

Design and Fabrication of V-Shaped Resonator for Using in Laser Spectroscopy Based on Optical Feedback Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy¹

Vahideh Faghihi^{*2}, Mohammad Reza Rashidian Vaziri^{3,4}
and Hossein Razzaghi⁵

Abstract

In this study, we present the design and fabrication of a V-shaped resonator that served as an absorption chamber in a laser spectroscopy system for water stable isotope measurement (²H, ¹⁷O, ¹⁸O) based on optical feedback cavity-enhanced absorption spectroscopy. In the design of a resonator, its length and the radius of curvature of the mirrors guarantee the optical stability of the system. The resonator mirrors are designed considering the condition of stability and based on the desired mode structure of the resonator output. The V-shaped resonator is designed with two arms of 40 cm and inner diameters of 5 mm making an angle of 1.7°. This resonator has an internal volume of 20 cm³ which provides fast response of laser spectrometer. The high reflectivity of mirrors leads to an effective absorption optical path length of 13 km and a high finesse optical resonator of $F \sim 52 \cdot 000$. These values allow low concentration water vapor isotope analyses and resolution of the absorption spectrum of isotopes for accurate isotope measurements, respectively. Resonator mirrors are designed using Mcleod software to have maximum reflectance at a wavelength of 1.4 micrometers. By making a V-shaped optical resonator for measuring stable isotopes of water and subsequent development for measuring stable isotopes of other elements, the possibility of developing the application of stable isotopes in different areas of research will be provided.

Keywords: *V-Shaped Resonator, Laser Spectroscopy, Stable Isotopes, OF-CEAS Technology.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2023.44727.1346

² Assistant Professor, Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran (Corresponding Author). Email: vfaghihi@gmail.com.

³ Associate Professor, Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran-Iran. Email: mrashidian@aeoi.ir.

⁴ Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Ferdowsi University Mashhad, Iran. Email: rashidianvaziri@um.ac.ir.

⁵ Researcher, Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. Email: hrazaghi2016@gmail.com.

طراحی و ساخت تشدیدگر V- شکل

در دستگاه بیناب‌نمایی جذبی لیزری^۱ OFCEAS

وحیده فقیهی^{۲*}، محمدرضد رشیدیان وزیری^۳ و حسین رزاقی^۵

چکیده

در این پژوهش تشدیدگر V- شکل به عنوان محفظه جذبی در دستگاه بیناب‌نمایی لیزری جهت اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار آب ($H_2^{16}O$, $H_2^{17}O$, $H_2^{18}O$) طراحی و ساخته شده است. در طراحی یک تشدیدگر، طول تشدیدگر و شعاع انحنای آینه‌های بکار گرفته شده در بردارنده پایداری نوری سیستم هستند. آینه‌های تشدیدگر با در نظر گرفتن شرط پایداری و بر اساس ساختار موردنظر مد خروجی تشدیدگر طراحی شده‌اند. بر اساس شرایط بالا تشدیدگر V- شکل طراحی شده دارای دو بازو با قطرهای داخلی ۵ میلی‌متر و با طول معادل ۴۰ سانتی‌متر است که با یکدیگر زاویه 17° می‌سازند. این تشدیدگر دارای حجم داخلی ۲۰ سانتی‌متر مکعب است که امکان پاسخگویی سریع بیناب‌نگار لیزری را فراهم می‌کند. بازتابندگی بالای آینه‌ها منجر به طول جذب اپتیکی مؤثر ۱۳ کیلومتر و ظرافت اپتیکی تشدیدگر ۵۲,۰۰۰ می‌شود که مقادیر این کمیت‌ها امکان اندازه‌گیری در غلظت‌های خیلی پایین ایزوتوپ‌ها و جداسازی طیف جذبی آن‌ها را برای اندازه‌گیری‌های دقیق ایزوتوپی فراهم می‌کنند. آینه‌های تشدیدگر با استفاده از نرم‌افزار مک‌لود و به منظور داشتن بیشینه بازتابندگی در طول موج موردنظر طراحی شده‌اند. تشدیدگر نوری V- شکل طراحی شده برای اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار عناصر مختلف کاربرد دارد. البته، آینه‌های تشدیدگر باید بازتابندگی بالا در طول موج جذبی عنصر مورد مطالعه داشته باشند. با دستیابی به دانش تشدیدگر V- شکل برای مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار عناصر مختلف امکان توسعه پژوهش‌های کاربردی در زمینه به‌کارگیری ایزوتوپ‌های پایدار فراهم خواهد شد.

واژگان کلیدی: تشدیدگر V- شکل، بیناب‌نمایی لیزری، ایزوتوپ‌های پایدار، فناوری OFCEAS

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2023.44727.1346

^۲ استادیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران (نویسنده مسئول). Email: vfaghihi@gmail.com

^۳ دانشیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email: mrashidian@aeoi.ir

^۴ دانشیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران. Email: rashidianvaziri@um.ac.ir

^۵ پژوهشگر، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email: hrazaghi2016@gmail.com

۱. مقدمه

ایزوتوپ‌ها، اتم‌های یک عنصر با عدد اتمی (تعداد پروتون‌ها و الکترون‌های) یکسان ولی با تعداد نوترون‌های متفاوت هستند. این تفاوت منجر به عدد جرمی متفاوت و در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی برای ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر می‌گردد. ایزوتوپ‌ها به دو دسته پایدار و ناپایدار تقسیم می‌شوند. ایزوتوپ‌های پایدار به عناصر دیگر تجزیه نمی‌شوند. در مقابل، ایزوتوپ‌های ناپایدار (رادیواکتیو) به عناصر دیگر قابل تجزیه هستند. هرچند فراوانی نسبی ایزوتوپ‌های پایدار عناصر کمابیش ثابت است، اما تغییرات کوچک ولی قابل اندازه‌گیری در آن‌ها مشاهده می‌شود. این تفاوت به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی وابسته به جرم آن‌ها است. این تغییرات طبیعی در فراوانی نسبی ایزوتوپ‌های پایدار، آن‌ها را تبدیل به ابزارهای توانایی برای فهم فرآیندها در گستره وسیعی از کاربردها ساخته است. آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار مولکول‌ها در علوم مختلف از جمله کشاورزی، باستان‌شناسی، مطالعه الگوهای اقلیمی در گذشته، زیست‌شناسی، زمین‌شناسی، علوم محیطی، علوم تغذیه، پزشکی و غیره به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸-۱]. ایزوتوپ‌ها را می‌توان به عنوان ردیاب و ابزار تشخیصی استفاده کرد. به عنوان مثال، نسبت‌های ایزوتوپی دو ایزوتوپولوگ متان، یعنی مولکول متان با ترکیبات متفاوت ایزوتوپی، $^{13}\text{CH}_4/^{12}\text{CH}_4$ در جو زمین اطلاعاتی را در مورد منابع تولید، جذب و مسیرهای مختلف تولید این نوع گاز ارائه می‌دهد [۹-۱۲]. ایزوتوپ‌های پایدار آب، که مولکولی با بالاترین اهمیت زیست محیطی است، کاربردهایی در زمینه‌های مختلفی مانند جو‌شناسی، آب‌شناسی، هواشناسی، پزشکی، زیست‌شناسی و علوم تغذیه دارند [۱۳-۱۶]. استفاده از روش سنتی بیناب‌نمایی جرمی برای اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار عناصر مختلف از سالیان دور رایج است. با این وجود، بیناب‌نماهای جرمی نمی‌توانند ایزوتوپ‌های گازهای تراکم‌پذیر چون بخار آب را به صورت مستقیم شناسایی کنند؛ چرا که این مولکول‌ها در سراسر دستگاه از سیستم ورودی تا چشمه یونی متراکم شده و عملکرد دستگاه را مختل می‌سازند. به همین دلیل نمونه‌های آب باید به مولکول‌های کوچکی مانند CO_2 و H_2 تبدیل شوند تا توسط بیناب‌نماهای جرمی قابل اندازه‌گیری باشند. این نوع تبدیل‌ها پرهزینه و زمان‌بر بوده و مشکلاتی را به همراه دارند. از طرفی اندازه‌گیری مستقیم اکسیژن آب به دلیل همپوشانی جرمی H_2^{16}O و H_2^{17}O توسط بیناب‌نماهای جرمی امکان‌پذیر نیست. در

گذشته، کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار در بسیاری از زمینه‌ها به دلیل هزینه‌ی بالای دستگاه سنتی بیناب‌نمایی جرمی برای آنالیز ایزوتوپ‌ها محدود بوده است. در سال‌های کنونی، روش‌های بیناب‌نمایی مبتنی بر لیزر جایگزین معتبری برای بیناب‌نمایی جرمی در اندازه‌گیری دقیق، سریع، ساده و با هزینه‌ی پایین‌تر بوده‌اند.

تکامل سریع فناوری لیزر، به‌ویژه توسعه لیزرهای نیمه‌هادی گسیلنده در بازه طیفی وسیعی از مرئی تا فرورسرخ دور منجر به گسترش به‌کارگیری آن‌ها در حوزه‌های مختلف صنعتی و پزشکی شده است. تولید این لیزرها، توسعه فناوری‌های نوری وابسته برای انتقال تابش لیزر به مکان آزمون و تولید آشکارسازهای سریع و حساس منجر به پیشرفت روش بیناب‌نمایی لیزری و به‌کارگیری آن در کاربردهای مختلف شده است. بیناب‌نماهای لیزری در قیاس با بیناب‌نماهای جرمی مزایایی نظیر دقت بالا، کوتاه بودن زمان اندازه‌گیری، هزینه نگهداری کم‌تر، ابعاد کوچک‌تر دستگاه، توانایی بررسی هم‌زمان نسبت‌های ایزوتوپی و عدم نیاز به پیش‌آماده‌سازی نمونه را دارند. به همین دلایل، بیناب‌نماهای لیزری به تدریج جایگزین بیناب‌نماهای جرمی شدند. افزون بر این، ابعاد بزرگ بیناب‌نماهای جرمی به‌کارگیری آن‌ها را در پژوهش‌های میدانی غیرممکن می‌سازد و در مقابل قابل حمل بودن بیناب‌نماهای لیزری آن‌ها را برای پژوهش‌های میدانی به‌گزینه‌ای مناسب تبدیل می‌کند [۲۰-۲۱].

