‌گیری تغییرات شدت نور جذبی (و یا لیزری) پس از برهمکنش با محیط گازی به عنوان سنجه مورد توجه است [۱]. کاهش شدت نور جذبی درون سلول اپتیکی حاوی گاز نمونه بطور عمده تحت تأثیر دو فرآیند جذب و پراکندگی نور قرار دارد. اگر توزیع مولکول‌های گاز در مسیر نوری یکنواخت و اثر پراکندگی ناچیز باشد، کاهش شدت نور پس از طی مسیر d در نمونه، با دانستن عمق اپتیکی محیط با توجه به قانون معروف بیرلمبرت (Beer-Lambert) قابل تخمین است.

یکی از عوامل بسیار مهم محدودکننده در آشکارسازی و تخمین تراکم مولکول‌های گازی در بینابنگاری جذبی، مقدار نرخ سیگنال به نوفه شدت نور در اندازه‌گیری است. نشان داده شده است با توجه به قانون بیرلمبرت و بکارگیری برخی از ملاحظات تجربی با افزایش مسیر نوری پرتو، دقت و حساسیت اندازه‌گیری گازهایی با غلظت بسیار کم، با ثبت بینابهایی با نرخ سیگنال به نوفه بیشتر، بهبود چشمگیری خواهد داشت [۳].

با توجه به آنچه اشاره شده است، طراحی و بکارگیری سلولهای جذبی چند عبوری پرتو همواره مورد توجه بوده است. معایب و مزایای متوجه تعدادی از این سلولهای جذبی در مرجع [۴] آمده است. در میان انواع طراحی‌های ارائه شده، سلول‌های جذبی حلقوی دارای ابعاد کوچک و وزن کم هستند [۵]. این نسل از سلول‌های جذبی، به عنوان یکی از ابزارهای جدید بینابنگارهای جذبی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله، با توجه به نیاز آزمایشگاهی تعریف شده در بینابنگاری جذبی لیزری رادیکالهای آزاد و با توجه به پارامترهای مرتبط و نیز امکانات فنی و آزمایشگاهی قابل دسترس، یک هندسه از سلول چندضلعی و دو هندسه از سلول حلقوی طراحی و سپس نمایه و انتشار موجی پرتوی لیزر در نمونه‌های طراحی شده مورد مطالعه قرار گرفته است. برای انجام این مطالعه، از رهیافت اپتیک موجی تعریف شده در نرم‌افزار تخصصی مهندسی اپتیک زیمکس (ZEMAX) استفاده شد.



شکل ۳: ترسیم سه هندسه G1، G2 و G3

به داخل سلول مشخصه‌یابی شده‌اند. شکل ۴-الف نمایه پرتو عادی در ابتدای ورود به سلول، پس از ۲۲ بازتاب و هنگام خروج از سلول را نشان می‌دهد.

۲. شکل ۴-ب نشان‌دهنده نمایه‌های مشابه در زمانی است که پیش از ورود پرتو از یک لنز به منظور کانونی کردن پرتو استفاده شده است. مقدار فاصله کانونی لنز انتخاب شده در حالت اخیر با بهینه‌سازی نسبت شدت پرتوی خروجی از سلول به شدت پرتوی فرودی بهینه‌سازی شده است. مقدار بهینه این مقدار برای حالت هندسی چندضلعی (هندسه G1) $f \approx 85 \text{ cm}$ و برای حالت هندسه حلقوی G2 و G3 مقدار $f \approx 300 \text{ cm}$ بدست آمده است.

۳. با توجه به امکان خطا و انحراف جزئی پرتوی فرودی، بررسی تأثیر انحراف پرتو از زاویه ورودی بر شدت پرتوی خروجی به منظور امکان‌سنجی پیاده‌سازی آزمایشگاهی دستگاه مطالعه شد. بنابراین با منحرف کردن پرتو پیش از ورود به سلول در هر سه حالت هندسی بررسی شده و میزان حساسیت هر کدام در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در صورتی که دقت تنظیم پرتوی ورودی به اندازه ۰٫۰۵ درجه در دسترس باشد، حالت G1 به دلیل سهولت ساخت، سادگی هندسه و قطعات اپتیکی مورد نیاز و بالا بودن

در شکل ۲، طول مسیر نوری حاصل از بازتاب پرتو در سلول حلقوی به شعاع معین به ازای مقادیر مختلف زوایای فرودی نشان داده شده است که هر یک از زوایا متناظر با مقدار معینی از زوج p و q است. با کاهش زاویه ورودی، طول مسیر بیشتری از پرتوهای بازتابی در نواحی مرکزی سلول حلقوی قرار می‌گیرد. از سوی دیگر نمایه پرتو کمتر دچار اثرات ناشی از ابیراهی آستیگماتیسم می‌شود [۵].

ملاحظه دیگری که در طراحی مورد توجه واقع شده است محدودیت در تعداد بازتابهای پرتو به واسطه مقدار نوفه اپتیکی (Optical noise) می‌باشد. این قید در طراحی به تفصیل در [۶] شرح داده شده است. به عبارت دیگر، نشان داده شده است که اگر ضریب بازتاب دیواره داخلی سلول مقدار R_{ref} باشد، بیشینه تعداد بازتابها مقدار P_{max} خواهد بود. این مقدار عبارت است از:

