



ساخت طیف‌سنج جذبی تبدیل فوریه مادون قرمز

دانیال جاوری، مجید ناظری، امیرحسین فخار

دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان

چکیده - در این مقاله طیف‌سنجی به روش تبدیل فوریه با استفاده از تداخل‌سنج مایکلسون-مورلی برای محدوده طیفی $700-1800\text{ nm}$ و با میزان تفکیک‌پذیری طیفی 0.4 nm گزارش شده است. نسبت سیگنال به نوفه این طیف‌سنج بهتر از 15000 است. همچنین یک طیف‌سنج جذبی برای محدوده طیفی $1500-4500\text{ nm}$ با دقت 1 nm به منظور محاسبه طیف جذبی مواد ساخته شده است. سپس با استفاده از این طیف‌سنج جذبی، طیف جذب پلی‌استایرن اندازه‌گیری شده است. در این سیستم‌ها، سیگنال‌های نوری پس از آشکارسازی و تقویت تا 100000 برابر، از طریق مبدل آنالوگ به دیجیتال 14 بیتی به کامپیوتر ارسال می‌شود. این داده‌ها به صورت لحظه‌ای تجزیه و تحلیل می‌شوند. سپس منحنی طیفی با استفاده از تبدیل فوریه سریع سیگنال دریافتی در محیط نرم افزار Labview رسم می‌شود.

کلیدواژه-تداخل‌سنج مایکلسون، طیف‌سنج نوری، طیف‌سنجی تبدیل فوریه، تفکیک‌پذیری طیفی، ناحیه مادون قرمز

Fabrication of Fourier Transform Infrared Spectrophotometer

Faculty of Physics, University of Kashan, Kashan

Abstract: In this paper, spectroscopy with Fourier transform method has been reported by using the Michelson-Morley interferometer with a 0.4 nm spectral resolution and the spectral range from 700 nm to 1800 nm . The signal to noise ratio of this spectrometer is better than 5000 . Also, in order to calculate the absorption spectrum of materials, the spectrophotometer has been fabricated with accuracy 1 nm and the spectral range from 1500 nm to 4500 nm . Then absorption spectrum of Polystyrene has been measured by using this spectrophotometer. In these systems, the optical signal after the detection and amplification 10^5 times, is sent to computer by 14 -bit analog to digital converter. These data are analyzed in real time. Then spectral curve is plotted by using the fast Fourier transform (FFT) in Labview software.

Keywords: Michelson interferometer, spectrophotometer, Fourier transform spectroscopy, Spectral resolution, Infrared region

۱- مقدمه

از طیف‌سنج به منظور تجزیه نور به تک تک مؤلفه‌های طول موجی استفاده می‌شود. از کاربردهای طیف‌سنجی می‌توان به تشخیص ترکیبات شیمیایی و درصد عناصر تشکیل‌دهنده مواد جامد، محلول و گازها با بررسی طیف گسیلی و جذبی اشاره کرد. طیف‌سنجی به روش شکست نور، طیف‌سنجی به وسیله عنصر پراشنده نور و طیف‌سنجی تبدیل فوری به روش‌های متداول طیف‌سنجی هستند. [۱]

طیف‌سنج تبدیل فوری توانایی کارکرد از ناحیه فرابنفش تا ناحیه مادون قرمز دور را دارد. برخلاف طیف‌سنج‌های منشوری و توری، در طیف‌سنج تبدیل فوری از هیچ گونه عنصر محدودکننده نور استفاده نمی‌شود و تمامی نور به صورت همزمان وارد آشکارساز می‌شود. بنابراین در طیف سنج تبدیل فوری، نسبت سیگنال به نوفه به اندازه قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. [۲]

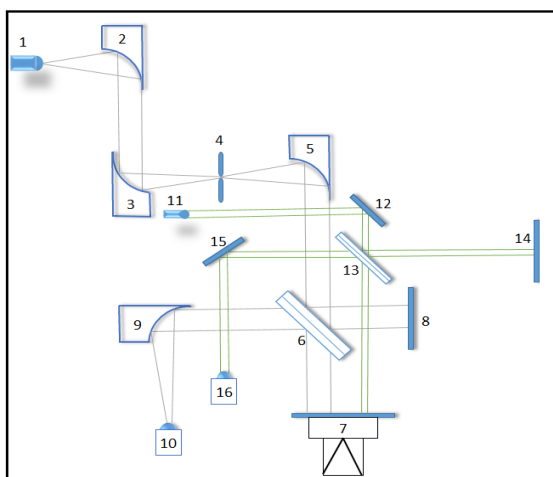
توان تفکیک طیفی بالا و محدوده آزاد طیفی وسیع در کنار نسبت سیگنال به نوفه بالا، طیف سنج تبدیل فوری را به یکی از طیف‌سنج‌های مطرح تبدیل کرده است [۳]

