بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

تقویت طیف رامان سیکلوهگزان به روش طیف سنجی رامان تقویت یافته فیبری

محمد صادق توکلی وندیشی، سید حسن توسلی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، ولنجک، تهران، ایران

طیف‌سنجی رامان به عنوان یک روش قدرتمند حسگری، توجه محققان بسیاری را به خود جلب کرده است. از معایب این روش، سطح مقطع پایین پراکندگی رامان و ضعیف بودن سیگنال رامان است. برای تقویت سیگنال رامان روش‌های متعددی پیشنهاد شده که در این میان می‌توان به طیف‌سنجی رامان تقویت یافته فیبری اشاره کرد. در این روش با افزایش طول مسیر اپتیکی، برهمکنش نور لیزر با نمونه افزایش یافته و در نتیجه سیگنال رامان تقویت می‌شود. برای این کار اغلب از فیبرهای هسته تهی و لوله‌های مویین استفاده می‌شود. در استفاده از لوله‌های مویین، به منظور ایجاد بازتاب داخلی کلی، از مایعاتی با ضریب شکست بالاتر از ضریب شکست شیشه سازنده لوله مویین استفاده می‌شود. در این پژوهش از لوله‌های مویین حاوی سیکلوهگزان به عنوان نمونه هدف با ضریب شکستی کمتر از شیشه، در ابعادی مختلف، به عنوان موجبر استفاده شده است. همچنین تاثیرات قطر لوله مویین و طول آن در افزایش سیگنال رامان مورد بررسی قرار گرفت.

کلید واژه- بازتاب داخلی کلی، سیکلوهگزان، ضریب شکست، طیف سنجی رامان تقویت یافته فیبری، لوله مویین

Amplification of Cyclohexane Raman Spectra by Fiber-Enhanced Raman Spectroscopy (FERS)

Mohammad Sadegh Tavakkoli Vandishi, Seyyed Hassan Tavassoli

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Velenjak, Tehran, Iran

msadegh.tavakkoli@gmail.com, h-tavassoli@sbu.ac.ir

Raman spectroscopy as a powerful sensing method has attracted the attention of many researchers. Disadvantages of this method are low cross-section of Raman scattering and weak Raman signal. Several methods have been proposed to amplify the Raman signal, including fiber-enhanced Raman spectroscopy. In this method, by increasing the optical path length, the interaction of the laser light with the sample increases and the Raman signal is amplified. Hollow core fibers and capillary tubes are often used. In capillary tubes, in order to Total internal reflection, liquids with a refractive index higher than the refractive index glass of the capillary tube are used. In this research, capillary tubes containing cyclohexane have been used as a target sample with a refractive index lower than glass, in different dimensions, as a waveguide. The effects of capillary tube diameter and length on increasing Raman signal were also investigated.

Keywords: Capillary Tube, Cyclohexane, Fiber-Enhanced Raman Spectroscopy, Refractive Index, Total Internal Reflection

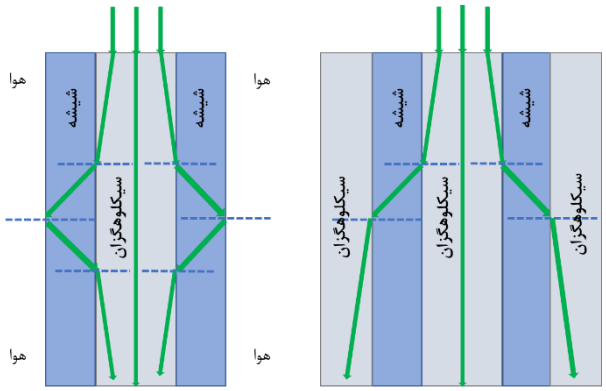
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