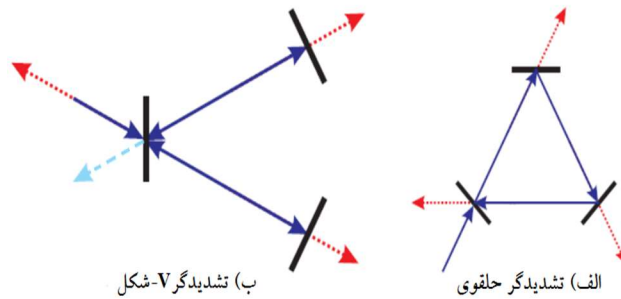
قلب اصلی تمام بیناب‌نماهای لیزری، تشدیدگر نوری بکار گرفته شده در آن‌ها است. نور تابش یافته از لیزر از راه یکی از آینه‌های تشدیدگر وارد آن شده و در صورت هم‌سامد بودن با یکی از مدهای آن، در داخل آن به حالت تشدید خواهد رسید. اغلب از لیزرهای دیودی با بازخورد توزیع شده^۱ یا لیزرهای آبشار کوانتومی^۲ در این‌گونه بیناب‌نمایی‌ها استفاده می‌شود. با به‌کارگیری تشدیدگرها با شکل‌های مختلف، روش‌های گوناگونی برای بیناب‌نمایی لیزری تاکنون توسعه یافته‌اند. تشدیدگر نوری در ساده‌ترین نوع خود یک کاواک نوری متشکل از دو آینه تخت و با اتلاف ناچیز است که موازی با یکدیگر تنظیم شده باشند. در چنین تشدیدگری، نور بین دو آینه و در مسیری به شکل خط مستقیم رفت و بازگشت‌های متوالی خواهد داشت. به همین دلیل این نوع از تشدیدگر تحت عنوان تشدیدگر خطی شناخته می‌شود. در رفت و برگشت‌های پشت سر هم، بخشی از نور از راه یکی از

¹ Distributed feedback diode lasers (DFB-DLs)

² Quantum-cascade lasers (QCLs)

آینه‌های تشدیدگر از آن خارج می‌شود. در صورت پر بودن فضای بین دو آینه از نمونه‌گازی تحت بررسی، نور خروجی بدلیل رخداد فرآیند جذب نوری دچار افت شده و علامت خروجی تشدیدگر را مشخص خواهد کرد.

در کاربردهای عملی، از لیزر به عنوان چشمه تابش نوری استفاده شده و سطوح بازتابنده آینه‌هایی با بازتابندگی بالا در طول موج تابش لیزری هستند. بازتابندگی بالا برای افزایش میزان رفت و برگشت‌های نوری بین دو آینه و افزایش مؤثر میزان جذب نوری موردنیاز است. باید در نظر داشت که به هنگام استفاده از آینه‌های تخت در ساخت تشدیدگر در صورت وجود اندکی نبود توازی بین سطوح خارجی دو آینه، باریکه لیزر پس از چند رفت و برگشت از آن خارج خواهد شد. پدیده‌ای که تحت عنوان ناپایداری تشدیدگر شناخته شده است. بدلیل دشواری حفظ پایداری در تشدیدگرهای خطی با آینه‌های انتهایی از نوع تخت، در آزمایش‌های عملی و برای حبس نور در درون تشدیدگر حداقل یکی از آینه‌ها با نوع کروی جایگزین می‌شود. افزون بر این، باید توجه داشت که در برخی از کاربردها که در آن‌ها نیاز به کاهش یا انتخاب بسامد بازخورد نوری باشد، از تشدیدگرهای غیرخطی نیز استفاده می‌شود [۲۱-۲۳]. در شکل (۱)، دو نوع ساختار تشدیدگر غیرخطی نشان داده شده است که در آن‌ها دیگر مسیر باریکه به شکل یک خط مستقیم متوالی بین دو آینه نیست. در هر دو شکل (۱-الف) و (۱-ب)، پیکان‌های با خط ممتد راستای نور فرودی و مسیر حرکت در داخل تشدیدگر را نشان می‌دهند. پیکان‌های نقطه‌چین نیز بیانگر راستای نور خروجی هستند. در شکل (۱-ب)، پیکان خط‌چین نور بازتابیده از آینه ورودی تشدیدگر V- شکل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱-الف)، هیچ مسیری وجود ندارد که نور فرودی بتواند آن را طی کرده و منجر به بازگشت (بازخورد) آن در راستای نور فرودی و در خلاف جهت انتشار اولیه شود. بنابراین تشدیدگر غیرخطی از این نوع، که تحت عنوان تشدیدگر حلقوی نیز شناخته می‌شود، بدون بازخورد است. اما در مورد تشدیدگر V- شکل، همان‌گونه که در شکل (۱-ب) نشان داده شده است، بازخورد نوری وجود دارد. وجود این نوع بازخورد نوری راه را برای توسعه روش‌های بیناب‌نمایی جذبی لیزری با حساسیت بالاتر مهیا کرده است.



شکل ۱ طرح دو تشدیدگر سه آینه‌ای الف) ساختار حلقوی برای حذف یا کمینه کردن بازخورد نوری، ب) ساختار V-شکل برای ایجاد بازخورد نوری.

تاکنون روش‌های مختلف بیناب‌نمایی جذبی حساسی مبتنی بر افزایش جذب درون تشدیدگر^۱ (CEAS) ابداع شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲۵, ۲۴, ۲۲]. روش CEAS پردازش داده‌ی ساده‌ای دارد و سبب عملکرد مناسب‌تر بیناب‌نماهای لیزری که بر مبنای این روش کار می‌کنند، می‌شود. چیدمان‌های گوناگونی برای پیاده‌سازی روش CEAS وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به چیدمان‌های OA-CEAS^۲ [۲۷, ۲۶] و OF-CEAS^۳ [۲۸, ۲۲] اشاره داشت. OA-CEAS حساسیت بالا و زمان اندازه‌گیری کوتاهی دارد، اما خروجی تشدیدگر توان پایینی داشته و از این رو، نیاز به استفاده از آشکارسازهای بزرگ و خنک‌سازی در این روش وجود دارد. از معایب دیگر این روش ابعاد عرضی بزرگ مورد نیاز تشدیدگر (شامل آینه‌های بزرگ با قطر حدود ۲ اینچ) است. این نیازمندی به ابعاد بزرگ از آنجا ناشی می‌شود که عملکرد OA-CEAS وابسته به توانایی برانگیختن مدهای عرضی مرتبه بالاتر تشدیدگر است. برهم‌نهی این مدهای عرضی بالا منجر به مسیرهای تاشده‌ی شبه‌دوره‌ای با طرح‌های لیسازو می‌شود که سطح آینه‌ها را پوشش می‌دهند. از این رو، در این روش آینه‌هایی با قطر بزرگ برای پوشش‌دهی این طرح‌ها استفاده می‌شوند. به دلیل حجم بالای تشدیدگر در این روش، حجم بالایی از نمونه‌گازی تحت آزمون باید در آن تزریق شود تا امکان اندازه‌گیری در زمان‌های قابل قبول فراهم آید. اما روش OF-CEAS تشدیدگر V-شکل در این کار بر مبنای آن طراحی شده است، ایرادهای بیان شده را ندارد.

^۱ CEAS :Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy

^۲ Off-Axis CEAS

^۳ Optical Feedback CEAS

تشدیدگر V- شکل قلب اصلی بیناب‌نمای لیزری در روش بیناب‌نمایی OF-CEAS است. شکل (۲)، چیدمان بیناب‌نمایی لیزری OF-CEAS را نشان می‌دهد و تشدیدگر دستگاه بیناب‌نمایی داخل مستطیلی خط‌چین در شکل نشان داده شده است. بازخورد نوری تشدیدگر V- شکل در ساختار OF-CEAS به داخل لیزر باز می‌گردد و با ورود به داخل لیزر منجر به شکل‌گیری اثری به نام زایش تزریقی^۱ می‌شود. این اثر، منجر به خود قفل‌شدگی^۲ لیزر می‌شود که طی آن مد طولی لیزر، که هم‌بسامد با بسامد بازخورد ورودی به آن است، بر سایر مدهای تحت پوشش ناحیه تقویت لیزری غالب شده و شروع به نوسان خواهد کرد. بنابراین بسامد تابشی لیزر با بسامد تشدیدگر یکسان شده و از این راه حساسیت اندازه‌گیری‌ها افزایش خواهد یافت. اغلب بدلیل این که مدهای تشدیدگر پهنای طیفی باریک‌تری از پهنای طیفی باریکه لیزر دارند، خروجی تشدیدگر نوفه‌دار و درهم آمیخته است. اما در روش OF-CEAS با استفاده از بازخورد نوری تشدیدگر و خود قفل‌شدگی لیزر، پهنای طیفی تابش لیزر کاهش یافته و امکان اندازه‌گیری دقیق‌تر و با کیفیت‌تر نیم‌رخ خطوط جذبی نمونه گازی با استفاده از این روش فراهم می‌آید. این ویژگی مطلوب، امکان اندازه‌گیری دقیق و تعیین نسبت‌های ایزوتوپی را فراهم می‌آورد. از دیگر برتری‌های OF-CEAS، توانایی کار در ناحیه فرورسوخ نزدیک است. در این ناحیه طیفی، قطعات نوری موردنیاز و همچنین لیزر و آشکارسازها در دمای معمولی (دمای اتاق) به شکل تجاری موجود هستند.

