

ORIGINAL ARTICLE

Design and Build a Deflectometry System and Evaluating Its Performance in Measuring the Dispersion of the Linear Refractive Index of Thin Scintillating YAG and Quartz Crystals

Amirmohammad Beigzadeh^{1*}, Mohammad Reza Rashidian Vaziri^{2,3}

1 Ph.D. in Physics, Radiation Application Research School, NSTRI, Tehran, Iran.

2 Assistant Professor, Department of Physics, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

3 Photonics and Quantum Technologies Research School, NSTRI, Tehran, Iran.

Correspondence

Amirmohammad Beigzadeh
Email: abeigzadeh@aeoi.org.ir

How to cite

Beigzadeh, A. Rashidian Vaziri, M.R. (2024). Design and Build a Deflectometry System and Evaluating Its Performance in Measuring the Dispersion of the Linear Refractive Index of Thin Scintillating YAG and Quartz Crystals, *Optoelectronic*, 6(2), 19-28.

ABSTRACT

One of the fundamental issues in physics is measuring the refractive index of various materials. Knowing the magnitude of the refractive index of a material plays a decisive role in predicting its behavior and the amount of light passing through it. There are various methods for measuring the refractive index. In this work, to measure the refractive index of thin samples, a system based on deflectometry method has been designed and built. The theoretical foundations of the work, effective parameters and system measurement errors in measuring the refractive index of thin samples with thickness of about a few millimeters have been investigated. After optimizing the system, the refractive index magnitude of YAG and quartz crystal samples were measured, both widely used in various scientific fields. Using three lasers of helium-cadmium (blue color, wavelength 442 nm), argon ion (green color, wavelength 514.5 nm) and helium-neon (red color, wavelength 632.8 nm), optical dispersion of the refractive index of these two substances were measured at the radiation wavelengths of these lasers. The measured refractive index values at these wavelengths were 1.44, 1.45, and 1.37 for the quartz sample, and 1.81, 1.83, and 1.73 for the YAG crystal sample.

KEYWORDS

Scintillator Detectors, Optical Crystals, Optial Deflectometry, Refractive Index, Light Dispersion.

فصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

طراحی و ساخت سیستم انحرافسنجی و ارزیابی عملکرد آن در اندازه‌گیری
پاشندگی ضریب شکست خطی بلورهای نازک سوسوزن یاگ و کوارتزامیرمحمد بیگزاده^{1*}، محمدرضا رشیدیان وزیری^{2,3}

چکیده

یکی از مسائل بنیادین در علم فیزیک، اندازه‌گیری ضریب شکست مواد مختلف است. اطلاع از بزرگی ضریب شکست یک ماده در پیش‌بینی نحوه رفتار و میزان نور عبوری از آن نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ضریب شکست وجود دارد. در این کار برای سنجش ضریب شکست نمونه‌های با ضخامت کم، یک سیستم مبتنی بر روش انحرافسنجی طراحی و ساخته شده است. مبانی نظری کار، مشخصه‌های مؤثر و میزان خطای سیستم در اندازه‌گیری ضریب شکست نمونه‌های با ضخامت کم در حدود چند میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. پس از بهینه‌سازی سیستم، بزرگی ضریب شکست نمونه‌های بلوری یاگ و کوارتز توسط آن اندازه‌گیری شد که در علوم مختلف بسیار پرکاربرد هستند. با استفاده از سه لیزر هلیوم-کادمیوم (رنگ آبی، طول موج 442 نانومتر)، یون آرگون (رنگ سبز، طول موج 514/5 نانومتر) و هلیوم-نئون (رنگ قرمز، طول موج 632/8)، پاشندگی نوری ضریب شکست این دو ماده در طول موج‌های تابشی این لیزرها اندازه‌گیری شد. مقادیر اندازه‌گیری شده برای ضریب شکست در این سه طول موج به ترتیب برای نمونه کوارتز 1/44، 1/45 و 1/37 و برای نمونه بلور یاگ 1/81، 1/83 و 1/73 بود.

واژه‌های کلیدی

آشکارسازهای سوسوزن، بلورهای اپتیکی، انحرافسنجی، ضریب‌شکست، پاشندگی نور

1 دکتری فیزیک، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران.
2 استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه فردوسی، مشهد.
3 پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران.

نویسنده مسئول:

امیرمحمد بیگزاده

رایانامه: abeigzadeh@aeoi.org.ir

استناد به این مقاله:

امیرمحمد بیگزاده، محمدرضا رشیدیان وزیری (1402). طراحی و ساخت سیستم انحرافسنجی و ارزیابی عملکرد آن در اندازه‌گیری پاشندگی ضریب شکست خطی بلورهای نازک سوسوزن یاگ و کوارتز. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 6(2)، 19-28.

مقدمه

ضریب شکست مشخصه‌ای از ماده است که نحوه خمیدگی یا شکست نور را هنگام عبور از آن توصیف می‌کند. انحراف‌سنجی نوری روشی قدرتمند برای اندازه‌گیری ضریب شکست مواد شفاف است. با استفاده از انحراف‌سنجی، می‌توان ضریب شکست مواد مختلف را با تحلیل الگوهای انحراف ایجاد شده در هنگام عبور نور از آن‌ها تعیین کرد. با نمایش یک الگوی شناخته شده بر روی سطح ماده و مشاهده نحوه تغییر شکل الگو، می‌توان اطلاعات ارزشمندی را در مورد ضریب شکست استخراج کرد [1]. این روش کاربردهای عملی متعددی در زمینه‌های مختلف دارد. به عنوان مثال، در زمینه اپتیک و ساخت عدسی‌های مختلف، آگاهی از بزرگی ضریب شکست مواد مختلف برای طراحی و تولید قطعات با کیفیت بسیار مهم است. انحراف‌سنجی امکان اندازه‌گیری دقیق و کارآمدی را فراهم آورده و به اطمینان از عملکرد مطلوب عدسی‌ها و نیز سایر قطعات اپتیکی مثل منشورها و آینه‌ها کمک می‌کند. علاوه بر این، ضریب شکست مشخصه‌ای کلیدی برای توصیف و درک خواص مواد شفاف در زمینه علم مواد است. با استفاده از انحراف‌سنجی نوری، محققان می‌توانند به طور مؤثری بررسی کنند که چگونه ضریب شکست به عوامل مختلفی مانند دما، فشار یا ترکیب ماده وابسته است [2]. این دانش برای توسعه مواد جدید یا بهبود مواد موجود بسیار ارزشمند است. روش‌های مبتنی بر انحراف‌سنجی در زمینه مهندسی زیست پزشکی نیز به کار گرفته می‌شوند. به عنوان مثال می‌توان از آن‌ها برای اندازه‌گیری ضریب شکست بافت‌های زیستی استفاده کرده و بینشی در مورد خواص ساختاری و نوری آن‌ها به دست آورد [3]. این اطلاعات می‌تواند به ویژه در زمینه‌هایی مانند چشم‌پزشکی مفید باشد که داشتن درک دقیقی از بزرگی ضریب شکست قرنیه و عدسی چشم می‌تواند به تشخیص و درمان بیماری‌های مرتبط با بینایی کمک کند [4]. انحراف‌سنجی برای اندازه‌گیری و اطلاع از بزرگی ضریب شکست مواد، علاوه بر کاربردهای عملی، فرصت‌های فوق‌العاده‌ای را نیز برای تحقیق و نوآوری فراهم می‌آورد. محققین به طور مداوم در حال بررسی روش‌ها و پیشرفت‌های جدید در این زمینه هستند تا دقت و کارایی این اندازه‌گیری‌ها را افزایش دهند. یکی از حوزه‌های تحقیقاتی فعال در این حیطه، توسعه روش‌های انحراف‌سنجی غیرتماسی است که در آن‌ها نیازی به تماس فیزیکی با مواد تحت اندازه‌گیری نیست. این موضوع نه تنها فرآیند اندازه‌گیری را ساده‌تر می‌کند، بلکه خطر وارد آمدن آسیب احتمالی به نمونه‌های ظریف یا حساس