مقدمه

توسعه حسگرهای شیمیایی مبتنی بر فیبرهای نوری در چندین دهه گذشته به سرعت در حال رشد است. فیبرهای نوری مزایای بسیاری دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به تضعیف کم سیگنال، امکان حسگری از راه دور، استفاده از حجم کم نمونه برای حسگری و انعطاف پذیری بالا اشاره کرد. با این حال، در حسگرهای مبتنی بر فیبر نوری، برهمکنش بین نور لیزر و نمونه مورد بررسی که از طریق نفوذ موج فرار[۱] به دست می‌آید، ضعیف است [۱]. این برهمکنش را می‌توان با استفاده از بازتاب داخلی کلی در فیبرهای هسته تهی[۲] و لوله‌های مویین[۳] افزایش داد، در سال‌های اخیر طیف‌سنجی رامان به عنوان یک روش قدرتمند حسگری توجه محققان بسیاری را به خود جلب کرده است. طیف سنجی رامان بر اساس پراکندگی غیر الاستیک نور در فرکانس‌های پایین، جهت اندازه‌گیری مدهای ارتعاشی مولکول است. از معایب طیف‌سنجی رامان سطح مقطع پایین پراکندگی رامان و در نتیجه ضعیف بودن سیگنال رامان است. ترکیب لوله‌های مویین یا فیبرهای بلور فوتونی هسته تهی[۴] با طیف‌سنجی رامان دارای مزایای جذابی مانند تقویت سیگنال رامان است. این تکنیک از سال ۲۰۰۰ میلادی مورد توجه قرار گرفت و در سال‌های گذشته با عنوان رامان تقویت یافته فیبری[۵] نام‌گذاری شد [۲]. در این پژوهش به بررسی تقویت سیگنال رامان سیکلوهگزان به عنوان نمونه هدف و تاثیر قطر و طول لوله‌های مویین در افزایش سیگنال رامان خواهیم پرداخت.

ساز و کار موجبری در فیبرهای مویین

همانطور که اشاره شد نمونه مورد بررسی سیکلوهگزان است. این نمونه در طول موج ۵۳۲ نانومتر دارای ضریب شکست ۱,۴۲۹۳ است [۳]. با توجه به اینکه شیشه در این طول موج دارای ضریب شکست ۱,۴۶۰۷ است [۴] و با درنظر گرفتن قانون اسنل، با ورود نور نزدیک به زاویه صفر درجه نسبت به خط عمود بر سطح مقطع لوله مویین، در سطح تماس سیکلوهگزان و شیشه، نور لیزر دچار شکست شده و به داخل شیشه نفوذ می‌کند. اما در سطح تماس شیشه با هوا تحت بازتاب داخلی کلی قرار گرفته و درون شیشه باقی می‌ماند (شکل ۱).



شکل ۱: شماتیک ساز و کار موجبری درون لوله مویین به همراه سیکلوهگزان.

چیدمان رامان

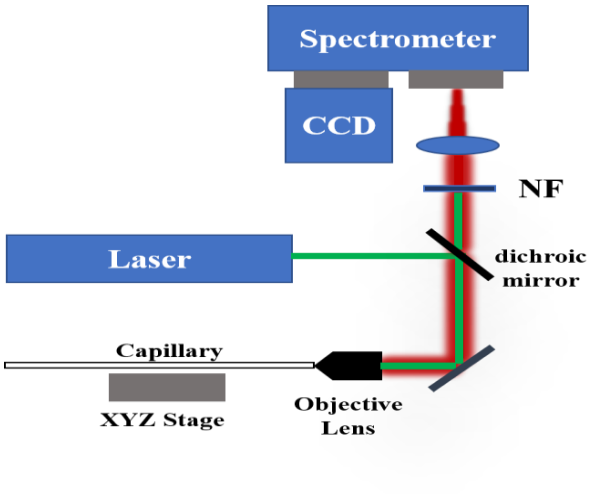
چیدمان حاصل برای دریافت بیشترین پراکندگی به صورت بازتابی بسته شده است به گونه‌ای است که نور لیزر پس از بازتاب از آینه دو رنگی وارد عدسی شده و بر روی سطح مقطع داخلی لوله مویین کانونی می‌شود. در نتیجه‌ی برهمکنش متعدد نور لیزر با نمونه، پراکندگی رامان تولید شده به سمت عقب در طول فیبر توسط عدسی جمع‌آوری شده و به سمت اسپکترومتر هدایت

---

۱ Evanescent wave
۲ Hollow core fiber
۳ Capillary tube
۴ Hollow core photonic crystal fiber
۵ Fiber Enhanced Raman Spectroscopy

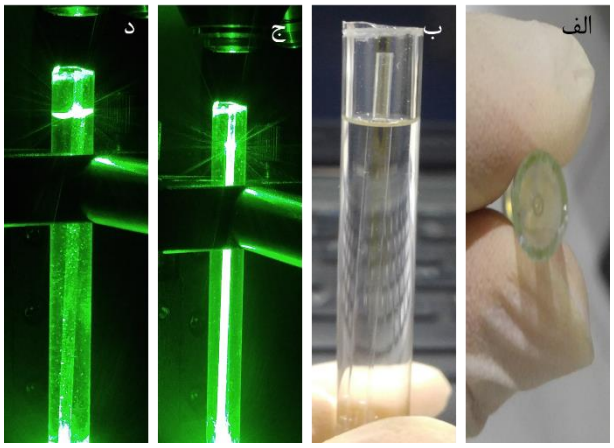
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