$$P_{max} = -2 \times \left(\frac{1}{\ln(R_{ref})} + 1 \right) \quad (3)$$

انتخاب پارامترهای مناسب در طراحی

با توجه به آنچه که در بالا اشاره شد در طراحی سلول چندضلعی و نیز حلقوی، تعداد بازتاب $p = 45$ و $q = 22$ و زاویه ورودی ۲ درجه انتخاب شد. انتخاب این مقادیر برای سلولی به شعاع ۲۱۵ میلی‌متر، طول اپتیکی تقریبی ۱۹ متر (معادل ۸۸ برابر شعاع سلول) را فراهم مینماید. همچنین با استفاده از رهیافت اپتیک موجی، پرتوی لیزری با طولموج ۵۳۲ نانومتر، با شدت اولیه ۲۴۰ میلی وات، واگرایی ۱ میلی‌رادیان، قطبش عمودی ۹۸ درصد و مد TEM_{00} به عنوان پرتوی فرودی انتخاب، و تغییرات نمایه پرتو پس از بازتابهای متوالی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه ماده لایه نشانی سطوح بازتاب کننده، نقره با ضریب بازتاب ۹۸ درصد در طولموج ۵۳۲ نانومتر در نظر گرفته شده است. با انتخاب $p = 45$ در طراحی و مقدار ضریب بازتاب ۹۸ درصد، شرط محدودیت نوفه اپتیکی مورد توجه قرار گرفته شده است.

به منظور مطالعه نمایه پرتو، با بهره‌گیری از تئوری تشدیدگرها سه هندسه شامل یک چندضلعی با ۴۵ ضلع و نیز دو حالت هندسه حلقوی، با رعایت نکات اشاره شده در بالا در مطالعه نمایه پرتو طراحی و انتخاب شده‌اند. شکل ۳ این سه هندسه را نشان می‌دهد. در این شکل، هندسه G1 شامل ۴۳ آینه تخت با ابعاد ۳۰ میلی‌متر در ۳۰ میلی‌متر است. هندسه G2 شامل یک استوانه بازتاب کننده به شعاع ۲۱۵ میلی‌متر است. همچنین هندسه G3 نشان داده شده در شکل شامل یک سطح بازتابی حلقوی با دو انحنای ۲۱۵ میلی‌متر در راستای افقی و ۴۳۰ میلی‌متر در راستای عمودی با ساختار همکانونی می‌باشد.

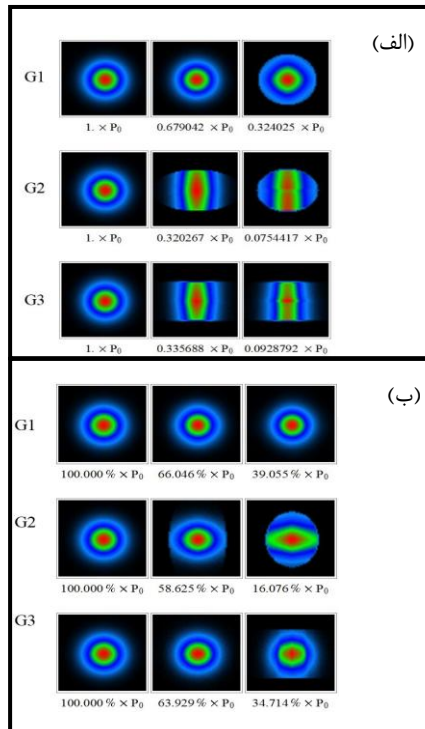
نتایج

۱. نمایه پرتو پس از انتخاب پارامترهای مربوطه در هر یک از هندسه‌های انتخاب شده شکل ۳ با در نظر گرفتن پرتو لیزری با مشخصه‌های ذکر شده در دو حالت با تابش عادی و کانونی شده

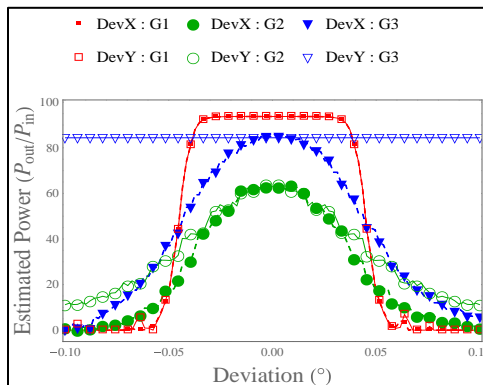
شدت پرتوی خروجی عملکرد مناسبی دارد. در ضمن، با توجه به اینکه در سلول‌های کوچکتر احتمال همپوشانی لکه‌های نور روی آینه‌ها وجود دارد، پیشنهاد می‌شود تأثیر برهمکنش اختلاف فاز پرتوهای خروجی در شدت خروجی پرتو در نظر گرفته شود.

مرجع‌ها

- [1]W. Demtröder, *Laser Spectroscopy 2*. 2015.
- [2]M. Baudalet, *Laser Spectroscopy for Sensing: Fundamentals, Techniques and Applications*. Elsevier, 2014.
- [3]M. L. Thoma, R. Kaschow, and F. J. Hindelang, "A multiple-reflection cell suited for absorption measurements in shock tubes," *Shock Waves*, vol. 4, no. 1, pp. 51–53, 1994.
- [4]Y. Guo and L. Sun, "Compact optical multipass matrix system design based on slicer mirrors," *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 5, pp. 1174–1181, 2018.
- [5]B. Tuzson, M. Mangold, H. Looser, A. Manninen, and L. Emmenegger, "Compact multipass optical cell for laser spectroscopy," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 3, pp. 257–9, 2013.
- [6]D. Ritz, M. Hausmann, and U. Platt, "An Improved Open path Multi-Reflection Cell for the Measurement of NO₂ and NO₃ Dominique Ritz*, Martin Hausmann and Ulrich Platt Institut für UmweltPhysik der Universität Heidelberg D-6900 Heidelberg, INF 366," vol. 1715, pp. 200–211, 1992.



شکل ۴: الف-نمایه پرتوی لیزر
 عادی، ب- نمایه پرتوی لیزر
 کانونی شده



شکل 5