تفکیک خطوط طیفی با استفاده از یک طیف سنج ساده با دقت زیر آنگستروم

حامد عباسی[۱,a]، محمد امین بانی[۱,b] مجید ناظری[۱,c]

[۱] گروه فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

در این مقاله طراحی و ساخت یک دستگاه اندازه گیری طیف اپتیکی ساخته شده از توری پراش و سنسور CMOS وب کم –بدون استفاده از شکاف- گزارش شده است. دستگاه از نوع طیف سنج های بدون شکاف است. این طیف سنج مقرون به صرفه دارای دقت 0.06 nm بوده که برای تفکیک بسیاری از خطوط طیفی مناسب است. این سامانه برای تفکیک خطوط دو تایی سدیم در 589 nm آزمایش شده است. ورودی دستگاه یک فیبر نوری تک مد و خروجی دستگاه درگاه USB است. نرم افزار سامانه با استفاده از برنامه LabVIEW نوشته شده است.

کلید واژه‌ها: طیف سنج، خطوط طیفی، دقت زیر آنگستروم.

Resolving Spectral Lines Using a Simple Spectrometer with Sub-angstrom Accuracy

H. Abbasi [1], M. A. Bani [1], M. Nazeri [1],

[1] Department of Physics, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract

In this paper, design and developing of an optical spectra measuring instrument based on a diffraction grating and a CMOS webcam sensor – without using slit – has been described. The instrument is a slit free spectrometer. This cost effective spectrometer achieves real accuracy of 0.06 nm, suitable for resolving many spectral lines. This system has been tested for resolving the sodium doublet lines at 589 nm. The input of the instrument is a single mode optical fiber and the output of the instrument is a USB port. The software of the system is based on the LabVIEW program.

Key Words: Spectrometer, Spectral Lines, Sub-angstrom Accuracy.

hamed.abbasi@grad.kashanu.ac.ir [a]
m.a.bani@grad.kashanu.ac.ir [b]
m_nazeri@kashanu.ac.ir [c]

مقدمه

امروزه روش های تشخیصی فراوانی توسعه یافته اند. طیف سنجی از پر کاربرد ترین روش های تشخیصی است. کاربرد طیف سنجی در کلیه علوم از شیمی، فیزیک و نجوم گرفته تا زیست شناسی و علوم کشاورزی به خوبی به اثبات رسیده است. کتاب های متعددی را در رابطه با کاربردهای طیف سنجی می توان یافت [۴-۱]. طیف سنج ها عنصر اصلی سامانه های طیف سنجی هستند که نور را به فرکانس های مختلف تفکیک کرده و توزیع فرکانسی را نور ورودی را معین می نمایند. از سامانه های طیف سنجی پر کاربرد می توان به سامانه های طیف سنجی فروشکست القایی لیزری، فلورسانس القایی لیزری، رامان، جذبی و نشری اشاره کرد. دانشمندان همواره سعی داشته اند تا طیف سنج ها را به صورت کاراتری بسازند. به گونه ای که هم قدرت تفکیک و حساسیت آن بالا برود و هم قیمت تمام شده آن پایین تر بیاید. انواع مختلفی از طیف سنج ها وجود دارند، مانند طیف سنج های که بر مبنای تداخل نور کار می کنند (طیف سنج تبدیل فوریه از این نوع است)، طیف سنج های منشوری و طیف سنج های توری. امروزه از طیف سنج های منشوری بیشتر در شاخه هایی از علوم زیستی که نیاز کمتری به قدرت تفکیک بالا دارند استفاده می شود، چرا که این نوع طیف سنج ها ضمن این که مزایای بسیاری دارند اما قدرت تفکیک بالایی ندارند. ضمن این که کالیبره کردن این نوع طیف سنج ها نیازمند خطوط طیفی مرجع بسیار زیادی است [۵]. طیف سنج توری که با استفاده از توری پراش ساخته می شود متداول ترین نوع طیف سنجی است که امروزه توسط دانشمندان سر تا سر جهان مورد استفاده قرار می گیرد. این نوع از طیف سنج ها بسیار راحت تر از طیف سنج نوع منشوری کالیبره می شوند. چرا که میزان بازشدگی نور در طول موج های مختلف پس از عبور از منشور بسیار متغیر بوده (باز شدگی در طول موج های کوتاه تر بیشتر از طول موج های بلند تر است) ولی پس عبور یا بازتاب از توری این باز شدگی در طول موج های مختلف مقدار نسبتا ثابتی را دارد که با یک تقریب بسیار جزئی می توان آن را ثابت در نظر گرفت. از یک سو تلاش های متعددی صورت گرفته است تا دقت و حساسیت این نوع از طیف سنج ها بالا برود [۶] و از سوی دیگر گزارشهای متعددی مبنی بر تلاش برای ساده سازی و ارزان سازی این نوع طیف سنج ها ارائه شده است [۱۰-۷]. این مقاله طراحی و ساخت یک طیف سنج توری با قدرت تفکیک مناسب با استفاده از قطعات ساده را تشریح می کند.