را نیز کاهش می‌دهد [5]. علاوه بر این، محققان در حال بررسی راه‌هایی برای گسترش قابلیت‌های انحراف‌سنجی در اندازه‌گیری ضریب شکست مواد پیچیده‌تر، به عنوان مثال مواد با پروفایل‌های گرادیانی ضریب شکست یا خواص ناهمسان‌گردی هستند. این پیشرفت‌ها می‌تواند پیامدهای مهمی در زمینه‌هایی مانند اپتیک، فوتونیک و طراحی مواد مختلف داشته باشد. به طور کلی، به کارگیری روش انحراف‌سنجی برای اندازه‌گیری ضریب شکست، حوزه‌ای جذاب و در حال رشد است که می‌تواند به پیشرفت‌های علمی و فناوری مختلف کمک نماید. ضریب شکست مهم‌ترین مشخصه هر قطعه اپتیکی است که می‌تواند خاصیت بازتابندگی آن را تعیین کند [6]. بازتابش از سطح یک قطعه را می‌توان از طریق روش‌های ماده‌ای با ضریب شکست مشخص کاهش داد تا یک پوشش ضدبازتاب شکل بگیرد. این کمیت میزان کانونی سازی عدسی‌ها، پخش‌کنندگی منشورها و در کل، عبور نور از داخل سیستم را مشخص می‌کند. ضریب شکست عاملی است که باعث هدایت نور در یک تار نوری می‌شود و تغییر آن میزان انتقال و نوع مد عبوری در داخل آن را می‌تواند دستخوش تغییر کند.

از آنجایی که ضریب شکست خاصیت فیزیکی مهم و بنیادی یک ماده است، می‌توان از آن برای تشخیص مواد نیز استفاده کرد. ضریب شکست برای اندازه‌گیری و شناسایی گازها، مایعات و جامدات به کار می‌رود، خلوص ماده را مشخص کرده و یا غلظت آن را تعیین می‌کند [7]. به طور مرسوم، ضریب شکست برای سنجش غلظت حلال در محلول‌های آبی استفاده می‌شود. ضریب شکست می‌تواند کمیت بازرشی در تعیین اختلاف بین سنگ‌های الماس باشد. توماس یانگ به احتمال فراوان اولین شخصی بود که ضریب شکست را در سال 1807 اندازه‌گیری کرد [8]. برای امواج در ناحیه مرئی، اغلب مواد شفاف ضریب شکستی بین 1 تا 2 دارند. آگاهی از ضریب شکست و پاشندگی نوری مواد در فناوری‌های مبتنی بر لیزر اهمیت بسزائی دارد. برای مثال، بدون اندازه‌گیری جداگانه ضریب شکست‌های اصلی، امکان تعیین جهت تطبیق فاز و برش صحیح ساختارهای بلوری برای تولید هماهنگ‌های بالاتر تابشی وجود ندارد. روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری بزرگی ضریب شکست استفاده می‌شوند. روش اندازه‌گیری حداقل انحراف [9] از جمله این روش‌ها است. اندازه‌گیری زاویه بحرانی روش دیگری برای تعیین ضریب شکست است که بر مبنای تعیین زاویه در موقعیتی است که بازتاب داخلی کلی در سطح مشترک یک نمونه و یک منشور با ضریب شکست بالا