هدف از این پژوهش طراحی یک تشدیدگر غیرخطی V- شکل برای بیناب‌نمای لیزری مبتنی بر روش OF-CEAS برای اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار آب (^2H , ^{17}O , ^{18}O) می‌باشد. طول مناسب تشدیدگر در حقیقت طول دو بازوی تشدیدگر، قطر آینه‌ها و فاصله بین دو آینه خروجی تشدیدگر مشخص و سپس ساختار کلی آن طراحی شده است. میزان بازتاب موردنیاز آینه‌ها برای افزایش حساسیت و ظرافت اپتیکی بالای تشدیدگر تعیین و طول موج کاری لیزر موردنیاز با استفاده از پایگاه‌های داده HITRAN^۳ استخراج شده است. آینه‌های موردنیاز با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز نوری مک‌لود طراحی شده‌اند.

¹ Injection seeding

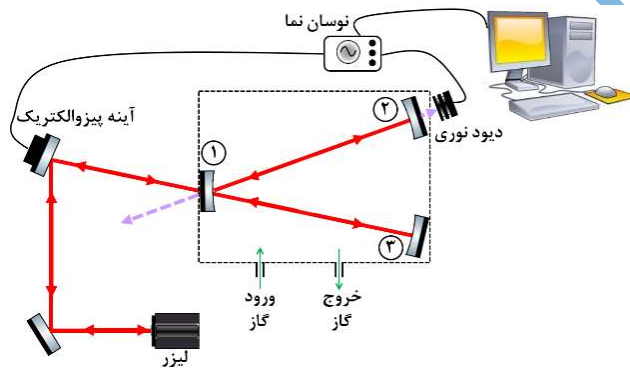
² Self-locking

³ HITRAN: High Resolution Transmission

۲. روش‌ها

۱.۲ طراحی تشدیدگر دستگاه بیناب‌نمایی لیزری مبتنی بر روش OF-CEAS

تشدیدگر غیرخطی V- شکل که در شکل (۲) نشان داده شده است و به عنوان محفظه جذب در بیناب‌نگار لیزری مورد استفاده قرار می‌گیرد، باید به صورت غیرقابل نفوذ طراحی و ساخته شود تا از هر گونه نشتی و یا ورود هوای خارجی به داخل محفظه جلوگیری شود. از آنجا که تشدیدگر برای اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار آب طراحی می‌شود جنس این تشدیدگر به منظور سازگاری با محیط آب از فلز استیل ضدزنگ در نظر گرفته می‌شود. آینه‌های تشدیدگر که با شماره‌های ۱-۳ مشخص شده‌اند باید با استفاده از نگه‌دارنده‌های مناسب در دو انتهای محفظه ساخته شده برای تشدیدگر نصب و ثابت شوند.



شکل ۲ طرح چیدمان بیناب‌نمایی لیزری با استفاده از تشدیدگر V- شکل مبتنی بر روش OF-CEAS.

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، بازخورد نوری با طی کردن همان مسیر نور فرودی روی آینه ۱ در خلاف جهت، به داخل لیزر وارد می‌شود. فاز بازخورد نوری و آهنگ روبش لیزر مشخصه‌های مهمی هستند که باید به دقت در طی فرآیند بیناب‌نمایی به روش OF-CEAS تحت هدایت باشند. فاز بازخورد نوری در یک حلقه بازخورد الکترونیکی و با تغییر دقیق فاصله بین لیزر و تشدیدگر از راه آینه‌ای که متصل به سیستم پیزوالکتریک (شکل (۲)) است، هدایت می‌شود. آهنگ روبش لیزر نیز به صورت تجربی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که زمان کافی برای انباشت انرژی در داخل تشدیدگر وجود داشته باشد. با استفاده از بازخورد نوری و بازگشت آن به درون لیزر و

قفل شدگی لیزر به مد تشدیدگر، پهنای گسیلی لیزر از حدود چند مگاهرتز به چند ده کیلوهرتز کاهش خواهد یافت که این امر منجر به افزایش بازدهی جفت شدگی لیزر به تشدیدگر و در نتیجه بهبود حساسیت و عملکرد تشدیدگر می شود. روش OF-CEAS با جزئیات و نکات زیادی همراه است که شرح تمامی آن ها خارج از بحث مقاله حاضر می باشد. خواننده علاقه مند به مطالعه در این زمینه می تواند به منابع معتبر و کاملی که در این زمینه وجود دارند مراجعه نماید [۲۹، ۳۰]. در ادامه پارامترهایی که در طراحی تشدیدگر نقش دارند معرفی و بحث می شوند.

در یک تشدیدگر خطی با طول L بسامد مدهای تشدیدی درون تشدیدگر را می توان طبق رابطه زیر بدست آورد [۳۱]:

$$v(m, n, q) = \frac{c}{2L} \left(q + \frac{n+m+1}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{g_1 g_2} \right) \quad (1)$$

که در آن، g_1 و g_2 طبق رابطه زیر وابسته به طول تشدیدگر و شعاع انحنای آینه های آن هستند:

$$g_i = 1 - \frac{L}{r_i}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

در حالی که، m و n شماره مدهای عرضی در دو راستای عمود بر محور نوری تشدیدگر و q شماره مد طولی را بیان می کنند. مدهایی با مقدار q یکسان، اما متفاوت در مقادیر m و n با نماد TEM_{mn} نشان داده می شوند. در صورت نوسان تشدیدگر در مد پایه $(m, n = 0)$ ، فاصله بسامدی بین مدهای طولی طبق رابطه (۱) برابر خواهد بود با:

$$\vartheta_{FSR} = \frac{c}{2L} \quad (3)$$

که، c سرعت نور در محیط است و ϑ_{FSR} بازه طیفی آزاد^۱ تشدیدگر نیز شناخته شده که تنها به طول تشدیدگر بستگی دارد. بازه فرکانسی برای مدهای عرضی مرتبه پایین ناشی از رابطه (۱) برای طراحی کاواک باید در نظر گرفته شود. نبود تداخل مابین مدهای TEM_{00} و دیگر مدهای عرضی مرتبه پایین یکی از شرایط طراحی ساختار کاواک می باشد.

در یک تشدیدگر خطی با دو آینه با ضریب بازتابندگی یکسان R ، شدت مدهای تشدیدی خروجی از تشدیدگر را می توان با رابطه زیر، تابع ایری، بیان کرد [۳۲]:

$$I_t(\vartheta) = I_0(\vartheta) \left[\frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \right] \quad (4)$$

¹ Free spectral range

که، ϑ فرکانس تابش فرودی، R ضریب بازتابندگی آینه‌ها و $\delta = \frac{4\pi l \vartheta}{c}$ اختلاف فاز بین دو مد تشدید متوالی خروجی تشدیدگر است. بر اساس رابطه بالا، شدت خروجی وقتی که $\frac{2\pi l \vartheta}{c} = m\pi$ و $\vartheta_m = m \frac{c}{2l} = m \Delta \nu_{FSR}$ باشد بیشینه است. پهنای نیم‌بیشینه^۱ مدها به صورت [۳۲]:

$$\Delta \vartheta_{FWHM} = \frac{c}{2\pi L} \frac{1-R}{\sqrt{R}} \quad (5)$$

است که هم به طول تشدیدگر و هم به ضریب بازتابندگی آینه‌ها بستگی دارد. نسبت بازه طیفی آزاد تشدیدگر به پهنای نیم‌بیشینه مدها، ظرافت اپتیکی کاواک به صورت:

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R} \quad (6)$$

شناخته می‌شود که قدرت تفکیک‌پذیری^۲ کاواک را بیان می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود این کمیت مستقل از طول تشدیدگر است و فقط به بازتابندگی آینه‌ها بستگی دارد. طول مؤثر جذب نوری تشدیدگر خطی به صورت:

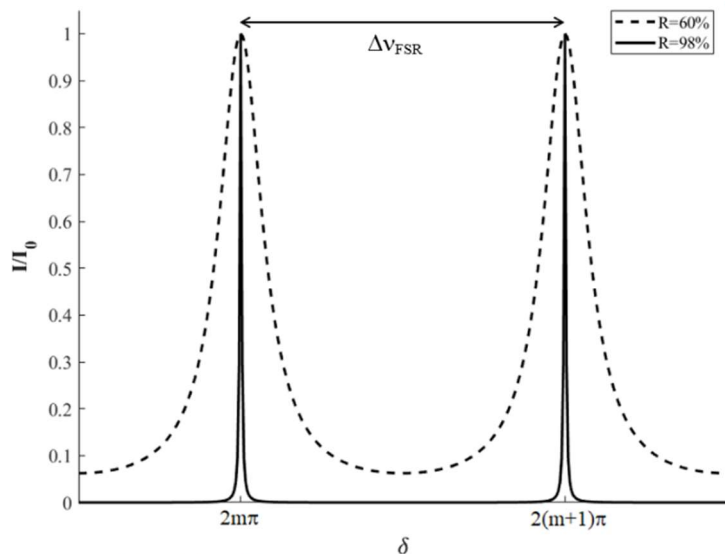
$$L_{eff} = \frac{L}{1-R} \quad (7)$$

است. رابطه (۴) به ازای دو مقدار R برابر با ۶۰٪ و ۹۸٪ در شکل (۳) رسم شده است. با توجه به شکل، با افزایش ضریب بازتابندگی آینه‌ها، پهنای نیم‌بیشینه مدها کاهش یافته و با نزدیک شدن R به ۱۰۰٪، به سمت صفر میل می‌کند. بنابراین، افزایش بازتابش آینه‌ها منجر به جداسازی طیفی مطلوب‌تر تشدیدگر می‌شود. در حقیقت، با استفاده از آینه‌هایی با بازتابندگی خیلی بالا (مقادیر بزرگ R نزدیک به ۱۰۰٪) پهنای طیفی مدهای طولی تشدیدگر خیلی باریک شده و تولید مدهای عرضی مرتبه بالا مشکل و مد TEM_{00} مد غالب خواهد بود [۳۳]. همان‌گونه که از رابطه (۳) پیدا است، به ازای مقادیر بزرگ‌تر طول تشدیدگر L ، بازه طیفی آزاد کوچک‌تر بوده و فاصله بسامدی بین مدهای طولی تشدیدگر کم‌تر خواهد شد. افزون بر این، یک تشدیدگر با طول بزرگ‌تر با افزایش طول مسیر مؤثر نوری (رابطه (۷)) سبب افزایش حساسیت (حد آشکارسازی) بیناب‌نمای جذبی می‌شود. اما یک محدودیت در انتخاب طول بازوی تشدیدگر، حجم آن است. بدیهی است که طول کمتر، حجم کلی کمتری را در درون تشدیدگر ایجاد می‌کند و این امکان تبادلات سریع در محفظه گازی را میسر می‌سازد که به نوبه خود پاسخ سریع‌تر بیناب‌نما را بدنبال خواهد داشت. حجم کوچک تشدیدگر (محفظه جذبی مورد استفاده در بیناب‌نمای لیزری) امکان ساخت دستگاه

¹ FWHM: Full Width at Half Maximum

² Resolution

بیناب‌نمای لیزری کوچک و قابل حمل صنعتی را فراهم می‌کند. البته باید در نظر داشت که حجم تشدیدگر (یا همان حجم بخار نمونه مورد آزمون) باید به اندازه‌ای باشد که امکان اندازه‌گیری کمیت‌های موردنظر در بازه زمانی مناسب تا پیش از خارج شدن نمونه را فراهم کند. همان‌طور که در بالا اشاره شد همچنین جهت جلوگیری از هرگونه نشی، تشدیدگر باید از لحاظ مکانیکی به صورت کامل آب‌بندی شود به همین منظور تشدیدگر باید به صورت یکجا از داخل یک بلوک استیل ضدزنگ ماشین کاری شود.



شکل ۳ شدت نور خروجی از تشدیدگر به صورت تابعی از اختلاف فاز بین مدهای متوالی برای مقادیر متفاوت ضریب بازتاب آینه‌ها. به ازای ضرایب بازتاب بالاتر، پهنای نیم‌بیشینه مدها باریک‌تر و جداسازی مدها از یکدیگر بهتر است (تولید شده از منبع [۳۲]).

برای این منظور باید قابلیت ماشین‌های برش سیم^۱ در برش طولی بلوک استیل را در نظر گرفت. با توجه به توضیحات بالا و امکانات ماشین کاری طول مناسب بازوی تشدیدگر (فاصله آینه ۱ از آینه‌های ۲ و ۳ در شکل (۲)) برابر با ۴۰ سانتی‌متر انتخاب شد. قطر آینه‌های کاواک نیز در حجم نهایی کاواک دخیل هستند. با توجه به محدودیت ساخت آینه‌های در ابعاد کوچک، قطر ۸ میلی‌متر برای آینه‌ها در نظر گرفته شد. همچنین با توجه به محدودیت مکانیکی جهت نصب آینه‌ها، تنظیم و آب‌بندی سیستم کاواک، فاصله بهینه مراکز دو آینه خروجی کاواک (آینه‌های ۲

¹ Wire cut machines

و ۳ در شکل (۲) ۱۲ میلی متر در نظر گرفته شد. به این ترتیب در نهایت تشدیدگر با طول بازوهای ۴۰ سانتی متر و زاویه ۱/۷ درجه مابین دو بازو طراحی شد.

نکته دیگری که باید در طراحی تشدیدگر مد نظر قرار داد میزان پایداری نوری آن است. پایداری تشدیدگر به پارامترهای هندسی کاواک؛ طول کاواک و شعاع انحنای آینه‌های کروی تشدیدگر بستگی دارد. شرط پایداری یک تشدیدگر نوری خطی را می‌توان به صورت $0 < g_1 \times g_2 < 1$ بیان کرد. با توجه به شرط پایداری تشدیدگر نوری، نزدیک بودن هر چه بیشتر به نقاط مرزی (صفر و یک) تنظیمات اپتیکی بسیار دقیقی را بدنبال خواهد داشت. با در نظر گرفتن آینه ۱ در شکل (۱)، سطح و دو آینه دیگر (شماره‌های ۲ و ۳ در شکل (۱)) با شعاع انحنای ۱ متر، می‌توان شرط پایداری بالا برای یک کاواک خطی دو آینه‌ای را برای کاواک سه آینه‌ای شکل V هم اعمال کرد. از آنجا که طول کل تشدیدگر، یعنی مجموع طول دو بازوی تشدیدگر، برابر با ۸۰ سانتی متر است، حاصل ضرب پایداری مربوطه ۰.۰۴ است و ساختار تشدیدگر پایدار می‌باشد.

لازم به یادآوری است که یک تشدیدگر غیرخطی با طول بازوی L را می‌توان یک تشدیدگر خطی به طول ۲L که از مرکز آن خمیده شده است در نظر گرفت. در نتیجه، روابط بالا (روابط (۱) تا (۷)) که برای تشدیدگر خطی در بالا بیان شد، با در نظر گرفتن L برابر با مجموع طول دو بازوی تشدیدگر غیرخطی و با اعمال ضریب بازتاب مؤثر برابر $R = (R_2 R_3)^{\frac{1}{2}} R_1$ در مورد تشدیدگر غیرخطی قابل استفاده می‌باشد. در جدول (۱) ویژگی‌های مهم تشدیدگر خطی و تشدیدگر غیرخطی V- شکل مقایسه شده‌اند [۳۴]. لازم به یادآوری است که ویژگی‌های بیان شده با مقادیر دقیق ضریب بازتاب آینه‌ها و طول دقیق بازوهای کاواک محاسبه و نتایج در انتها ارائه خواهد شد.

جدول ۱ مقایسه ویژگی‌های مهم تشدیدگر خطی و تشدیدگر V- شکل [۳۴].

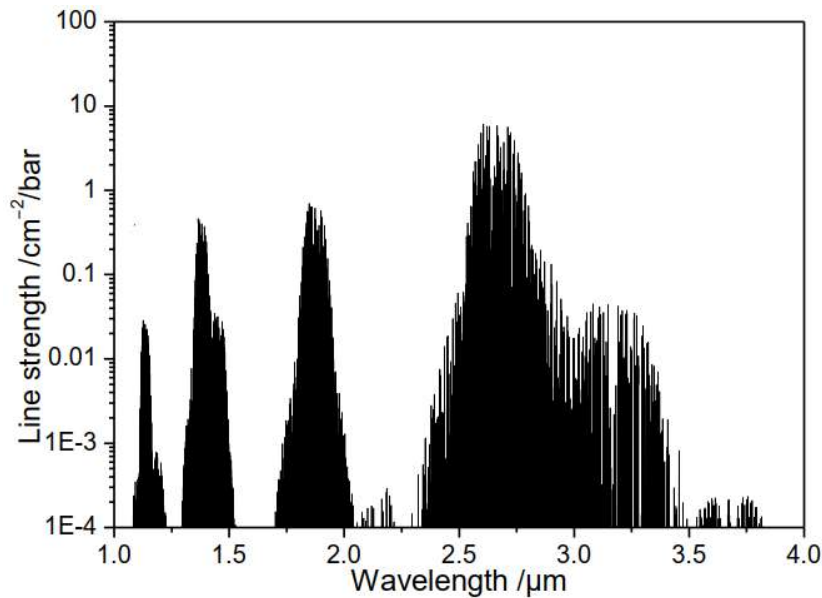
ویژگی اپتیکی	کاواک خطی	کاواک V شکل
بازه طیفی آزاد	$\frac{C}{2L}$	$\frac{C}{2(L_1 + L_2)}$
طول مؤثر جذب اپتیکی	$\frac{L}{1 - R}$	$\frac{L}{1 - R^2}$
ظرافت اپتیکی	$\frac{\pi\sqrt{R}}{1 - R}$	$\frac{\pi R}{1 - R^2}$