طراحی و ساخت طیف سنج

برای طراحی و ساخت یک طیف سنج مناسب باید علاوه بر داشتن اطلاعات اپتیکی مناسب از اطلاعات الکترونیکی، کامپیوتری و همچنین مکانیکی مناسبی برخوردار بود. طراحی الکترونیکی مناسب بالا رفتن عمر قطعات الکترونیکی و پایین آمدن نوفه ایجاد شده در سامانه را تضمین می کند. داشتن اطلاعات کامپیوتری مناسب جهت ارتباط دستگاه با کامپیوتر لازم است. طراحی مکانیکی مناسب نیز ثبات سامانه را در متضمن می شود. با این حال طراحی اپتیکی مناسب مهمترین بخش کار است. در دستگاه طراحی شده نور با استفاده از یک فیبر نوری تک مد وارد سامانه می شود. فیبر استفاده شده از جنس شیشه انتخاب شده تا در نواحی مختلف جذب نداشته باشد. فیبر های پلاستیکی با این که ارزان تر هستند اما در نواحی خاصی جذب دارند. قطر فیبر استفاده شده ۹ میکرون بوده و کانکتور آن نیز از نوع FC/PC انتخاب شده است که از طریق

آداپتور مربوطه به سامانه متصل می شود. قبل محاسبه میزان قدرت تفکیک طیفی سامانه به محاسبه میزان محدوده آزاد طیفی (FSR) می پردازیم. از عامل مهم محدود کننده محدوده آزاد طیفی تعداد خطوط توری، محدودیت لنز میدان، محدودیت ابعاد آرایه آشکار ساز و محدوده حساسیت طول موجی آشکار ساز می باشد. پراش از سطح توری با فرمول معروف زیر توصیف می شود [۱۱].

$$2d\sin\theta = n\lambda \qquad (۱)$$

که در آن d گام توری (فاصله بین خطوط توری)، θ زاویه پراش، n مرتبه ی پراش و λ طول موج است. با محاسبات ساده ریاضی مشخص می شود که هرچه تعداد خطوط توری بیشتر می شود، طول موج بیشینه پراش کمتر می شود، چرا که با افزایش تعداد خطوط توری مقدار گام توری کاهش یافته و چون مقدار $\sin\theta$ نمی تواند از یک تجاوز کند، طرف دیگر معادله را ملزم به کاهش یافتن می کند. جدول زیر حاوی اطلاعات طول موج بیشینه پراش یافته برخی از توری های متداول است.

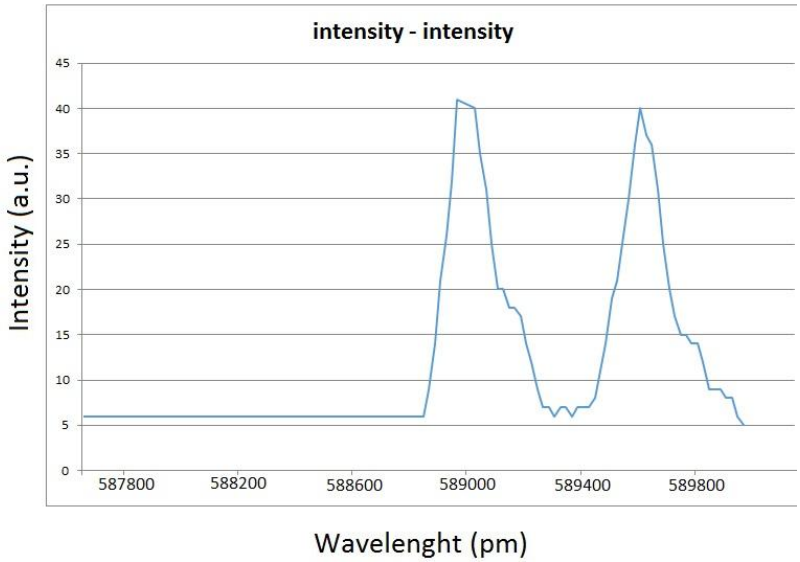
جدول شماره ۱: طول موج بیشینه برخی از توری های متداول

بیشترین طول موجی که پراش پیدا می کند (nm)	تعداد خط در میلیمتر
۳۲۰۰	۶۲۵
۱۶۶۶	۱۲۰۰
۱۴۵۱	۱۳۵۰
۱۱۱۱	۱۸۰۰
۵۰۰	۴۰۰۰