در این پژوهش ابتدا یک طیف‌سنج جهت طیف‌سنجی در محدوده ۷۰۰-۱۸۰۰ nm ساخته شده است. سپس با تغییر شکافنده پرتو و آشکارساز و استفاده از آینه‌های مناسب، محدوده طیفی به ۱۵۰۰-۴۵۰۰ nm رسیده است. در نهایت با استفاده از لامپ تنگستن (۵۰۰-۵۰۰۰ nm) به عنوان منبع نور، طیف جذبی حاصل از پلی استایرن به دست آمده است.

۲- چیدمان اپتیکی

در شکل (۱)، چیدمان طیف‌سنج ساخته شده با محدوده طیفی ۷۰۰-۱۸۰۰ nm توضیح داده شده است. ابتدا نور منبع (قطعه ۱)، با استفاده از دو آینه خارج محور سهموی (قطعه ۲ و ۳) بر روی روزنه کنترل‌کننده شدت نور (قطعه ۴) متمرکز شده است. سپس نور خروجی از روزنه به وسیله آینه خارج محور دیگری (قطعه ۵) موازی و وارد تداخل‌سنج مایکلسون شده است. شکافنده تداخل سنج (قطعه ۶) که از جنس سیلیس ذوب شده است، قسمتی از نور را عبور داده و قسمتی دیگر را بازتاب کرده است. پرتوهای عبوری و بازتابی پس از رفت و برگشت بین آینه متحرک (قطعه ۷) و آینه

ثابت (قطعه ۸) با یکدیگر تداخل می‌کنند. در این جا برای جابجایی آینه متحرک از یک جابجاگر مکانیکی با دقت بالا استفاده شده است. پرتو تداخلی پس از خروج از تداخل‌سنج به کمک یک آینه خارج محور (قطعه ۹) بر روی آشکارساز ژرمانیوم (قطعه ۱۰) متمرکز شده است. بدین ترتیب سیگنال تداخلی حاصل از منبع نور تابیده شده، بر روی آشکارساز قابل مشاهده است. علاوه بر منبع نوری که به عنوان منبع نور اصلی استفاده شده است، از یک لیزر هلیوم نئون (قطعه ۱۱) با طول موج ۶۳۲/۸ nm به عنوان منبع نور سیستم کالیبراسیون اپتیکی استفاده می‌شود. نور لیزر هلیوم نئون به وسیله یک آینه تخت (قطعه ۱۲) وارد تداخل سنج مایکلسون دوم می‌شود. این تداخل‌سنج از یک شکافنده نور مرئی (قطعه ۱۳)، یک آینه ثابت (قطعه ۱۴) و یک آینه متحرک مشترک با تداخل سنج اصلی (قطعه ۷) تشکیل شده است. پرتو این لیزر بعد از خروج از تداخل‌سنج و تشکیل الگوی تداخلی، به وسیله یک آینه تخت (قطعه ۱۵) برای مشاهده وارد آشکارساز سیلیسیوم (قطعه ۱۶) شده است. در نهایت، سیگنال تداخلی نور اصلی و لیزر هلیوم نئون پس از تقویت شدن، به کمک یک مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۴ بیتی وارد کامپیوتر می‌شود.



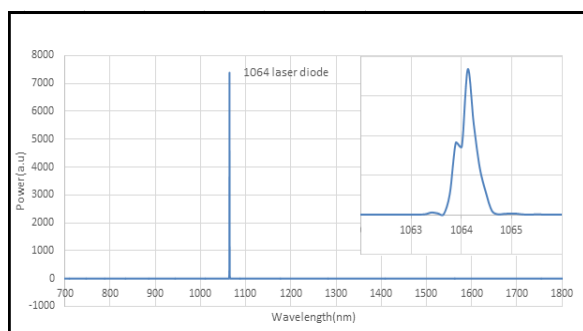
شکل ۱: نمایی از چیدمان اپتیکی طیف‌سنج ساخته شده با محدوده طیفی (۷۰۰-۱۸۰۰ nm). قطعه ۱: منبع نور اصلی، قطعه ۲، ۳ و ۹: آینه‌های خارج محور سهموی، قطعه ۴: روزنه، قطعه ۵: شکافنده سیلیس ذوب‌شده، قطعه ۶: شکافنده نور مرئی، قطعه ۷: آینه متحرک، قطعه ۸، ۱۲ و ۱۴: آینه تخت، قطعه ۱۰: آشکارساز ژرمانیوم، قطعه ۱۶: آشکارساز سیلیسیوم.