۲.۲ انتخاب لیزر مناسب

انتخاب طول موج مناسب لیزری جنبه کلیدی در طراحی هر دستگاه بیناب‌نمای لیزری است. ناحیه طیفی نزدیک و میانی فروسرخ^۱ برای اندازه‌گیری‌های ایزوتوپی بسیار مناسب هستند. چرا که در این ناحیه طیفی، بسامد چرخشی- ارتعاشی هر ایزوتوپولوگ در طیف مولکولی گازها منحصر به فرد است. این امر منجر به آن می‌شود که طیف جذبی ایزوتوپولوگ‌های متفاوت یک مولکول از یکدیگر در این ناحیه تمیز داده شوند. در این کار تشدیدگر با هدف اندازه‌گیری فراوانی ایزوتوپ-های پایدار آب (^1H , ^{17}O , ^{18}O) طراحی شده است. در شکل (۴)، طیف جذبی بخار آب از ۱ تا ۴ میکرومتر با استفاده از داده‌های پایگاه^۲ HITRAN و استفاده از برنامه HITRAN simulator رسم شده است [۳۵]. HITRAN، بانک اطلاعات جذب مولکولی، توسط رتمن و همکارانش در سال ۱۹۶۰ میلادی و محدود به اطلاعات جذبی هفت مولکول اصلی اتمسفر در ناحیه طیفی فروسرخ ایجاد شد. نسخه فعلی، HITRAN 2022، شامل اطلاعات طیفی برای ۵۵ مولکول مختلف و در مجموع ۱۴۴ ایزوتوپولوگ می‌باشد [۳۶]. تاریخچه و بعضی کاربردهای HITRAN توسط رتمن در منبع [۳۷] خلاصه شده است. HITRAN شامل پارامترهای بیناب‌نگاری ایزوتوپولوگ‌های مولکولی از جمله فرکانس مرکزی جذب، شدت جذب، انرژی حالت پایه، وابستگی پهنای طیف به دما، فشار و غیره است و از کدهای کامپیوتری برای شبیه‌سازی طیف مولکولی استفاده می‌کند. لازم به یادآوری است که پایگاه HITRAN تنها شامل داده‌های مربوط به شرایط اتمسفری است که در آن دما بین ۲۰۰ تا ۳۵۰ کلوین است.

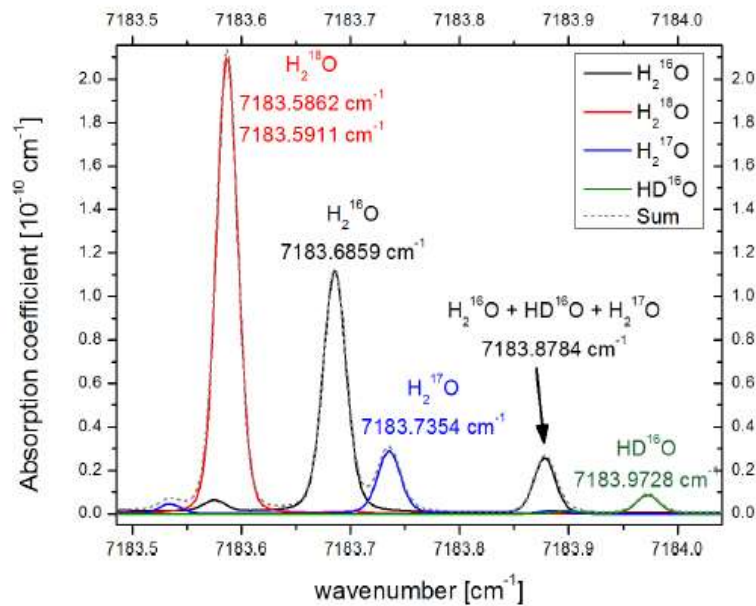
¹ Near- and mid-infrared spectral region

² HITRAN: high-resolution transmission molecular absorption



شکل ۴ طیف شبیه‌سازی شده جذبی آب با استفاده از داده‌های پایگاه HITRAN از ۱-۴ μm.

همانطور که در شکل (۴) دیده می‌شود، نواحی طیفی متفاوتی در محدوده فرسرخ برای جذب آب می‌توانند انتخاب شوند [۳۸-۴۰]. اما، آنچه مطلوب است این است که طیف جذبی مربوط به ایزوتوپولوگ‌های متفاوت مولکول مورد نظر (که برای مورد آب، ایزوتوپولوگ‌های $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ، $^1\text{H}_2^{17}\text{O}$ ، $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ ، $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$) در ناحیه طیفی انتخاب شده کاملاً از هم جدا بوده و همچنین قله‌های جذب بلندی جهت اندازه‌گیری‌های دقیق و افزایش حساسیت داشته باشند. همچنین طیف‌ها با یکدیگر و با طیف دیگر مولکول‌ها همپوشانی نداشته باشند. برای این منظور با زوم در شکل (۴)، ناحیه طیفی فرسرخ نزدیک 7184 cm^{-1} (1392 نانومتر) که شرایط بالا را دارا است، پیدا می‌شود. بنابراین با توجه به دلایل بالا، لیزر با طول موج (1392 نانومتر) برای بیناب‌نمایی انتخاب شد. شکل (۵)، طیف شبیه‌سازی شده بخار آب در ناحیه طیفی نزدیک 7184 cm^{-1} در شرایط فشار 35 میلی-بار، دمای 296 کلوین و نسبت مخلوط حجمی 8500 ppmv که برای شرایط کاری این تشدیدگر در نظر گرفته شده است را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵)، ایزوتوپولوگ‌های پایدار آب قله‌های جذبی مناسبی دارند، با یکدیگر همپوشانی نداشته و جدا از هم هستند. لازم به بیان است که طیف جذبی مشخص شده با علامت پیکان در شکل (۵) بدلیل همپوشانی سه ایزوتوپولوگ، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.



شکل ۵ طیف شبیه‌سازی شده جذبی آب با استفاده از داده‌های پایگاه HITRAN در دمای ۲۹۶

کلوین، فشار ۳۵ میلی‌بار و نسبت مخلوط حجمی

۸۵۰۰ ppmv

۳.۲ طراحی آینه‌ها

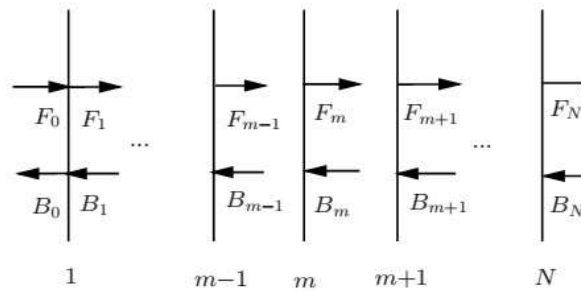
افزون بر برخی از رویکردهای تحلیلی و تخمینی مبتنی بر استفاده از تقریب‌ها، طیف دقیق بازتاب نوری آینه‌ها با استفاده از روش ماتریس انتقال نیز محاسبه می‌شود. در روش ماتریس انتقال، با در نظر داشتن شرایط مرزی پیوستگی میدان الکترومغناطیسی، از ماتریس انتقال سیستم برای تعیین ضرایب بازتاب و انتقال نور عبوری از ساختارهای چند لایه‌ای استفاده می‌شود [۴۱]. به صورت ویژه، اگر یک ساختار چند لایه‌ای متشکل از $N + 1$ لایه با ضریب شکست‌های مختلط و با N مرز مشترک (شکل ۶) در نظر گرفته شود، همان‌طور که در رابطه زیر نشان داده شده است، دامنه‌های

میدان در هر لایه را می‌توان با حاصل ضرب متوالی ماتریس‌هایی 2×2 محاسبه کرد [۴۲]:

$$\begin{bmatrix} F_{m-1} \\ B_{m-1} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} e^{-i\delta_{m-1}} & 0 \\ 0 & e^{-i\delta_{m-1}} \end{bmatrix}}_{P_{m-1}} \times \quad (8)$$

$$\frac{1}{t_{m-1}} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & r_{m-1,m} \\ r_{m-1,m} & 1 \end{bmatrix}}_{R_{m-1}} \begin{bmatrix} F_m \\ B_m \end{bmatrix}$$

که F و B به ترتیب دامنه امواج منتشرشونده رو به جلو و رو به عقب را نشان داده و اندیس آن‌ها بیانگر لایه خاصی است که نور از میان آن عبور می‌کند.



شکل ۶ روش نامگذاری دامنه‌های میدان پیش و پس‌رونده در یک ساختار چندلایه‌ای نوری.

در رابطه (۸)، اثر حجمی هر لایه توسط ماتریس انتشار P و اثر مرز مشترک توسط ماتریس شکست R بیان شده است. افزون بر این، $\delta_{m-1} = 2\pi kn_{m-1}d_{m-1}$ بیانگر ضخامت فازی است که توسط بخش حجمی لایه $m-1$ ام به هنگام عبور نور ایجاد می‌شود. k عدد موج، n_{m-1} و d_{m-1} نیز به ترتیب ضریب شکست و ضخامت هر لایه هستند. با توجه به رابطه (۸)، ماتریس انتقال کلی مربوط به سیستم چندلایه‌ای را می‌توان به شکل خلاصه شده زیر بیان کرد:

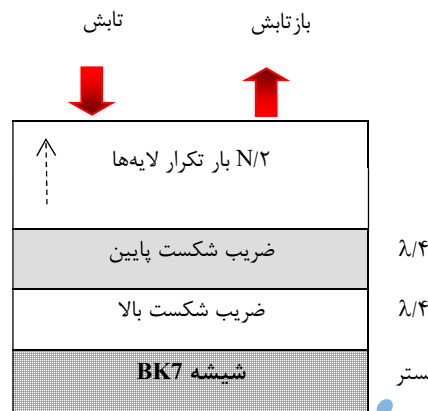
$$\begin{bmatrix} F_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = R_{0,1}^{-1} \left[\prod_{m=1}^{N-1} P_m R_{m,m+1} \right] \begin{bmatrix} F_N \\ B_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_N \\ B_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

بنابراین ضریب بازتاب خالص یک ساختار چند لایه‌ای را می‌توان به شکل زیر محاسبه کرد:

$$r_{0,N} = \left(\frac{B_0}{N_0} \right)_{B_N=0} = \frac{T_{21}}{T_{11}} \quad (10)$$

طراحی‌های آینه‌های تشدیدگر با استفاده از نرم‌افزار مک‌لود انجام شده است که برپایه استفاده از ماتریس‌های انتقال ویژگی‌های نوری چندلایه‌های نوری را محاسبه و بهینه‌سازی می‌نماید [۴۲]. برای

ساخت آینه‌های بازتاب بالا در طول موج‌های فروسرخ اغلب از ساختارهای با لایه‌های دی‌الکتریک و ضخامت ربع موج متوالی با ضریب شکست‌های متفاوت کم و زیاد استفاده می‌شود (شکل (۷)). با استفاده از موادی با ضریب شکست‌های بالا و پایین متفاوت (جدول (۲))، در این کار سه نوع طراحی مختلف برای آینه‌ها ارائه شده است.