طیف گسترده‌ای از طول موج‌ها از ماورای بنفش تا فرورسرخ شفاف است و برای کاربردهای نوری مختلف مناسب است. شفافیت بالا و پراکندگی اندک، کوارتز را برای طراحی سیستم‌های اپتیکی دقیق ایده‌آل می‌کند. پنجره‌های کوارتز در دستگاه‌های نوری استفاده می‌شوند تا امکان انتقال نور را فراهم کنند و در مقابل عوامل محیطی محافظت کنند. پنجره‌های کوارتز اغلب در طیف‌سنجی لیزری، ساخت سیستم‌های تصویربرداری، طیف‌سنجی و دیمتری پرتوهای یون‌ساز که از مواد رادیواکتیو گسیل می‌شوند استفاده می‌شوند [16]. کوارتز به دلیل خاصیت ضریب شکست دوگانه خود می‌تواند به عنوان ماده‌ای مناسب در ساخت فیلترها استفاده شود. به دلیل این خاصیت، تنها نور با جهت قطبش خاص اجازه عبور از ماده را پیدا خواهد کرد و بدین طریق می‌توان با استفاده از کوارتز یک قطبش‌گر نوری ساخت. علاوه بر این، این ماده کاربردهایی را در ساخت نمایشگرهای LCD، عکاسی و ارتباطات نوری دارد. یاگ یک ماده بلوری مصنوعی با ویژگی‌های نوری و مکانیکی منحصر به فرد است که از ایتريم، آلومینیوم و اکسیژن تشکیل می‌شود. برخی از کاربردهای قابل توجه بلور یاگ در اپتیک عبارتند از کاربرد به عنوان محیط بهره لیزری³ و ساخت آشکارسازهای سوسوزن است. این بلورها به طور مؤثری نور را تقویت کرده و در ساخت لیزرهای حالت جامدی که برای برش، جوشکاری، کاربردهای پزشکی و تحقیقات علمی کاربرد دارند استفاده می‌شوند. بلورهای یاگ آرایش شده با سریم (Ce) یا سایر فعال‌کننده‌ها به عنوان محیط سوسوزنی نیز استفاده می‌شوند. این محیط‌ها، هنگامی که در معرض تابش‌های یون‌ساز قرار می‌گیرند، از خود نور قابل مشاهده‌ای ساطع می‌کنند که می‌توان آن را مشاهده نموده و برای آشکارسازی تابش، تصویربرداری‌های پزشکی و آزمایش‌های فیزیک با انرژی بالا استفاده کرد. به دلیل رسانا نش گرمایی بالا و استحکام مکانیکی مناسب، یاگ در ساخت پنجره‌های نوری در محیط‌های خشن مانند محیط‌هایی با حضور پرتوهای رادیواکتیو زیاد نیز کاربرد پیدا می‌کند. این ویژگی‌های مناسب، به‌کارگیری یاگ را در کاربردهای نظارت و اندازه‌گیری سطح تشعشعات در تأسیسات هسته‌ای، تضمین ایمنی کارگران و حفاظت از محیط زیست ارزشمند می‌کند و اینکه ضریب شکست کریستال سوسوزن یک پارامتر حیاتی است که باید هنگام طراحی آشکارسازهای تابش‌های یون‌ساز به دقت اندازه‌گیری و در نظر گرفته شود. ضریب شکست یک ماده معیاری است که نشان

به عنوان مرجع رخ می‌دهد [10, 11]. رخداد هرگونه تغییرات کوچک در نمونه یا ماده بین نمونه و منشور زاویه بحرانی شکست را تغییر می‌دهد. روش‌های غیرتماسی مانند تداخل‌سنجی نیز کاربرد گسترده‌ای در اندازه‌گیری ضریب شکست دارند. استفاده از تداخل‌سنج مایکلسون، برای اندازه‌گیری دقیق ضریب شکست از طریق جابه‌جایی نمونه در یکی از بازوها و چرخاندن آن و تحلیل مکرر نوارهای تداخلی گزارش شده است [12]. محدودیت آن وابستگی به ضخامت نمونه و حساسیت به اغتشاشات محیطی و نوفه‌ها است. تداخل‌سنج‌های فابری-پرو و ترکیب مایکلسون و فابری-پرو نیز تاکنون برای اندازه‌گیری ضریب شکست استفاده شده‌اند [13, 14].

از مزایای اندازه‌گیری ضریب شکست به روش حداقل انحراف می‌توان گفت که روش نسبتاً ساده و سرراست است. می‌توان با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی معمول در دسترس انجام داد. هنگامی که با دقت انجام شود نتایج دقیقی ارائه می‌دهد و در مورد معایب آن می‌توان گفت که به اندازه‌گیری دقیق زوایا نیاز دارد، که می‌تواند چالش برانگیز باشد. محدود به مواد شفاف است و ممکن است برای موادی با ضریب شکست زیاد مناسب نباشد.

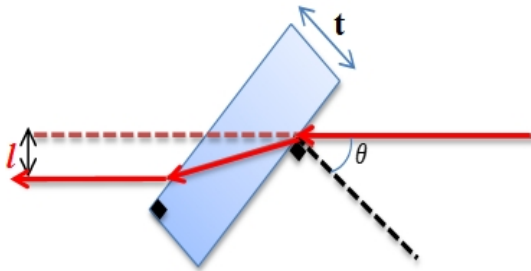
از مزایای اندازه‌گیری ضریب شکست به روش بحرانی نیز این است که قابل استفاده برای طیف وسیعی از مواد، از جمله مایعات و جامدات است. راه‌اندازی و روش اندازه‌گیری نسبتاً ساده است. تعیین مستقیم ضریب شکست را فراهم می‌کند و از معایب آن محدود بودن به مواد با رابط مجزا با هوا یا خلاء، دقت را می‌توان تحت تأثیر ناصافی‌ها و ناخالصی‌های سطح قرار داد و تداخل‌سنجی نیز صحت و دقت بالا در اندازه‌گیری ضریب شکست دارد. مناسب برای طیف گسترده‌ای از مواد، از جمله نمونه‌های شفاف و مات است و می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد تغییرات ضریب شکست در یک ماده ارائه دهد. ولی نیاز به تجهیزات تخصصی و متخصص دارد. حساس به اختلالات محیطی مانند ارتعاشات و نوسانات دما است. تنظیمات و آنالیز داده‌ای پیچیده‌تر در مقایسه با روش‌های دیگر لازم است [15].

کوارتز¹ و یاگ² (ایتريوم آلومینیوم گارنت) موادی هستند که به دلیل خواص منحصر به فردشان به طور گسترده در اپتیک و سایر کاربردها استفاده می‌شوند. کوارتز شکل بلوری دی‌اکسید سیلیکون (SiO₂) است و دارای خواص نوری عالی است. در

1 Quartz

2 Yttrium Aluminum Garne

سمت ماده مطالعه شده از طریق ابزارهای اپتیکی هدایت می‌شود و نور منحرف شده مشاهده و بررسی می‌شود و اندازه‌گیری ضریب شکست توسط انحراف‌سنجی در ابتدا توسط هاسلر¹ و همکاران صورت گرفت [1]. انحراف پرتوهای نور می‌تواند به علت‌های مختلفی از جمله تغییر در ضریب شکست، بی‌نظمی‌های سطحی یا وجود گرادیان‌های دمایی در ماده رخ دهد. برای اندازه‌گیری ضریب شکست با استفاده از انحراف‌سنجی، اغلب از سطح مرجع با انحنای مشخص استفاده می‌شود. با مقایسه انحراف پرتوهای نوری که از ماده عبور می‌کنند با جهت شناخته شده، می‌توان ضریب شکست را تعیین کرد. این مقایسه را می‌توان به صورت بصری یا با استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های تصویربرداری پیشرفته برای تحلیل پرتوهای نوری منحرف شده انجام داد. در شکل 1 اصول اولیه روش اندازه‌گیری میزان انحراف مسیر نور به علت شکست نور در ماده‌ای با صفحات موازی و ضخامت t نشان داده شده است.



