

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 5000 است. همچنین یک طیف‌سنج جذبی برای محدوده طیفی $1500-4500\text{ nm}$ با دقت 1 nm به منظور محاسبه‌ی 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 می‌شوند. این داده‌ها به صورت لحظه‌ای تجزیه و تحلیل می‌شوند. سپس منحنی طیفی با استفاده از تبدیل فوریه سریع سیگنال دریافتی در محیط نرم افزار لب‌ویو رسم می‌شود.

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

Fabrication of Fourier Transform Infrared Spectrophotometer

Danial Javeri, Majid Nazeri, Amir Hosein Fakhar

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, the absorption spectrum of Polystyrene has been measured by using this spectrophotometer. In these systems, the optical signal is sent to computer by 14 -bit analog to digital converter, after detection and 10^5 times amplification. These data are analyzed instantaneously. Then spectral curve is plotted in Labview software by using the fast Fourier transform (FFT) of received signal.

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

۱- مقدمه

از طیف‌سنج به‌منظور تجزیه نور به تک‌تک مؤلفه‌های طول‌موجی استفاده می‌شود. از کاربردهای طیف‌سنجی می‌توان به تشخیص ترکیبات شیمیایی و درصد عناصر تشکیل‌دهنده مواد جامد، محلول و گازها با بررسی طیف گسبلی و جذبی اشاره کرد. طیف‌سنجی به روش شکست نور، طیف‌سنجی به‌وسیله عنصر پراشده نور و طیف‌سنجی تبدیل فوریه روش‌های متداول طیف‌سنجی هستند [۱].

طیف‌سنج تبدیل فوریه توانایی کارکرد از ناحیه فرابنفش تا ناحیه مادون‌قرمز دور را دارد. برخلاف طیف‌سنج‌های منشوری و توری، در طیف‌سنج تبدیل فوریه از هیچ گونه عنصر محدودکننده نور استفاده نمی‌شود و تمامی نور به‌صورت همزمان وارد آشکارساز می‌شود. بنابراین در طیف‌سنج تبدیل فوریه، نسبت سیگنال‌به‌نوفه به‌اندازه قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند [۲].

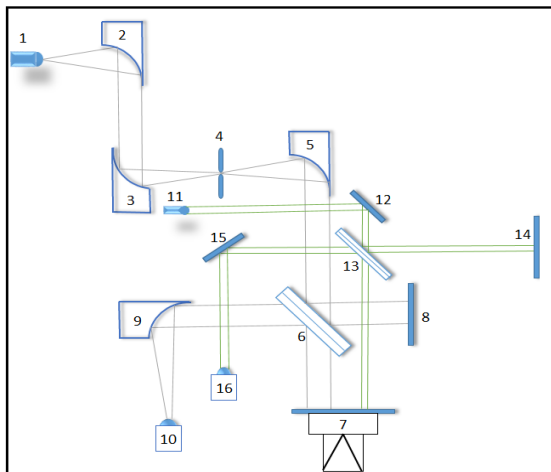
توان تفکیک طیفی بالا و محدوده آزاد طیفی وسیع در کنار نسبت سیگنال‌به‌نوفه بالا، طیف‌سنج تبدیل فوریه را به یکی از طیف‌سنج‌های مطرح تبدیل کرده است [۳].

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 ۴۵۰۰-۱۵۰۰ nm رسیده است. در نهایت با استفاده از لامپ تنگستن (۵۰۰-۵۰۰۰ nm) به‌عنوان منبع نور، طیف جذبی حاصل از پلی‌استایرن به‌دست 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 تداخل‌سنج (قطعه ۶) که از جنس سیلیس ذوب‌شده 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 به‌عنوان منبع نور اصلی استفاده شده است، از یک لیزر هلیوم نئون (قطعه ۱۱) با طول موج ۶۳۲/۸ nm به‌عنوان منبع نور سیستم کالیبراسیون اپتیکی استفاده می‌شود. نور لیزر هلیوم نئون به وسیله یک آینه تخت (قطعه ۱۲) وارد تداخل‌سنج مایکلسون دوم می‌شود. این تداخل‌سنج از یک شکافنده نور مرئی (قطعه ۱۳)، یک آینه ثابت (قطعه ۱۴) و یک آینه متحرک مشترک با تداخل‌سنج اصلی (قطعه ۷) تشکیل شده است. پرتو این لیزر بعد از خروج از تداخل‌سنج و تشکیل الگوی تداخلی، به‌وسیله 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.



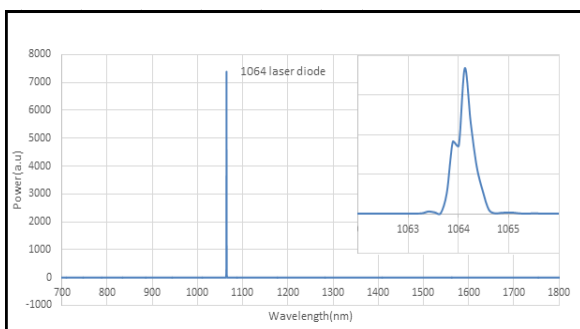
شکل ۱: نمای از چیدمان اپتیکی طیف‌سنج ساخته شده با محدوده طیفی (۷۰۰-۱۸۰۰ nm). قطعه ۱: منبع نور اصلی، قطعه ۲، ۳ و ۹: آینه‌های خارج محور سهموی، قطعه ۴: روزنه، قطعه ۵: شکافنده سیلیس ذوب‌شده، قطعه ۶: روزنه، قطعه ۷: آینه متحرک، قطعه ۸، ۱۴ و ۱۵: آینه تخت، قطعه ۱۰: آشکارساز ژرمانیوم، قطعه ۱۶: آشکارساز سیلیسیوم.