در این مقاله از یک توری ۱۳۵۰ خط در میلیمتر ارزان قیمت استفاده شده است. مشاهده می شود که این نوع توری محدودیت زیادی را بوجود نمی آورد. عامل محدود کننده دیگر که توسط عدسی تصویر ساز به وجود می آید به علت عدم توانایی کافی این عدسی برای تصویر کردن پرتو هایی است که پس از پراش با توجه به طول موجشان با زوایای متفاوتی به عدسی می رسند. برای کم کردن این محدودیت می توان تا حد امکان توری را نزدیک به عدسی گذاشت. عامل محدود کننده دیگر مربوط به ابعاد آشکار ساز است که هرچه کوچکتر باشد محدوده طیفی کوچکتری را پوشش می دهد. در این مقاله از یک عدسی ترکیبی با فاصله کانونی ۵۰ میلیمتر که در فاصله ی ۳ سانتی متری از توری قرار داده شده استفاده شده است. از یک آشکار ساز آرایه ای $\frac{1}{3}$ اینچ که دارای آشکارساط آرایه‌ای دو بعدی با۱۹۲۰ آشکارساز در طول و ۱۰۸۰ آشکارساز در عرض است استفاده شده است. نوع سنسور آشکار ساز CMOS بوده است. این سنسور متعق به یک وب کم با نام تجاریMicrosoft Lifecam Studio می باشد. محدوده حساسیت طول موجی آشکار ساز نیز از 200 nm تا 1100 nm است. محدوده آزاد طیفی این طیف سنج 40 nm به دست آمد. برای محاسبه توان تفکیک طیفی ابتدا باید مقدار $\frac{dx}{d\lambda}$ را به دست بیاوریم. برای به دست آوردن این مقدار می توانیم از فرمول زیراستفاده کنیم:

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{f_2}{d}[1 - (\frac{\lambda}{d} - \sin\theta)^2]^{1/2} \qquad (۲)$$

در این فرمول f_2 فاصله کانونی عدسی دوم است که برابر ۵۰ میلیمتر انتخاب شده است. فاصله کانونی عدسی اول نیز ۱۳۰ میلیمتر بوده است. در این فرمول همچنین d گام توری (فاصله بین خطوط توری)، θ زاویه پراش و λ طول موج است. عدسی اول به تنهایی تعیین کننده این مسئله است که چه میزان از سطح توری پراش درگیر شود ولی هر دو عدسی با هم عملیات تصویر سازی شکاف ورودی (قطر فیبر نوری ورودی) بر روی شکاف خروجی (اندازه ی پیکسل های آشکار ساز) را انجام می دهند. عرض پیکسل های آشکار ساز آرایه ای استفاده شده برابر 2.7 میکرون بوده است. با کمی محاسبات مقدار توان تفکیک طیفی برابر با 0.06 nm به دست می آید. تصویر زیر طیف خطوط دوتایی سدیم در 589 nm را نشان می دهد. از نرم افزار LabVIEW برای این کار استفاده شده است. نرم افزار نوشته شده قابلیت این را دارد که تعیین کند که چه تعداد از پیکسل های عمودی آشکار ساز آرایه ای مورد استفاده قرار بگیرد، تا در صورت نیاز به بالا رفتن dynamic range از تعداد پیکسل های بیشتر و در صورت نیاز به کاهش ابیراهی احتمالی به وجود آمده (منحنی شدن تصویر بر روی آشکار ساز) از تعداد پیکسل های کمتر استفاده شود.



تصویر شماره (۱): تفکیک خطوط دو تایی سدیم

نتیجه گیری:

پس از بیان مختصری در مورد طیف سنجی، مختصرا انواع طیف سنج ها مرور شد. دانش و مهارت های لازم برای طراحی طیف سنج ها مورد بررسی قرار گرفت. این طراحی ها شامل طراحی مکانیکی، طراحی الکترونیکی، طراحی کامپیوتری و طراحی اپتیکی بود. همان گونه که بیان شد طراحی اپتیکی مهمترین بخش طاراحی مناسب یک طیف سنج است. طراحی دو ویژگی مهم طیف سنج یعنی محدوده آزاد طیفی و توان تفکیک طیفی مورد بررسی قرار گرفت. میزان توان تفکیک طیفی دستگاه برابر با 0.06 nm محاسبه شد و

میزان محدوده آزاد طیفی نیز برابر با 40 nm محاسبه گردید. در نهایت از طیف دو گانه ی سدیم برای مشاهده کارایی دستگاه استفاده گردید.

مرجع‌ها

[1]Jihad René Albani, "*Principles and Applications of Fluorescence Spectroscopy*", Blackwell Publishing, (2007).
[2]Alan Corney, "Atomic and Laser Spectroscopy", Clarendon Press. Oxford, (1997).
[3] Peter Hannaford, "Femtosecond Laser Spectroscopy", Springer, (2005).
[4] Bernhard Schrader, "Infrared and Raman spectroscopy" VCH Publishers, (1995).
[5]S. Zwerdling et. al. Spectrocimica Acta, Vol 17, p. 819, (1961).
[6] James D. White et. al. Rev. Sci. Instrum. 83, 113104 (2012).
[7] EkoWidiatmoko et. al. Phys. Educ. 46, p. 332 (2011).
[8] Fumitaka Wakabayashi, Journal of Chemical Education, Vol. 83 No. 1, P. 849 (2006).
[9] Fumitaka Wakabayashi, Journal of Chemical Education, Vol. 85 No. 6, P. 849 (2008).
[10] Tim Knauer, The Physics Teacher 40, 466 (2002).
[11] Demtröder, Laser Spectroscopy, 4th ed_Vol 1_Basic Principles, Springer, (2008).