شکل 1. طرحی از هندسه انجام آزمایش انحراف‌سنجی نوری و جابه‌جایی مسیر باریکه لیزر پس از عبور از تیغه شفاف.

باریکه از هوا و تحت زاویه θ به سطح ماده که به صورت یک تیغه متوازی‌السطوح است برخورد می‌کند. ضریب شکست نامعلوم ماده n را می‌توان با اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی l باریکه خروجی نهایی نسبت به مسیر حرکت اولیه آن به دست آورد. با استفاده از اصول اپتیک هندسی و مطابق با شکل 1، می‌توان با نوشتن و ساده‌سازی روابط ریاضی به رابطه نهایی زیر برای میزان جابه‌جایی l رسید:

$$l = t \sin q \frac{\frac{e}{\epsilon} - \frac{u}{\epsilon}}{\sqrt{n^2 - \sin^2 q}} \quad (2)$$

با نوشتن این رابطه بر حسب ضریب شکست نامعلوم n خواهیم داشت:

می‌دهد چه مقدار نور در هنگام ورود به ماده خمیده یا شکست می‌شود. در مورد کریستال‌های سوسوزن مانند یاگ، ضریب شکست به طور مستقیم بر کارایی جمع‌آوری نور و عملکرد کلی آشکارساز تشعشع تأثیر می‌گذارد علاوه بر کارایی جمع‌آوری نور، ضریب شکست کریستال سوسوزن نیز بر وضوح مکانی و ویژگی‌های زمانی آشکارساز تابش تأثیر می‌گذارد. ضریب شکست تعیین می‌کند که با چه دقتی می‌توان موقعیت و زمان رویدادهای سوسوزن را تعیین کرد. این برای تعیین دقیق چشمه تابش یون‌ساز و برای تمایز بین انواع مختلف تابش بسیار مهم است [17].

در این مقاله گزارش طراحی و ساخت یک سیستم اندازه‌گیری ضریب شکست بر مبنای روش انحراف‌سنجی ارائه شده است. به کارگیری روش انحراف‌سنجی برای اندازه‌گیری ضریب شکست نمونه‌های با ضخامت کم در ابعاد میلی‌متر فرآیندی دشوار است که با استفاده از ابزارآلات دستی و چشم غیرمسلح قابل انجام نیست. سیستم ساخته شده در این کار برای اندازه‌گیری نمونه‌های با ضخامت کم طراحی و ساخته شده است. با استفاده از دو نمونه استاندارد از بلورهای کوارتز و یاگ با ضرایب شکست از پیش مشخص، قابلیت سیستم در اندازه‌گیری ضریب شکست و پاشندگی آن به اثبات رسیده است.

مبانی نظری

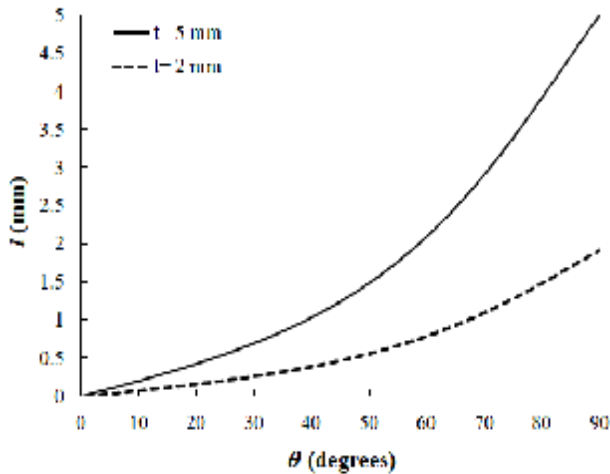
مبانی نظری حاکم بر روش انحراف‌سنجی مبتنی بر اصول اپتیک هندسی است. طبق این اصول، نور تا زمانی که با تغییری در محیط مواجه نشود در خط مستقیم حرکت می‌کند. زمانی که نور از هوا به ماده‌ای شفاف وارد می‌شود، پرتو نور شکسته شده و مسیر حرکت آن طبق قانون اسنل تغییر می‌کند. اگر نور از محیط با ضریب شکست n_1 به محیطی با ضریب شکست n_2 با زاویه برخورد به سطح θ_1 نسبت به خط عمود بر سطح بتابد، زاویه شکست θ_2 را می‌توان با استفاده از قانون اسنل محاسبه کرد [13]:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (1)$$

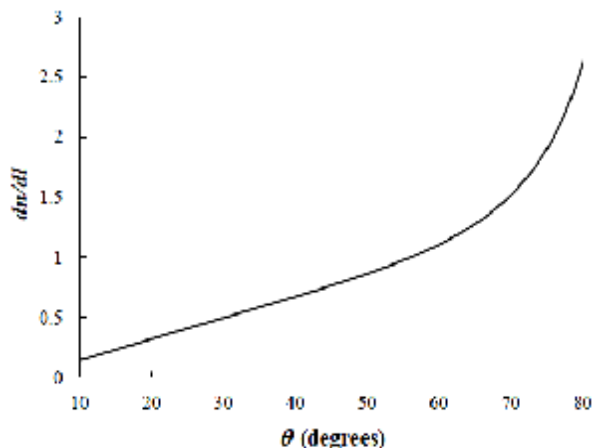
مطابق با این رابطه، چون ضریب شکست از محیطی به محیط دیگر تغییر می‌کند، مسیر پرتو نور فرودی نیز تغییر خواهد کرد. بزرگی ضریب شکست تعیین می‌کند که به چه مقدار نور وارد شده به یک ماده از مسیر اولیه خود منحرف می‌شود.