در چیدمان مربوط به طیف سنج جذبی با محدوده طیفی ۱۵۰۰-۴۵۰۰ nm تمامی المان‌ها مشابه با حالت قبلی قرار

می‌شود. بنابراین فاصله بین هر دو نوار تداخلی روشن (فاصله بین دو قله) برای لیزر هلیوم نئون برابر $316/4 \text{ nm}$ است. سیگنال تداخلی حاصل از لیزر هلیوم نئون پس از تقویت به عنوان یک تپ فرمان به سیستم الکترونیکی مبدل آنالوگ به دیجیتال فرمان داده‌گیری از سیگنال اصلی را می‌دهد. لذا با هر $316/4$ نانومتر جابجایی آینه یکبار از سیگنال خروجی تداخل سنج اصلی نمونه‌گیری می‌شود. هر چه میزان جابجایی آینه بیشتر باشد داده‌های بیشتری به گیرنده رسیده و طبق رابطه (۳) میزان تفکیک طیفی بهتر می‌شود.

۵- نتایج تجربی

شکل (۳ و ۲) طیف اندازه‌گیری شده دو لیزر با طول موج 1064 نانومتر و 787 نانومتر توسط این طیف سنج را نشان می‌دهد. با اندازه‌گیری این طیف‌ها مشخص شد که سیگنال به نوبه سیستم بهتر از 5000 است. برای مشخص شدن قدرت تفکیک این سیستم از یک لیزر مخابراتی چند مد استفاده شده و طیف آن اندازه‌گیری شد. مشاهده می‌شود که این لیزر، یک لیزر چند مد است و با اندازه‌گیری پهنای طیفی قله‌ای می‌توان دریافت که قدرت تفکیک سیستم بهتر از $0/4$ نانومتر است. در نهایت برای مشخص شدن دقت سیستم در حالت طیف سنجی جذبی از یک ماده مشخص به نام پلی استایرن استفاده شد و طیف نمونه اندازه‌گیری شد. این طیف، با طیف به‌دست آمده با طیف‌سنج تبدیل فوریه مادون قرمز استاندارد هم‌خوانی دارد. نتایج آن در شکل (۶) مشاهده می‌شود.



شکل ۲: طیف لیزر 1064 نانومتر با تفکیک‌پذیری طیفی $0/4 \text{ nm}$

گرفته است. با این تفاوت که به جای شکافنده قبلی از شکافنده CaF_2 و به جای آشکار ساز ژرمانیوم از آشکار ساز PbSe برای مشاهده سیگنال اصلی استفاده شده است. لامپ تنگستن در دو چیدمان فوق به عنوان منبع نور استفاده شده است. محل قرار گرفتن ماده مجهول بعد از آینه موازی‌کننده (قطعه ۵) و قبل از شکافنده (قطعه ۶) است.

۳- محاسبات

شدت سیگنال تداخلی آشکار شده شامل برهم‌نهی شدت تک‌تک بسامدهای مختلف نور منبع می‌شود. بنابراین می‌توان شدت برآیند را به کمک رابطه (۱) بیان کرد:

$$S(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(v) \cos(4\pi vx) dv \quad (1)$$

طبق رابطه (۱)، شدت برآیند $S(x)$ تابعی از جابجایی آینه متحرک x است. برای به‌دست آوردن طیف حاصل از یک منبع نور $B(v)$ ، باید از سیگنال تداخلی به‌دست آمده، تبدیل فوریه گرفت:

$$B(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(x) \cos(4\pi vx) dx \quad (2)$$

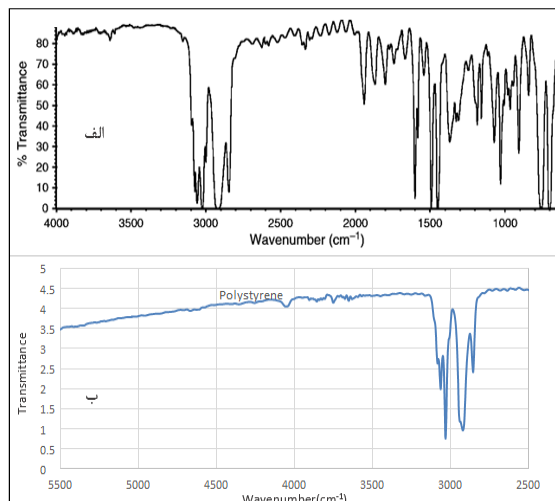
برای به‌دست آوردن طیف جذبی از یک نمونه، ابتدا طیف حاصل از منبع نور به‌عنوان طیف زمینه محاسبه می‌شود. سپس با قرار دادن نمونه داخل سیستم، طیف جذبی ماده اندازه‌گیری می‌شود.