در چیدمان مربوط به طیف‌سنج جذبی با محدوده طیفی ۴۵۰۰-۱۵۰۰ nm، تمامی المان‌ها مشابه با حالت قبلی

روشن تشکیل 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 تیپ 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 تداخل‌سنج 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 (۳و۲) طیف اندازه‌گیری شده دو لیزر با طول موج 1064 نانومتر و 787 نانومتر توسط این طیف‌سنج 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. (شکل ۵) 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 طیف‌سنجی 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 $0/4 \text{ nm}$

قرار گرفته است. با این تفاوت که به‌جای شکافنده قبلی از شکافنده CaF_2 و به‌جای آشکارساز ژرمانیوم از آشکارساز PbSe ، برای مشاهده سیگنال اصلی استفاده شده است. لامپ تنگستن در 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:

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

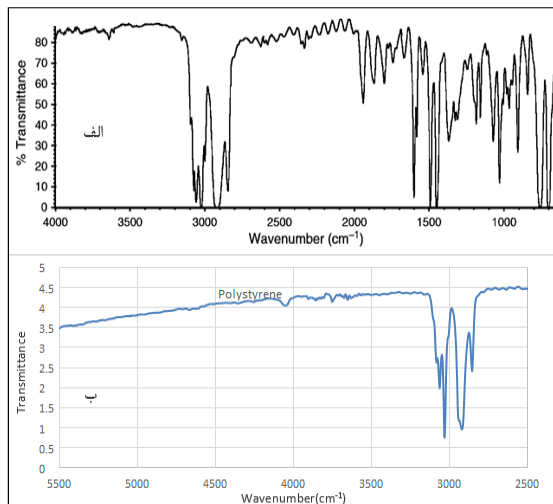
برای به‌دست آوردن طیف جذبی از یک نمونه، ابتدا طیف حاصل از منبع نور به‌عنوان طیف زمینه محاسبه می‌شود. سپس با قرار دادن نمونه داخل سیستم، طیف جذبی ماده اندازه‌گیری می‌شود.

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 تداخل‌سنج دیگر که در آینه جابجا شونده با تداخل‌سنج 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 این جا به‌ازای هر $\lambda/2$ جابجایی آینه یک نوار تداخلی



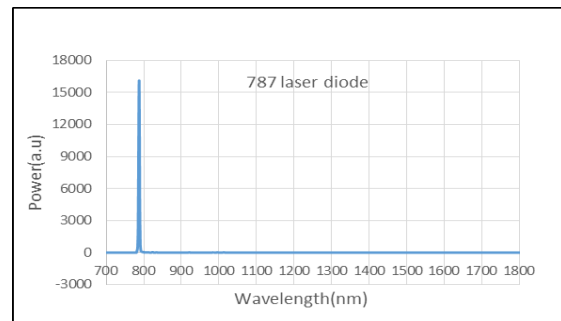
شکل ۶: طیف مربوط به پلی استایرن. الف: به دست آمده با طیف سنج استاندارد. ب: به دست آمده با طیف سنج ساخته شده.

۶- نتیجه گیری

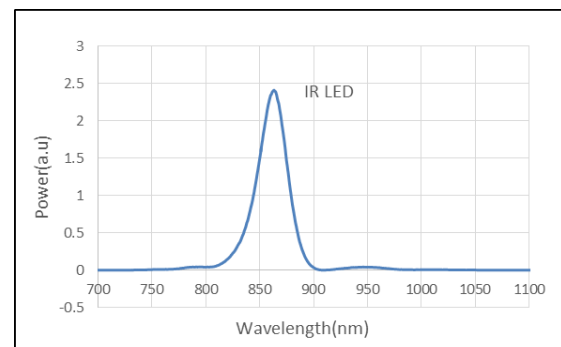
در این مقاله ساخت طیف سنج تبدیل فوری با محدوده طیفی ۷۰۰-۱۸۰۰ nm و طیف سنج جذبی تبدیل فوری با محدوده طیفی ۴۵۰۰-۱۵۰۰ nm توضیح داده شده است. برای آزمایش صحت و درستی طیف سنج، طیف منابع نوری مختلف به دست آورده شده است. هم چنین با استفاده از طیف سنج جذبی، طیف جذب پلی استایرن به دست آمده است که این طیف کاملاً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

مراجع

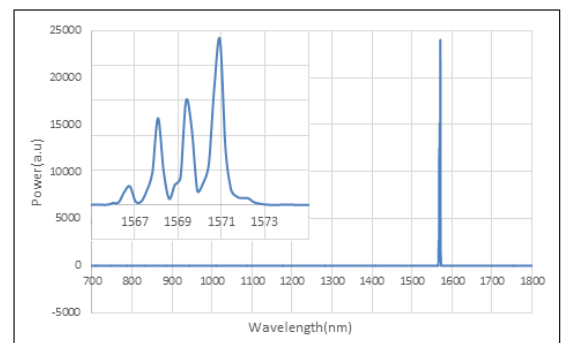
- [1] Demtröder, Wolfgang. *Laser spectroscopy: basic concepts and instrumentation*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] Griffiths, Peter R., and James A. De Haseth. *Fourier transform infrared spectrometry*. Vol. 171. John Wiley & Sons, 2007.
- [3] Bell, Robert John, and R. N. Bracewell. "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