در انحراف‌سنجی، یک منبع نور مشخص (باریکه لیزر) به

نمونه‌های با ضخامت‌های میلی‌متری بود. با توجه به این نیاز، مقدار l از رابطه (2) بر حسب مقادیر مختلف زاویه برخورد و برای دو مقدار ضخامت t نوعی برابر با 2 و 5 میلی‌متر به دست آمد. نمودارهای مربوط به این دو اندازه ضخامت نمونه در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2. بزرگی میزان جابه‌جایی باریکه تابشی به نمونه پس از خروج از آن در زوایای مختلف و برای دو ضخامت نوعی در ابعاد میلی‌متری با توجه به این شکل و همان‌طور که به صورت شهودی نیز قابل استنباط است، انتخاب زوایای نزدیک به صفر درجه تابش نور به دلیل مقادیر بسیار کوچک جابه‌جایی ایجاد شده منطقی نیست. برای ایجاد جابه‌جایی‌های بزرگی که اندازه‌گیری آن‌ها با ابزارهای تجربی امکان‌پذیر باشد، باید هرچه امکان دارد زوایای تابش بزرگ‌تری را انتخاب کرد. با این وجود باید در نظر داشت که امکان انتخاب زوایای تابشی نزدیک به حالت خراشان 90 درجه نیز به لحاظ ساخت سیستم تجربی چندان ساده نیست. برای مشاهده میزان خطای نسبی روش اندازه‌گیری، در شکل 3 بزرگی خطای نسبی اندازه‌گیری ضریب شکست با استفاده از رابطه (6) به دست آمده و رسم شده است.



شکل 3. بزرگی خطای نسبی اندازه‌گیری به روش انحرافسنجی نوری در زوایای مختلف تابش نور فرودی.

$$n = \sin q \sqrt{1 + \frac{\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \cos^2 q}{\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \sin^2 q - \frac{1}{t^2}}}$$
 (3)

بنابراین با اندازه‌گیری میزان انحراف پرتو به ازای زاویه برخوردی مشخص، می‌توان ضریب شکست را اندازه‌گیری کرد.

تحلیل میزان خطای روش

با توجه به رابطه (3)، بزرگی ضریب شکست به سه متغیر l ، t و θ وابسته است. در روش انحرافسنجی نوری، مقادیر t و θ از پیش مشخص بوده و با اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی l بزرگی ضریب شکست محاسبه می‌شود. در صورت وجود خطا در هر یک از مشخصه‌های معلوم t و θ یا مشخصه اندازه‌گیری شده l ، ضریب شکست به دست آمده خطایی برابر با dn خواهد داشت:

$$dn = \frac{\partial n}{\partial q} dq + \frac{\partial n}{\partial l} dl + \frac{\partial n}{\partial t} dt$$
 (4)

با مشتق‌گیری‌های جزئی از رابطه (3) و بعد از ساده‌سازی‌های ریاضی فراوان می‌توان به رابطه زیر برای dn رسید:

$$dn = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \cos q \sqrt{\cos^2 q + n^2} + \frac{l \sin q - t}{t} \frac{\partial n}{\partial l} dq + \frac{\text{tg} q (n^2 - \sin^2 q)}{\sqrt{\cos^2 q + n^2}} \frac{\partial n}{\partial t} dt - \frac{1}{t^2} \frac{\partial n}{\partial t} dt$$
 (5)

رابطه (5) به طور کلی نحوه تأثیر خطاهای مختلف در اندازه‌گیری ضریب شکست را نشان می‌دهد. به منظور ساده‌سازی، اگر فرض شود که مشخصه‌های معلوم t و θ خطایی ندارند، می‌توان رابطه خطای نسبی را پس از ساده‌سازی به شکل زیر به دست آورد:

$$\frac{dn}{dl} = \frac{\text{tg} q (n^2 - \sin^2 q)}{\sqrt{\cos^2 q + n^2}}$$
 (6)

به وضوح خطای نسبی در صورت وجود خطای اندازه‌گیری در جابه‌جایی l وابسته به انتخاب بزرگی زاویه تابش نور به سطح نمونه است.

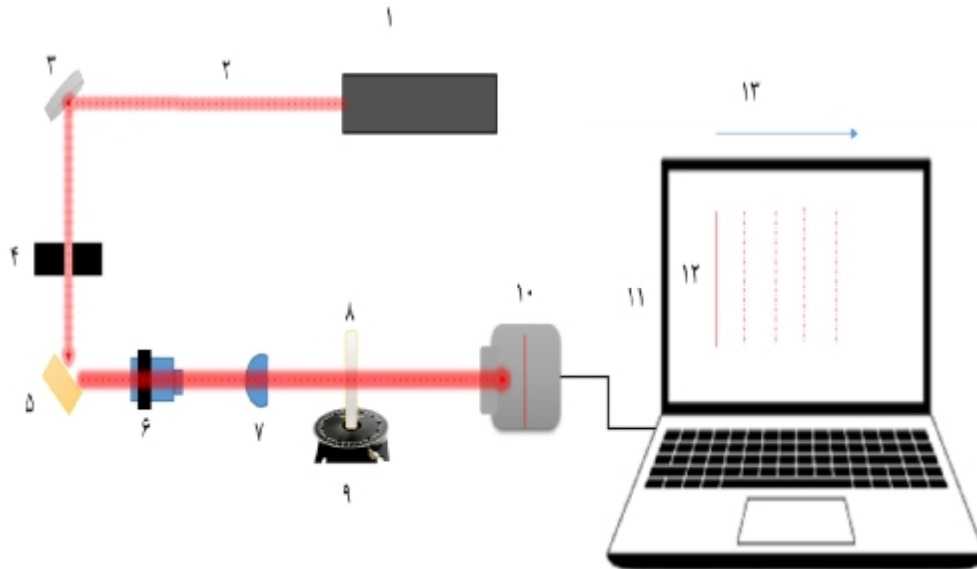
کارهای تجربی

هدف از انجام این کار، طراحی و ساخت سیستم اندازه‌گیری ضریب شکست بر اساس روش انحرافسنجی برای نمونه‌های نازک با ضخامت‌های میلی‌متری بوده است. برای طراحی سیستم، نیاز به دانستن میزان جابه‌جایی قابل اندازه‌گیری l برای

در چیدمان باریکه خروجی یک لیزر ابتدا توسط یک عدد آینه تخت جهت‌دهی شده و پس از عبور از یک روزنه دایروی به سطح یک شکافنده باریکه برخورد می‌کند. شکافنده باریکه باعث کاهش شدت نوری می‌شود که برای اندازه‌گیری در مسیر به سمت دوربین منتشر خواهد شد. کاهش شدت باریکه اندازه‌گیری از اشباع شدن دوربین دیجیتال جلوگیری می‌کند. یک عدد عدسی شیئی 20 برابر کننده برای تمرکز باریکه و یک عدسی استوانه‌ای با فاصله کانونی 2 سانتیمتر برای تبدیل شکل نقطه‌ای باریکه به شکل خطی استفاده شده است. نمونه مورد نظر به همراه نگه دارنده بر روی یک صفحه مدرج گردان ثابت گردیده است. در نهایت دوربین برای اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی خط استفاده شده است. با متصل کردن دوربین به

با توجه به این شکل، انتخاب زوایای تابشی بزرگ‌تر هرچند که جابه‌جایی‌های قابل اندازه‌گیری بزرگ‌تری را تولید کرده و به لحاظ تجربی مطلوب هستند، اما هم‌زمان خطای نسبی اندازه‌گیری را نیز افزایش می‌دهند. با در نظر گرفتن هر دو عامل بزرگ‌ترین میزان جابه‌جایی و کمترین میزان خطا، می‌توان گفت که گزینش زاویه برخوردی حدود 45 درجه بهترین گزینه برای طراحی و ساخت سیستم خواهد بود. در زاویه 45 درجه، مقادیر جابه‌جایی و خطای نسبی به ترتیب کمتر از 0/5 میلی‌متر و 0/8 هستند.