شکل ۷ طراحی آینه‌ها با استفاده از موادی با ضریب شکست‌های بالا و پایین و با ضخامت‌های ربع موج. بستر مورد استفاده برای لایه‌نشانی از جنس شیشه اپتیکی BK7 فرض شده است.

جدول ۲ مواد مورد استفاده برای ساخت آینه‌های تشدیدگر با بیشینه بازتاب در طول موج مرکزی ۱/۴ میکرومتر. ضریب شکست مواد نیز در جدول گنجانده شده است.

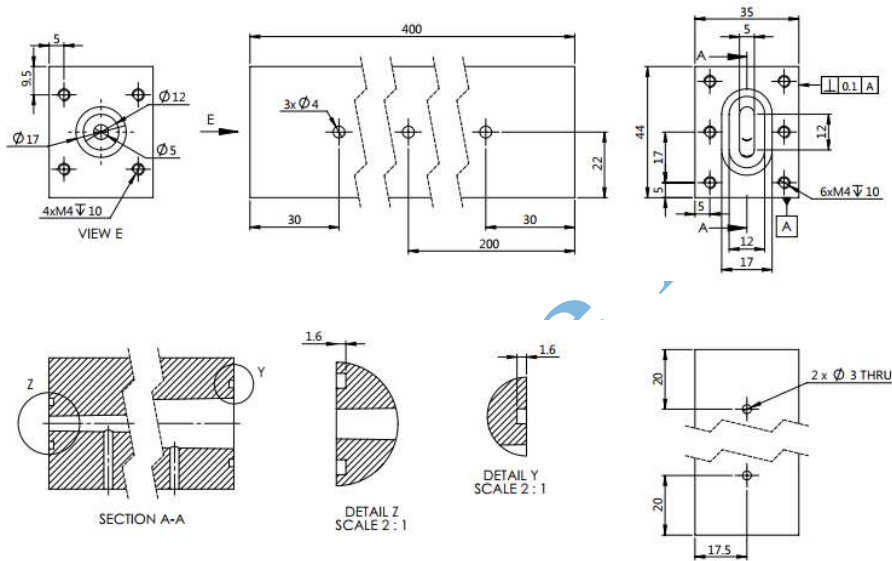
طراحی	ماده با ضریب شکست بالا	ماده با ضریب شکست پایین
۱	$(n = 1.9) \text{ZrO}_2$	$(n = 1.46) \text{SiO}_2$
۲	$(n = 2.3) \text{TiO}_2$	$(n = 1.46) \text{SiO}_2$
۳	$(n = 2.3) \text{TiO}_2$	$(n = 1.38) \text{MgF}_2$

۳. بحث و نتیجه‌گیری

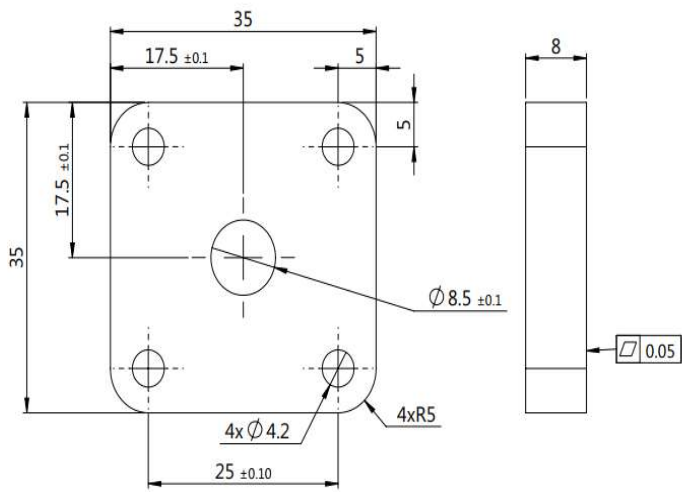
روش طراحی تشدیدگر دستگاه بیناب‌نمایی لیزری در بخش ۱.۲ ارائه شد. با استفاده از مشخصات هندسی بدست آمده، طراحی فیزیکی تشدیدگر در نرم‌افزار سالیدورکس^۱ نسخه ۲۰۲۰ به انجام

^۱ SolidWorks

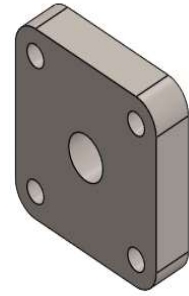
رسید. شکل (۸) نتایج طراحی اجزای اصلی تشدیدگر را نشان می‌دهد. پس از طراحی تشدیدگر و اجزای آن در نرم‌افزار سالی‌دورکس، قطعات تشدیدگر از استیل ضد زنگ و آچار مخصوص آینه‌ها از جنس آلایژ برنج ساخته شدند. مشکل اصلی در زمان ساخت تشدیدگر، روش سوراخ کاری داخلی با قطر داخلی ۵ میلی‌متر از یک سو و طول بازوی ۴۰ سانتی‌متر و با زاویه بازشدگی ۱٫۷ درجه بود، به گونه‌ای که نمای خارجی تشدیدگر از یک سو دایروی و از سوی دیگر به شکل بیضوی باشد (بخش الف شکل (۸)). با توجه به دقت بالای سیستم برش کاری سیم، این روش برای ماشین کاری تشدیدگر از داخل یک بلوک استیل ضد زنگ انتخاب گردید.



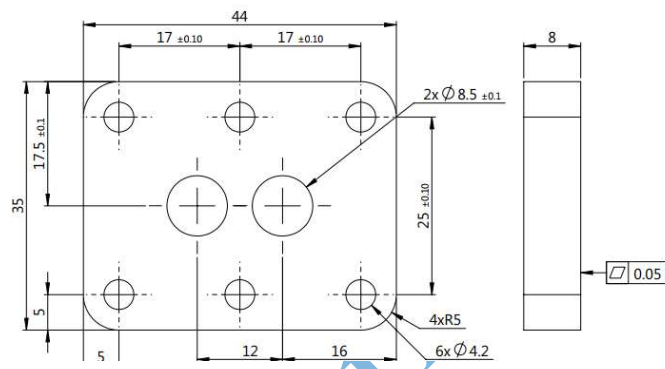
(الف)



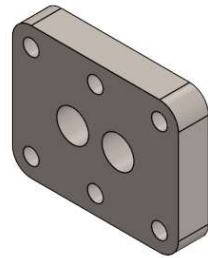
(ج)



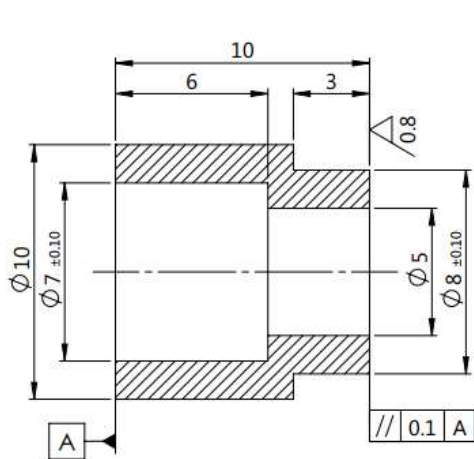
DrSS



(د)

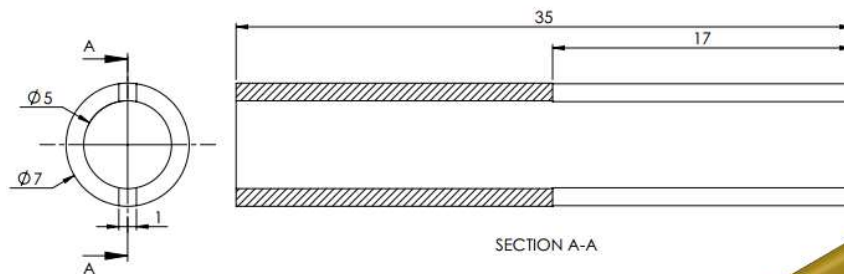


Art



(د)

PROSS



(ه)

شکل ۸ طراحی اجزای اصلی تشدیدگر دستگاه بیناب‌نمایی. الف) بدنه اصلی تشدیدگر شامل نمای سمت دایروی (ورودی) و نمای سمت بیضوی (خروجی کاواک)، ب) درپوش ابتدایی (ورودی)، ج) درپوش انتهایی (خروجی)، د) پایه نگه‌دارنده آینه‌ها بر روی تشدیدگر، و ه) آچار مخصوص طراحی شده برای تنظیم آینه‌ها.