می‌توان نشان داد که تفکیک‌پذیری طیفی (Δv) در هر طول‌موج، تابعی از جابجایی آینه متحرک x یا اختلاف راه نوری است و به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود: [۴]

$$\Delta v = \frac{\lambda^2}{OPD} = \frac{\lambda^2}{2x} \quad (3)$$

۴- سیستم داده‌گیری

برای محاسبه طیف با استفاده از رابطه (۲)، باید سیگنال تداخلی تابعی از جابجایی آینه باشد. اندازه‌گیری جابجایی آینه با کمک آشکارسازی نوارهای تداخلی یک لیزر هلیوم نئون و با استفاده از یک تداخل سنج دیگر که در آینه جابجا شونده با تداخل سنج اصلی مشترک است، انجام می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، پرتو لیزر هلیوم نئون ($632/8 \text{ nm}$) وارد تداخل‌سنج دوم شده است. در این‌جا به‌ازای هر $\lambda/2$ جابجایی آینه یک نوار تداخلی روشن تشکیل



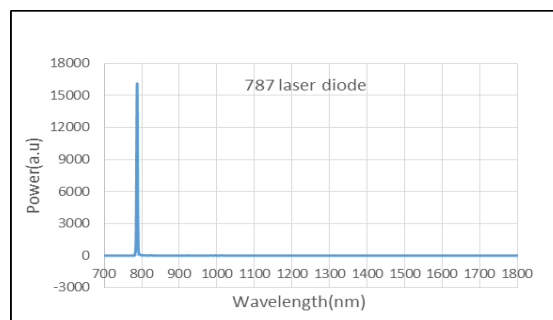
شکل ۶: طیف مربوط به پلی استایرن. الف: به دست آمده با طیف سنج استاندارد. ب: به دست آمده با طیف سنج ساخته شده.

۶- نتیجه گیری

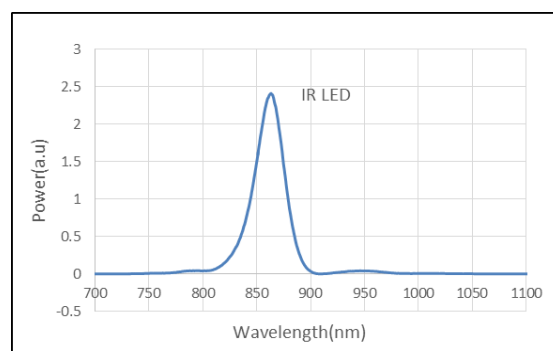
در این مقاله ساخت طیف سنج تبدیل فوری به محدوده طیفی ۷۰۰-۱۸۰۰ nm و طیف سنج جذبی تبدیل فوری به محدوده طیفی ۱۵۰۰-۴۵۰۰ nm توضیح داده شده است. برای آزمایش صحت و درستی طیف سنج، طیف منابع نوری مختلف به دست آورده شده است. هم چنین با استفاده از طیف سنج جذبی، طیف جذب پلی استایرن به دست آمده است که این طیف کاملاً با طیف استاندارد آن تطابق دارد.

مراجع

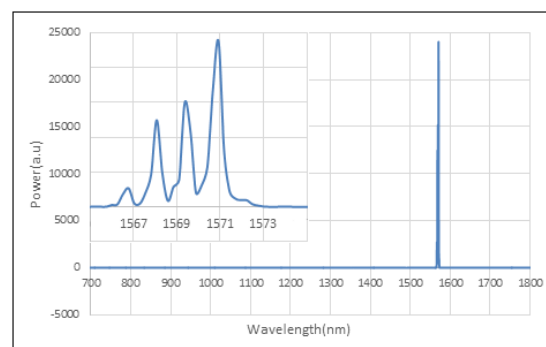
- [1] Demtröder, Wolfgang. *Laser spectroscopy: basic concepts and instrumentation*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] Griffiths, Peter R., and James A. De Haseth. *Fourier transform infrared spectrometry*. Vol. 171. John Wiley & Sons, 2007.
- [3] Bell, Robert John, and R. N. Bracewell. "Introductory Fourier transform spectroscopy." *American Journal of Physics* 41.1 (1973): 149-151.
- [4] Saptari, Vidi. *Fourier transform spectroscopy instrumentation engineering*. SPIE Optical Engineering Press, 2004.



شکل ۳: طیف لیزر ۷۸۷ نانومتر



شکل ۴: طیف LED مادون قرمز با پهنای طیفی حدود ۱۰۰ نانومتر



شکل ۵: طیف لیزر مخابراتی ۱۵۷۰ نانومتر با تفکیک طیفی ۰/۴ nm