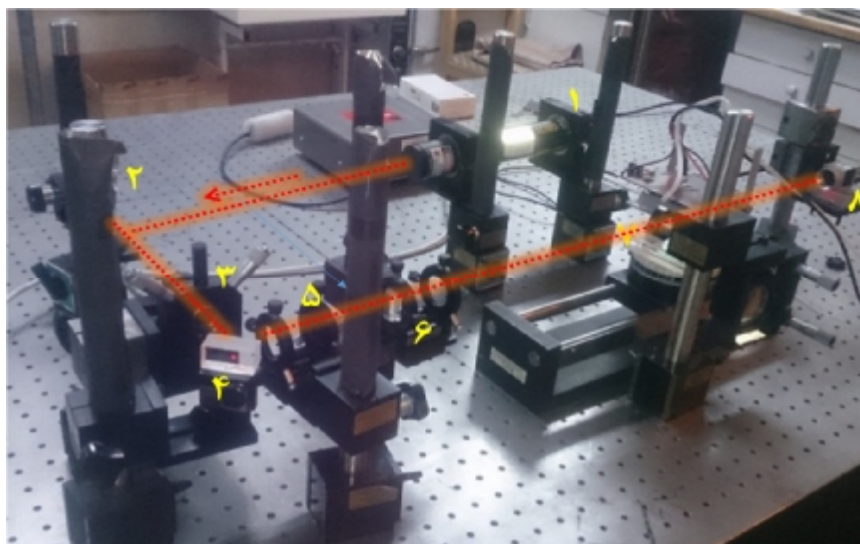
در ساخت تجربی سیستم اندازه‌گیری، باید دقت داشت که اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های نوری زیر یک میلی‌متر بدون



شکل 4. طراحی از انحراف سنج طراحی شده، (1) لیزر، (2) باریکه، (3) آینه، (4) روزنه، (5) شکافنده باریکه، (6) شیئی میکروسکوپ، (7) عدسی استوانه‌ای برای تولید باریکه خطی، (8) نمونه ماده، (9) صفحه مدرج، (10) دوربین، (11) رایانه، (12) تصویر ثبت شده با دوربین، (13) مسیر حرکت خط از نقطه مرجع در اثر انحراف باریکه نوری.

رایانه شخصی و منتقل کردن تصاویر به محیط متلب، الگوریتمی خودکار جهت شناسایی محل خط و تعداد پیکسل‌های جابه‌جا شده خط نوری نوشته شده است. در این کار جابه‌جایی زیاد خط نشان‌دهنده مقدار ضریب شکست بزرگ برای ماده است. شکل 5 تصویری از سیستم انحراف‌سنجی ساخته شده بر اساس طراحی موجود در شکل 4 را نشان می‌دهد.

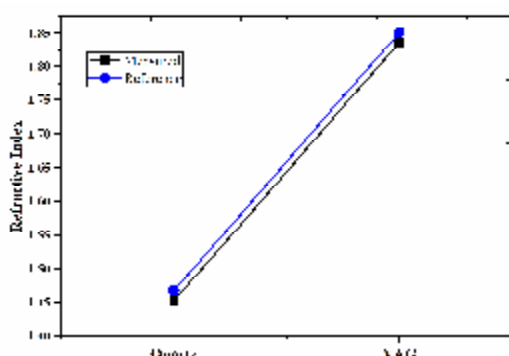
استفاده از تجهیزات الکترونیکی بسیار دشوار است. به همین منظور در این کار برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌هایی در این مقیاس از یک دوربین CMOS سریع و با قدرت تفکیک بالا استفاده شده است. دوربین استفاده‌شده سطح ناحیه حساس به نور مربعی در ابعاد 1×1 سانتیمتر مربع داشته و پیکسل‌های آن از نوع مربعی و با طول ضلع $1/67$ میکرومتر بوده است. طراحی چیدمان تجربی استفاده شده برای اندازه‌گیری ضریب شکست به روش انحراف‌سنجی نوری در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل 5. نمایی از سیستم آزمایشگاهی تجربی استفاده شده برای اندازه‌گیری ضریب شکست.

نتایج

مقدار ضریب شکست اندازه‌گیری شده برای دو بلور با استفاده از لیزر هلیوم-کادمیوم در شکل 6 نشان داده شده است. برای نمونه کوارتز در طول موج لیزر هلیوم-کادمیوم 442 نانومتر ضریب شکست برابر با $1/45$ به دست آمد که این مقدار با مقدار مرجع که $1/47$ گزارش شده است خطایی حدود $1/3$ درصد دارد. مقدار ضریب شکست اندازه‌گیری شده برای نمونه یاق نیز $1/83$ است که با مقدار مرجع خود اختلاف 2 درصدی دارد [18, 19].