می‌شود. باید توجه داشت نور لیزر توسط فیلتر ناچ حذف می‌شود و اجازه ورود به اسپکترومتر را نخواهد داشت. بعد از آن با نرم افزار تانسو اطلاعات ورودی تحلیل می‌گردد. طول موج لیزر استفاده شده در این چیدمان ۵۳۲ نانومتر (هماهنگ دوم Nd:YAG) و توان لیزر ۱۰ میلی‌وات است.



شکل ۲: شماتیک چیدمان طیف سنجی رامان ۵۳۲ نانومتر.

برای اطمینان از موجبری لوله مویین حاوی سیکلوهگزان در محیط هوا و عدم موجبری در محیط سیکلوهگزان، لوله شیشه‌ای با قطر داخلی ۵ میلی متر و قطر بیرونی ۷ میلی‌متر انتخاب می‌کنیم. لوله مویین با قطر داخلی ۱,۲ میلی‌متر و قطر بیرونی ۱,۶ میلی‌متر را دقیقا در مرکز لوله بزرگتر قرار می‌دهیم. طول لوله در هر دو مورد ۷۵ میلی‌متر است. سیکلوهگزان را درون لوله مرکزی ریخته و طبق چیدمان شکل ۲ طیف رامان حاصل از آن را دریافت می‌کنیم. در ادامه با ریختن سیکلوهگزان در لوله با قطر بزرگتر، مجددا طیف رامان سیکلوهگزان درون لوله کوچکتر را ثبت می‌کنیم. در تمامی مراحل آزمایش مدت زمان جمع‌آوری نور توسط CCD، ۱ ثانیه است. طیف‌گیری رامان برای موادی مانند سیکلوهگزان به طور متداول به این صورت است که سیکلوهگزان را درون ظرف شیشه‌ای ریخته و آن را مقابل نور لیزر قرار می‌دهند.



شکل ۳: الف) سطح مقطع دو لوله ب) لوله درونی و بیرونی حاوی سیکلوهگزان ج) تابش نور لیزر درون لوله مویین درونی حاوی سیکلوهگزان در محیط هوا د) تابش نور لیزر در لوله مویین درونی حاوی سیکلوهگزان در محیط سیکلوهگزان.

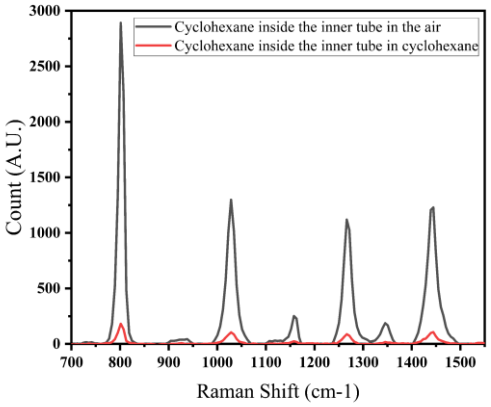
ابتدا لوله‌ای شیشه‌ای با قطر داخلی ۳ میلی‌متر و قطر بیرونی ۵ میلی‌متر را به عنوان نماینده‌ای از این ظرف شیشه‌ای در نظر می‌گیریم. با کاهش قطر لوله در ابعاد، قطر داخلی ۱,۲ میلی‌متر و قطر خارجی ۱,۶ میلی‌متر و لوله‌ای دیگر در ابعاد قطر داخلی ۴۰۰ میکرون و قطر بیرونی ۶۰۰ میکرون، طیف رامان را در هر یک از این موارد ثبت می کنیم. طول لوله در موارد ذکر شده ۷۵ میلی‌متر است. سپس با استفاده از لوله مویین با قطر داخلی ۴۰۰ میکرون و قطر بیرونی ۶۰۰ میکرون، در طول‌های مختلف اثر افزایش طول لوله در تقویت سیگنال رامان را بررسی می‌کنیم. در تمامی مراحل آزمایش از Objective ٤X استفاده شده است.