(الف)

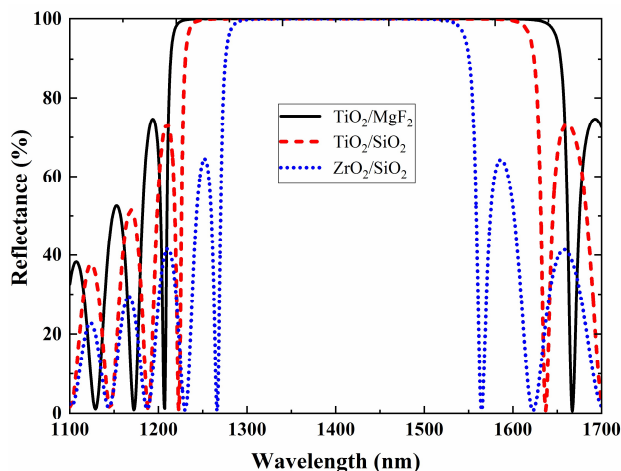


(ب)

شکل ۹ تشدیدگر ساخته شده به همراه قطعات آن. الف) نمای سمت دایروی تشدیدگر (ورودی) تشدیدگر به همراه درپوش، نگه‌دارنده آینه و آچار مخصوص برای تنظیم آینه‌ها. ب) نمای سمت بیضوی تشدیدگر (خروجی) به همراه درپوش و نگه‌دارنده آینه‌های خروجی.

روش طراحی آینه‌های تشدیدگر در بخش ۳.۲ ارائه شد. طرح نشان داده شده در شکل (۷) و مواد بیان شده در جدول (۲) در نرم‌افزار مکتلود پیاده‌سازی و میزان بازتاب چند لایه‌ای‌ها در طول موج-های مختلف محاسبه شد. نتایج طراحی آینه‌های تشدیدگر در شکل (۹) نشان داده شده است. طراحی اول با ۴۰ لایه از مواد ZrO_2 و SiO_2 و با ضخامت کل ۸۵۰۰ نانومتر بوده است. میزان بازتاب حاصل شده در طول موج ۱۴۰۰ نانومتر برای طرح اول ۹۹/۹۹۴۰٪ است. در طراحی دوم به جای ZrO_2 از TiO_2 استفاده شده است، چرا که این ماده ضریب شکست بالاتری نسبت به ZrO_2 داشته و از این رو، با تعداد لایه‌های کمتری می‌توان به نتیجه مطلوب رسید. همان‌طور که در طیف بازتاب مربوطه ملاحظه می‌شود، با استفاده از ۳۴ لایه از مواد SiO_2 و TiO_2 و ضخامت کل کمتری در حد ۶۸۰۰ نانومتر به بازتابی بالاتر از طراحی قبلی و به میزان ۹۹/۹۹۹۵٪ می‌توان دست یافت. در طراحی سوم به جای SiO_2 از ماده فلوریدی MgF_2 استفاده شده که این

تغییر سبب افزایش بازتاب تا ۹۹/۹۹۹۷٪ به همراه پهن تر شدن ناحیه بازتاب بالا می‌شود. همچنین ضخامت کل لایه‌ها به ۶۶۰۰ نانومتر کاهش یافت که این کار سبب کوتاه‌تر شدن زمان لایه‌نشانی نیز خواهد شد. با توجه به میزان بازتاب و ضخامت لایه‌ها طراحی سوم را می‌توان برای فاز ساخت پیشنهاد داد. با این وجود، عملکرد بازتابی دو طراحی دیگر نیز مطلوب بوده و در صورت در دسترس نبودن ماده فلوریدی MgF_2 ، که لایه‌نشانی آن نیز با روش‌های بخار فیزیکی اندکی با دشواری همراه است، می‌توان از آن‌ها نیز در فاز ساخت استفاده کرد.



شکل ۱۰ میزان بازتاب آینه‌ها در طول موج‌های مختلف برای طراحی‌های بهینه‌سازی شده با نرم‌افزار مک‌لود.

تشدیدگر طراحی شده بالا، با دو بازو با قطر داخلی ۵ میلی‌متر و با طول معادل ۴۰ سانتی‌متر که با یکدیگر زاویه $۱٫۷^\circ$ می‌سازند، دارای حجم داخلی ۲۰ سانتی‌متر مکعب می‌باشد. طول مؤثر جذب اپتیکی ۱۳ کیلومتر و محدوده طیفی آزاد $\Delta\nu_{FSR}$ این کاواک برابر با ۱۸۷٫۵ مگاهرتز محاسبه می‌شود. بازتابندگی ۹۹/۹۹۹۷٪ آینه‌ها منجر به ظرافت اپتیکی تشدیدگر برابر با ۵۲٫۰۰۰ و نیم بیشینه‌مدها در تراز ۳ کیلوهرتز می‌شود که این ویژگی جداسازی طیف جذبی ایزوتوپ‌ها را برای اندازه‌گیری‌های دقیق ایزوتوپی فراهم می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی و ساخت یک تشدیدگر غیرخطی V-شکل برای بیناب‌نمای لیزری تشریح شده است. جزئیات روش طراحی تشدیدگر به همراه روابط نظری مورد نیاز در این زمینه ارائه شد.

سپس، با استفاده از مشخصه‌های بهینه‌سازی شده در فاز طراحی، نقشه‌های مورد نیاز برای ساخت اجزای مکانیکی تشدیدگر ارائه شده است. مواد مورد نیاز برای ساخت آینه‌های تشدیدگر به همراه تعداد و ضخامت‌های مورد نیاز آن‌ها برای ساخت آینه‌ها نیز در مقاله گزارش شده است. با ساخت تجربی آینه‌ها و تراز کردن آینه‌ها روی تشدیدگر و تهیه لیزر مورد نیاز در فاز بعدی می‌توان از تشدیدگر ساخته شده برای کاربردهای عملی بیناب‌نمایی لیزری استفاده کرد. این فعالیت‌ها در حال انجام بوده و گزارش آن‌ها در مقالات آتی ارائه خواهد شد. با استفاده از تشدیدگر نوری ساخته شده امکان بررسی ایزوتوپ‌های بخار آب فراهم آمده و با توسعه‌های بعدی آن برای اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های پایدار سایر عناصر، توسعه پژوهش‌های کاربردی در زمینه به کارگیری ایزوتوپ‌های پایدار در بخش‌های مختلف علمی و صنعتی امکان‌پذیر خواهد شد.

۵. تقدیر و تشکر

نویسندگان از خانم مهندس ایران حسین‌زاده جهت همکاری در طراحی آینه‌های تشدیدگر و آقای دکتر داوود رزاقی جهت همکاری در طراحی با نرم‌افزار سالدورکس قدردانی می‌نمایند.

منابع

- [1] Rennick, C., Arnold, T. & Chung, E., "Continuous Measurement of Methane $\delta^{13}\text{C-CH 4}$ and $\delta\text{D-CH 4}$ Stable Isotope Ratios for Regional Source Identification", In *AGU Fall Meeting Abstracts*, vol. 2019, pp. B130-2508. 2019.
- [2] Busuyi, O. A., Liu, B. & Ostadhassan, M., "Stable Isotope Geochemistry of the Organic Elements within Shales and Crude Oils: A Comprehensive Review", *Molecules* 27(1), 34, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules27010034>
- [3] Nyamgerel, Y., Han, Y., Kim, M., Koh, D., & Lee, J., "Review on applications of ^{17}O in hydrological cycle", *Molecules*, 26(15), 4468, 2021. doi: [10.3390/molecules26154468](https://doi.org/10.3390/molecules26154468).
- [4] Baldoni, M., Nardi, A., De Angelis, F., Rickards, O., & Martínez-Labarga, C., "How does diet influence our lives? Evaluating the relationship between isotopic signatures and mortality patterns in Italian Roman imperial and medieval periods", *Molecules*, 26(13), 3895, 2021. DOI: [10.3390/molecules26133895](https://doi.org/10.3390/molecules26133895).
- [5] Skippington, J., Manne, T., & Veth, P., "Isotopic indications of late Pleistocene and Holocene paleoenvironmental changes at Boodie Cave archaeological site, Barrow Island, Western Australia", *Molecules*, 26(9), 2582, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26092582>
- [6] Connolly, R., Jambriña-Enríquez, M., Herrera-Herrera, A. V., & Mallol, C., "Investigating hydrogen isotope variation during heating of n-Alkanes under limited oxygen conditions: implications for palaeoclimate reconstruction in archaeological settings", *Molecules*, 26(7), 1830, 2021. DOI: [10.3390/molecules26071830](https://doi.org/10.3390/molecules26071830)
- [7] Chang, Y. C., Chiang, W. C., Madigan, D. J., Tsai, F. Y., Chiang, C. L., Hsu, H. H., ... & Wang, S. P., "Trophic dynamics and feeding ecology of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*)