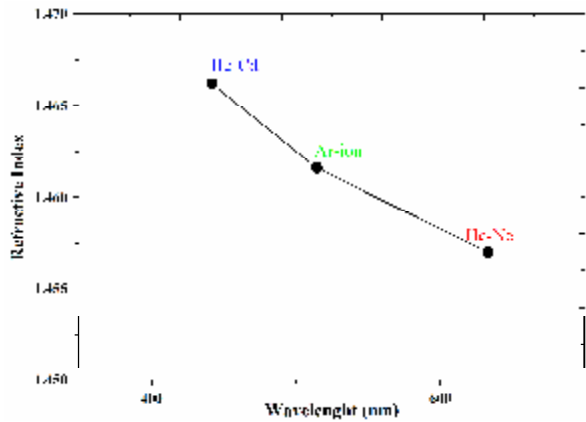


شکل 6. ضریب شکست‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از لیزر هلیوم-کادمیوم در مقایسه با ضریب شکست‌های مرجع

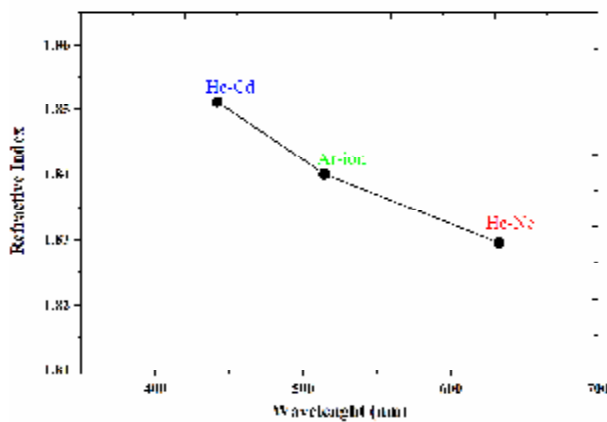
در شکل 7 بزرگی ضریب شکست اندازه‌گیری شده برای دو بلور کوارتز و یاق با استفاده از لیزر یون-آرگون نشان داده شده است. مقادیر ضریب شکست به دست آمده برای این بلورها با مقدار مرجع گزارش شده برای آن‌ها در شکل مقایسه شده است. مقدار ضریب شکست اندازه‌گیری شده با سیستم انحراف‌سنجی طراحی شده برای نمونه کوارتز در طول موج لیزر هلیوم-نئون برابر $1/45$ به دست آمد که این مقدار برای نمونه مرجع $1/46$ گزارش شده

برای شروع اندازه‌گیری، ابتدا با تابش عمود نور به نمونه‌های بلوری، مکان باریکه خطی تولید شده توسط چیدمان بر روی دوربین در تصاویر دریافتی در رایانه مشخص شده است. سپس نمونه توسط صفحه مدرج گردان به مقدار 45 درجه چرخانده شده است. با پیش مسیر حرکت باریکه خطی در تصاویر دریافتی از دوربین دیجیتال، مکان نهایی آن مشخص شده است. با ضرب تعداد پیکسل‌های جابه‌جا شده توسط باریکه خطی در اندازه پیکسل دوربین ($1/67$ میکرومتر) میزان جابه‌جایی باریکه به دست آمده است. برای افزایش دقت اندازه‌گیری، سه نقطه متفاوت در بالا، پایین و میانه باریکه خطی هم‌زمان پایش شده و تعداد پیکسل جابه‌جا شده از طریق میان‌گیری به دست آمده است. فرایند پایش جابه‌جایی خط در تصاویر دیجیتال دریافتی در رایانه با استفاده از الگوریتم نوشته شده در محیط برنامه‌نویسی متلب به صورت خودکار بوده است. با اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی 1 بدین طریق، بزرگی ضریب شکست نمونه‌ها با استفاده از رابطه (3) به دست آمده است. ضخامت t نمونه بلور کوارتز برابر با $2/5$ میلی‌متر و ضخامت نمونه بلور یاق استفاده شده برابر با $7/2$ میلی‌متر بوده است. برای اندازه‌گیری پاشندگی نمونه‌ها، با استفاده از طراحی چیدمان مشابه، از سه لیزر با طول موج‌های در ابتدا، در میانه و در انتهای ناحیه تابش مرئی استفاده شده است. لیزرهای هلیوم-کادمیوم (رنگ آبی، طول موج 442 نانومتر)، یون آرگون (رنگ سبز، طول موج 514/5 نانومتر) و هلیوم-نئون (رنگ قرمز، طول موج 632/8) بدین منظور استفاده شده‌اند.

است. با توجه به این شکل‌ها، ضریب شکست هر دو ماده با افزایش طول موج کاهش پیدا کرده و پاشندگی آن‌ها از نوع طبیعی است.



شکل 9. تغییرات ضریب شکست بر حسب تغییرات طول موج برای ماده کوارتز.

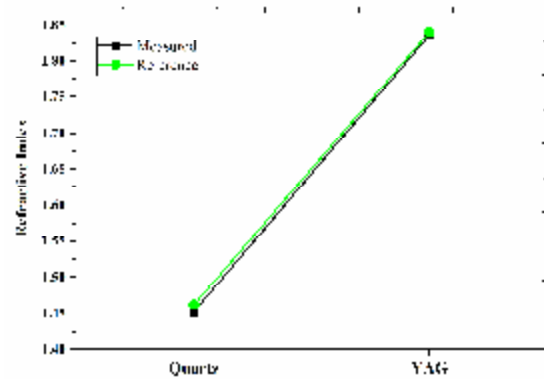


شکل 10. تغییرات ضریب شکست بر حسب تغییرات طول موج برای ماده یاق.

بحث و نتیجه‌گیری

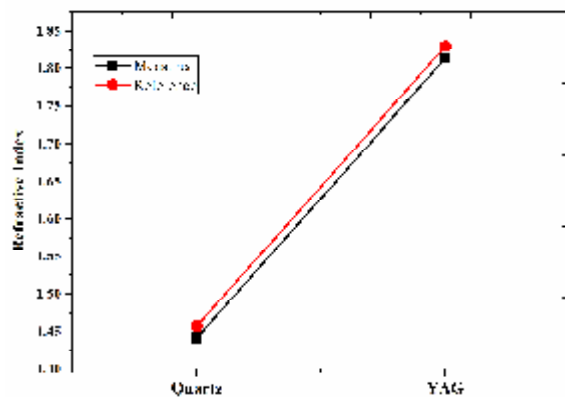
در این مطالعه گزارش طراحی و ساخت یک سیستم اندازه‌گیری ضریب شکست خطی مواد مبتنی بر روش انحراف‌سنجی ارائه شده است. سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت اندازه‌گیری ضریب شکست و پاشندگی آن را برای نمونه‌های با ضخامت کم داشته باشد. با بررسی مقدمات نظری، نشان داده شده است که برای داشتن کم‌ترین خطا در اندازه‌گیری ضریب شکست چنین نمونه‌هایی، باید از ابزارآلات الکترونیکی جهت اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی باریکه لیزر پس از خروج از نمونه نازک استفاده کرد. به منظور بررسی عملکرد سیستم در اندازه‌گیری پاشندگی ضریب شکست مواد، ضریب شکست دو نمونه بلور استاندارد یاق و کوارتز توسط آن بررسی شد. برای این منظور از سه لیزر هلیوم-کادمیوم، یون آرگون و هلیوم-نئون استفاده شده است. از مقایسه نتایج به‌دست آمده با مقادیر

است که خطایی حدود 0/6 درصد دارد.