نتایج

مطابق شکل ۳ قسمت ج و د، طیف رامان حاصل، در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود زمانی که درون لوله مویین به قطر ۱,۲ میلی‌متر سیکلوهگزان ریخته شود، در حالی که محیط اطراف آن را هوا در برگرفته، نور لیزر درون لوله مویین هدایت شده و سیگنال رامان بیشتری را تولید می‌کند. بر خلاف آن

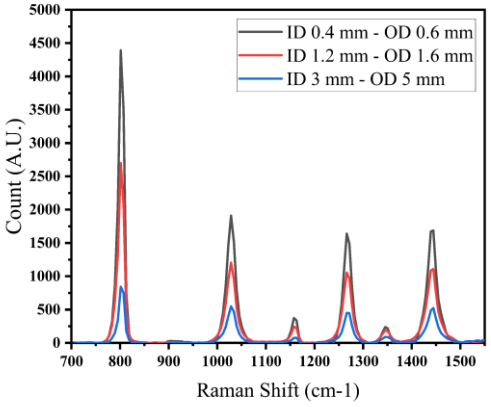
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

زمانی که علاوه بر داخل لوله مویین، بیرون آن را نیز سیکلوهگزان در بر بگیرد، لوله مویین به عنوان موجبر عمل نکرده و سیگنال رامان بسیار ضعیف است.



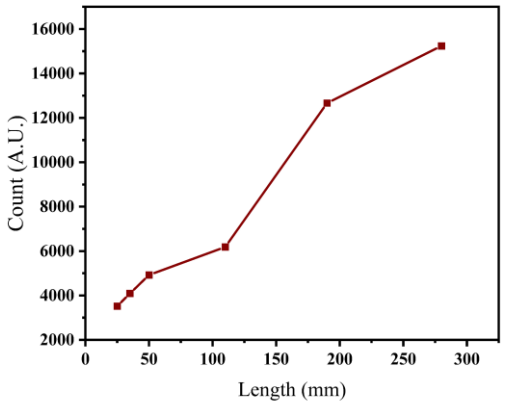
شکل ۴: طیف رامان سیکلوهگزان درون لوله مویین در محیط هوا (مشکی) و محیط سیکلوهگزان (قرمز)

در شکل ۴ نشان داده شده با کاهش قطر لوله علاوه بر کاهش حجم نمونه، شاهد افزایش سیگنال خواهیم بود و اثر لوله مویین در بازتاب‌های متوالی، تاثیر بیشتری دارد.



شکل ۵: تاثیر قطر لوله‌های شیشه‌ای به طول ۷۵ میلی‌متر بر افزایش سیگنال رامان

نمودار شکل ۵ نشان می دهد با افزایش طول لوله مویین با قطر داخلی ۴۰۰ میکرون و قطر بیرونی ۶۰۰ میکرون شاهد افزایش سیگنال رامان بودیم.



شکل ۶: تاثیر طول لوله مویین با قطر داخلی ۴۰۰ میکرون و قطر بیرونی ۶۰۰ میکرون بر افزایش سیگنال رامان سیکلوهگزان در طول موج ۶۲۷ نانومتر.

نتیجه‌گیری

استفاده از لوله‌های مویین در تقویت سیگنال رامان، روشی ساده و کم هزینه برای نمونه‌های مایع است. در بسیاری از آزمایشات طیف‌سنجی رامان تقویت یافته فیبری، برای ایجاد بازتاب داخلی درون لوله مویین از مایعاتی با ضریب شکست بالاتر از ضریب شکست شیشه استفاده می‌شود. اما در این پژوهش نشان داده شده حتی برای مایعاتی با ضریب شکست کمتر از ضریب شکست شیشه مانند سیکلوهگزان نیز این روش می‌تواند کارآمد باشد.

مرجع‌ها

[۱] Schmidt, H., Hawkins, A.R. Optofluidic waveguides: I. Concepts and implementations. Microfluid Nanofluid ٤, ٣–١٦ (٢٠٠٨).

[۲] Alexey V. Markin, Natalia E. Markina, Irina Yu. Goryacheva. Raman spectroscopy-based analysis inside photonic-crystal fibers. Elsevier. ٢٠١٧.

[۳] K. Kerl, H. Varchmin. “Refractive index dispersion (RID) of some liquids in the UV/VIS between ٢٠□□ □□□ ٦٠□□”. □□□□□□□ □□ □□□□□□□□□ □□□□□□□□□, Volume ٣٤٩, ١٩٩٥, Pages ٢٥٧-٢٦٠.

[٤] I. H. Malison. “Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica”. Journal of the Optical Society of America (١٩٦٥)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]