- off Eastern and Western Taiwan”, *Molecules*, 27(3), 1073, 2022. <https://doi.org/10.3390/molecules27031073>
- [8] Bianchini, G., Brombin, V., Carlino, P., Mistri, E., Natali, C., & Salani, G. M., “Traceability and authentication of manila clams from North-Western adriatic lagoons using C and N stable isotope analysis”, *Molecules*, 26(7), 1859, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26071859>
- [9] Warr, O., Young, E. D., Giunta, T., Kohl, I. E., Ash, J. L., & Lollar, B. S., “High-resolution, long-term isotopic and isotopologue variation identifies the sources and sinks of methane in a deep subsurface carbon cycle”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 294, 315-334, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.12.002>
- [10] Lan, X., Nisbet, E. G., Dlugokencky, E. J., & Michel, S. E., “What do we know about the global methane budget? Results from four decades of atmospheric CH₄ observations and the way forward”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2210), 20200440, 2021. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0440>
- [11] Peng, S., “Challenges and opportunities in the global methane cycle”, *Iscience*, 26(6), 2023. DOI: [10.1016/j.isci.2023.106878](https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106878)
- [12] Jacques, C., Sapart, C. J., Fripiat, F., Carnat, G., Zhou, J., Delille, B., ... & Tison, J. L., “Sources and sinks of methane in sea ice: Insights from stable isotopes”, *Elem Sci Anth*, 9(1), 00167, 2021. <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00167>
- [13] Zhao, S., Zhao, Y., Rogers, K. M., Chen, G., Chen, A., & Yang, S., “Application of multi-element (C, N, H, O) stable isotope ratio analysis for the traceability of milk samples from China”, *Food chemistry*, 310, 125826, 2020. DOI: [10.1016/j.foodchem.2019.125826](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125826)
- [14] Chen, Y., Helliker, B. R., Tang, X., Li, F., Zhou, Y., & Song, X., “Stem water cryogenic extraction biases estimation in deuterium isotope composition of plant source water”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(52), 33345-33350, 2020. <https://doi.org/10.1073/pnas.2014422117>
- [15] Zhao, S., Zhao, Y., Rogers, K. M., Chen, G., Chen, A., & Yang, S., “Application of multi-element (C, N, H, O) stable isotope ratio analysis for the traceability of milk samples from China”, *Food chemistry*, 310, 125826, 2020. DOI: [10.1016/j.foodchem.2019.125826](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125826)
- [16] Reynard, L. M., Wong, W. W., & Tuross, N., “Accuracy and Practical Considerations for Doubly Labeled Water Analysis in Nutrition Studies Using a Laser-Based Isotope Instrument (Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy)”, *The Journal of Nutrition*, 152(1), 78-85, 2022. DOI: [10.1093/jn/nxab324](https://doi.org/10.1093/jn/nxab324)
- [15] Srivastava, A., Long, S. E., Norris, J. E., Bryan, C. E., Carney, J., & Hodges, J. T., “Comparison of primary laser spectroscopy and mass spectrometry methods for measuring mass concentration of gaseous elemental mercury”, *Analytical chemistry*, 93(2), 1050-1058, 2020. DOI: [10.1021/acs.analchem.0c04002](https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c04002)
- [16] Reynard, L. M., Wong, W. W., & Tuross, N., “Accuracy and Practical Considerations for Doubly Labeled Water Analysis in Nutrition Studies Using a Laser-Based Isotope Instrument (Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy)”, *The Journal of Nutrition*, 152(1), 78-85, 2022. DOI: [10.1093/jn/nxab324](https://doi.org/10.1093/jn/nxab324)
- [17] Melanson, E. L., Swibas, T., Kohrt, W. M., Catenacci, V. A., Creasy, S. A., Plasqui, G., ... & Berman, E. S., “Validation of the doubly labeled water method using off-axis integrated cavity output spectroscopy and isotope ratio mass spectrometry”, *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 314(2), E124-E130, 2018. DOI: [10.1152/ajpendo.00241.2017](https://doi.org/10.1152/ajpendo.00241.2017)
- [18] Kyser, T. K., Leybourne, M. I., & Layton-Matthews, D., “Advances in the use of isotopes in geochemical exploration: Instrumentation and applications in understanding geochemical processes”, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 20(2), 199-204, 2020. <https://doi.org/10.1144/geochem2019-045>
- [19] Volkmann, T., Kühnhammer, K., Herbstritt, B., Gessler, A., & Weile, M., “A method for in situ monitoring of the isotope composition of tree xylem water using laser spectroscopy”, *Plant, Cell & Environment*, 39(9), 2055-2063, 2016. <https://doi.org/10.1111/pce.12725>

- [20] Wassenaar, L. I., Terzer-Wasmuth, S., Douence, C., Araguas-Araguas, L., Aggarwal, P. K., & Coplen, T. B., "Seeking excellence: An evaluation of 235 international laboratories conducting water isotope analyses by isotope-ratio and laser-absorption spectrometry", *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 32(5), 393-406, 2018. <https://doi.org/10.1002/rcm.8052>
- [21] Morville, J., Romanini, D., Kachanov, A. A., & Chenevier, M., "Two schemes for trace detection using cavity ringdown spectroscopy", *Applied Physics B*, 78, 465-476, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00340-003-1363-8>
- [22] Luo, Z., Tan, Z., & Long, X., "Application of near-infrared optical feedback cavity enhanced absorption spectroscopy (OF-CEAS) to the detection of ammonia in exhaled human breath", *Sensors*, 19(17), 3686, 2019. DOI: [10.3390/s19173686](https://doi.org/10.3390/s19173686)
- [23] Yang, J., Zeng, F., Li, X., Ran, C., Xu, Y., & Li, Y., "Highly specific detection of A β oligomers in early Alzheimer's disease by a near-infrared fluorescent probe with a "V-shaped" spatial conformation", *Chemical Communications*, 56(4), 583-586, 2020. <https://doi.org/10.1039/C9CC08894F>
- [24] Gianella, M., & Ritchie, G. A., "Cavity-enhanced near-infrared laser absorption spectrometer for the measurement of acetonitrile in breath", *Analytical chemistry*, 87(13), 6881-6889, 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b01341>
- [25] He, Q., Zheng, C., Ye, W., & Tittel, F. K., "Multiple Gases Detection Based on Periodical Mode-Locked Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy Using a Single-Mode Diode Laser", *IEEE Sensors Journal*, 23(6), 5720-5725, 2023. DOI: [10.1109/JSEN.2023.3241275](https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3241275)
- [26] Liu, X., Gao, G., Yu, X., Gao, Z., & Cai, T., "Development of an off-axis cavity-enhanced absorption spectroscopy system with open-path configuration for gas sensing", *Infrared Physics & Technology*, 114, 103654, 2021. DOI: [10.1016/j.infrared.2021.103654](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103654)
- [27] Bayrakli, I., & Akman, H., "Ultrasensitive, real-time analysis of biomarkers in breath using tunable external cavity laser and off-axis cavity-enhanced absorption spectroscopy", *Journal of biomedical optics*, 20(3), 037001-037001, 2015. DOI: [10.1117/1.JBO.20.3.037001](https://doi.org/10.1117/1.JBO.20.3.037001)
- [28] Wang, Y., Guan, S., Tan, Z., Cao, H., Chen, S., & Yang, Z., "Detection of CO based on optical feedback cavity enhanced absorption spectroscopy", In *International Conference on Precision Instruments and Optical Engineering (PIOE 2022)* (Vol. 12585, pp. 78-83). SPIE, 2023, February. DOI: [10.1117/12.2667773](https://doi.org/10.1117/12.2667773)
- [29] Morville, J., Romanini, D., & Kerstel, E., "Cavity enhanced absorption spectroscopy with optical feedback", In *Cavity-Enhanced Spectroscopy and Sensing* (pp. 163-209). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40003-25>
- [30] Hu, J., Wan, F., Wang, P., Ge, H., & Chen, W., "Application of frequency-locking cavity-enhanced spectroscopy for highly sensitive gas sensing: a review", *Applied Spectroscopy Reviews*, 57(5), 378-410, 2022. <https://doi.org/10.1080/05704928.2021.1894438>
- [31] Mazurenka, M., Orr-Ewing, A. J., Peverall, R., & Ritchie, G. A., "Cavity ring-down and cavity enhanced spectroscopy using diode lasers", *Annual Reports Section "C" (Physical Chemistry)*, 101, 100-142, 2005. <https://doi.org/10.1039/B408909J>
- [32] Romanini, D., Ventrillard, I., Méjean, G., Morville, J., Kerstel, E., Gagliardi, G., & Loock, H. P., "Cavity-enhanced spectroscopy and sensing", *Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg*, 1-60, 2014.
- [33] Johnston, P. S., & Lehmann, K. K., "Cavity enhanced absorption spectroscopy using a broadband prism cavity and a supercontinuum source", *Optics express*, 16(19), 15013-15023, 2008. [10.1364/oe.16.015013](https://doi.org/10.1364/oe.16.015013). PMID: 18795038
- [34] Landsberg J., Development of an OF-CEAS laser spectrometer for water vapor isotope measurements at low water concentration, PhD Thesis, Laboratoire interdisciplinaire de Physique J. Fourier University (Grenoble I), 2014.
- [35] <https://hitran.org/>
- [36] Gordon, I. E., Rothman, L. S., Hargreaves, R. J., Hashemi, R., Karlovets, E. V., Skinner, F. M., ... & Yurchenko, S. N., "The HITRAN2020 molecular spectroscopic database", *Journal*

- of quantitative spectroscopy and radiative transfer, 277, 107949, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949>
- [37] Rothman, L. S., “History of the HITRAN Database”, *Nature Reviews Physics*, 3(5), 302-304, 2021. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00309-2>
- [38] Yang, H., “Tunable diode-laser absorption-based sensors for the detection of water vapor concentration, film thickness and temperature”, Doctoral dissertation, Duisburg, Essen, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2012.
- [39] Kerstel, E. T., Gagliardi, G., Gianfrani, L., Meijer, H. A. J., Van Trigt, R., & Ramaker, R., “Determination of the 2H/1H, 17O/16O, and 18O/16O isotope ratios in water by means of tunable diode laser spectroscopy at 1.39 μm ”, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 58(11), 2389-2396, 2002. DOI: [10.1016/s1386-1425\(02\)00053-7](https://doi.org/10.1016/s1386-1425(02)00053-7)
- [40] Kerstel, E., & Gianfrani, L., “Advances in laser-based isotope ratio measurements: selected applications”, *Applied Physics B*, 92, 439-449, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00340-008-3128-x>
- [41] Katsidis, C. C., & Siapkas, D. I., “General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference”, *Applied optics*, 41(19), 3978-3987, 2002. <https://doi.org/10.1364/AO.41.003978>.
- [42] <https://www.thinfilcenter.com/essential.php>

Article in Pre