شکل 7. ضریب شکست‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از لیزر یون آرگون در مقایسه با ضریب شکست‌های مرجع.

مقدار ضریب شکست اندازه‌گیری شده برای نمونه یاق نیز 1/83 است که با مقدار مرجع خود اختلاف 0/5 درصدی دارد. در شکل 8 بزرگی ضریب شکست اندازه‌گیری شده برای دو بلور کوارتز و یاق با استفاده از لیزر هلیوم-نئون نشان داده شده است. مقادیر ضریب شکست به‌دست آمده برای این بلورها با مقدار مرجع گزارش شده برای آن‌ها در شکل مقایسه شده است. مقدار ضریب شکست اندازه‌گیری شده با سیستم انحراف‌سنجی طراحی شده برای نمونه کوارتز در طول موج لیزر هلیوم-نئون برابر 1/44 به دست آمد که این مقدار برای نمونه مرجع 1/45 گزارش شده است که خطایی حدود 0/6 درصد دارد. مقدار ضریب شکست اندازه‌گیری شده برای نمونه یاق نیز 1/81 است که با مقدار مرجع خود اختلاف 0/5 درصدی دارد.



شکل 8. ضریب شکست‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از لیزر هلیوم-نئون در مقایسه با ضریب شکست‌های مرجع.

در شکل‌های 9 و 10، نمودارهای پاشندگی ضریب شکست اندازه‌گیری شده برای بلورهای کوارتز و یاق نشان داده شده

اپتیکی دارند، ابزار طراحی شده می‌تواند قابلیت کاربرد در این موارد را داشته باشد.

ارائه شده در مراجع معتبر، قابلیت مطلوب و قابل قبول سیستم در اندازه‌گیری ضریب شکست مواد به اثبات رسیده است. از آنجایی که نمونه‌های نازک شفاف کاربرد بسیاری در ساخت آینه‌ها، توری‌های پراش، لیزرهای دیسکی و سایر قطعات

References

- [1] Häusler, G., Faber, C., Olesch, E., & Ettl, S. Deflectometry vs. interferometry. In *Optical measurement systems for industrial inspection VIII*, 8788, 367-377, 2013. <https://doi.org/10.1117/12.2020578>
- [2] Waxler, R. M., & Cleek, G. W. The effect of temperature and pressure on the refractive index of some oxide glasses. *Journal of research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and chemistry*, 77, 755, 1973. doi: 10.6028/jres.077A.046
- [3] Khan, R., Gul, B., Khan, S., Nisar, H., & Ahmad, I. Refractive index of biological tissues: Review, measurement techniques, and applications. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 33, 102192, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2021.102192>
- [4] Patel, S., & Tutchenko, L. The refractive index of the human cornea: A review. *Contact Lens and Anterior Eye*, 42, 575-580, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.clae.2019.04.018>
- [5] Rasmussen, S., Krarup, J. A., & Hildebrand, G. Non-contact deflection measurement at high speed. In *Bearing Capacity Of Roads Volume 1*, CRC Press, 53-60, 2022.
- [6] Zhang, X., Qiu, J., Li, X., Zhao, J., & Liu, L. Complex refractive indices measurements of polymers in visible and near-infrared bands. *Applied optics*, 59, 2337-2344, 2020. <https://doi.org/10.1364/AO.383831>
- [7] Meschede, D. *Optics, light and lasers: the practical approach to modern aspects of photonics and laser physics*. John Wiley & Sons, 2017.
- [8] Young, T. *A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts: in two volumes (Vol. 2)*. Johnson, 1807.
- [9] Gettemy, D. J., Harker, W. C., Lindholm, G., & Barnes, N. P. Some optical properties of KTP, LiIO/sub 3/, and LiNbO/sub 3/. *IEEE journal of quantum electronics*, 24, 2231-2237, 1988. <https://doi.org/10.1109/3.8565>
- [10] Onodera, H., Awai, I., & Ikenoue, J. I. Refractive-index measurement of bulk materials: prism coupling method. *Applied optics*, 22, 1194-1197, 1983. <https://doi.org/10.1364/AO.22.001194>
- [11] G. Meeten, Refractive index errors in the critical-angle and the Brewster-angle methods applied to absorbing and heterogeneous materials, *Measurement Science and Technology*, 8, 728, 1997. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/7/006>
- [12] R.S. Shankland, Michelson-morley experiment, *American Journal of Physics*, 32, 16-35, 1964. <https://doi.org/10.1119/1.1970063>
- [13] G.D. Gillen, S. Guha, Use of Michelson and Fabry-Perot interferometry for independent determination of the refractive index and physical thickness of wafers, *Applied optics*, 44, 344-347, 2005. <https://doi.org/10.1364/AO.44.000344>
- [14] A.M. Beigzadeh, M.R. Rashidian Vaziri, F. Ziaie, S. Sharif, A new optical method for online monitoring of the light dose and dose profile in photodynamic therapy, *Lasers in Surgery and Medicine*, 52, 659-670, 2020. <https://doi.org/10.1002/lsm.23193>
- [14] Singh, Shyam. "Refractive index measurement and its applications." *Physica Scripta* 65, no. 2 (2002): 167.
- [15] R. R., E. M. Gulamova, E. V. Gasanov, Sazonova, and R. Alimov. The employment of quartz glasses for dosimetry of ionizing radiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 95, no. 1 (1995): 70-74.
- [16] M. Moszyński, T. Ludziejewski, D. Wolski, W. Klamra, and L. O. Norlin. Properties of the YAG: Ce scintillator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 345, no. 3 (1994): 461-467.
- [17] D.E. Zelmon, D.L. Small, R. Page, Refractive-index meas Meeten, G. H. Refractive index errors in the critical-angle and the Brewster-angle methods applied to absorbing and heterogeneous materials. *Measurement Science and Technology, Applied optics*, 37, 4933-4935, 1998. <https://doi.org/10.1364/AO.37.004933>
- [18] Malitson, I. H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica. *Josa*, 55(10), 1205-1209, 1965. <https://doi.org/10.1364/JOSA.55.001205>