

طراحی فیلتر بلور نوری $[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]$ برای عینک ایمنی کار با لیزرهای با

طول موج ۳۵۰ نانومتر

سامان محمودی و مهرداد مرادی*

پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

*اصفهان، کاشان، دانشگاه کاشان، پژوهشکده علوم و فناوری نانو کدپستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳

پست الکترونیکی: m.moradi@kashanu.ac.ir

چکیده

در این مقاله از جفت‌لایه $[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]$ به منظور طراحی یک فیلتر بلور نوری یک بعدی برای کاربرد در عینک‌های ایمنی کار با لیزرهای طول موج ۳۵۰ نانومتر استفاده شده است. لیزرهای پرتوان با طول موج پایین از جمله لیزرهای با طول موج ۳۵۰ نانومتر دارای انرژی بسیار بالا بوده که می‌توانند باعث آسیب جدی به چشم کاربر شوند. در این مقاله با استفاده از روش ماتریسی و محاسبات نظری در نرم افزار MATLAB بلور نوری متشکل از جفت لایه‌های $[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]$ طراحی شده است. نتایج نشان داد که در ساختار $\text{Glass}/[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]^8$ میزان عبور نور از عینک در ناحیه ۳۵۰ نانومتر به ۰/۰۳۸ کاهش خواهد یافت که نشان‌دهنده ایمنی بسیار بالا و مطلوب در صورت استفاده از آن برای کار با این لیزرها است.

کلیدواژگان: بلور نوری، لیزر پرتوان، ایمنی پرتو لیزر، فیلتر نوری، روش ماتریس‌های انتقال.

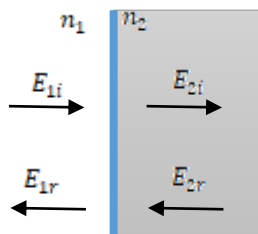
۱. مقدمه

در تمامی زمینه‌ها ایمنی کار نقش بسزایی داشته و از اولین اولویت‌ها محسوب می‌شود. کارهای تحقیقاتی و صنعتی نیز از این مقوله مستثنا نمی‌باشند. لیزرها با توجه به تمرکز بالای نور و شدت بالا نیازمند تدوین و رعایت اصول ایمنی خاص خود می‌باشند. محافظت از چشم یکی از شاخصه‌های مهم در زمینه ایمنی لیزر محسوب می‌شود. این امکان وجود دارد که در حین کار نور لیزر در شبکه چشم متمرکز گردیده و در عرض چند ثانیه منجر به سوختگی موضعی و آسیب‌های دائمی شود. در اینجا فقط پرتو مستقیم لیزر نیست که برای سلامتی کاربر مخاطره‌آمیز است بلکه باتوجه به تمرکز پرتوی آن حتی پرتوهای منعکس شده و پرتوهای پراکنده‌ی لیزر نیز می‌توانند خطرناک باشند. در این میان لیزرهای پرتوان با طول موج پایین در مرتبه بالاتری از مخاطره‌آمیز بودن قرار داشته و رعایت اصول ایمنی برای کار با آن‌ها ضروری‌تر می‌نماید زیرا که لیزر

در این مقاله فیلتر نوری $\text{Glass}/[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]^8$ به منظور استفاده در عینک‌های ایمنی کار با لیزر طول موج ۳۵۰ نانومتر طراحی شده است. در اینجا شیشه به عنوان بستر و پایه عینک در نظر گرفته شده، همچنین از دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2) و دی‌اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) که مواد دی‌الکتریک با ضریب جذب صفر می‌باشند به عنوان دی‌الکتریک‌های با ضریب شکست بالا و پایین استفاده شده است.

۲. مبانی نظری

بررسی ساختارهای تناوبی و در کل بلورهای نوری با استفاده از معادلات ماکسول صورت می‌گیرد [۳]. در حالت کلی پرتو نور به صورت باریکه موج الکترومغناطیسی $\vec{E}(r) = E_0 e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r} - \omega t)}$ در نظر گرفته می‌شود که برای ساختاری همانند شکل ۱ معادلات موج الکتریکی فرودی، بازتابیده و عبوری از ساختار به صورت معادلات ۱ خواهد بود.



شکل (۱): موج الکترومغناطیسی در مرز دو لایه با

ضرایب شکست n_1 و n_2

با توجه به شکل یک و شرایط مرزی ماکسول خواهیم داشت:

$$E_{1i} - E_{1r} = E_{2i} - E_{2r} \quad (1)$$

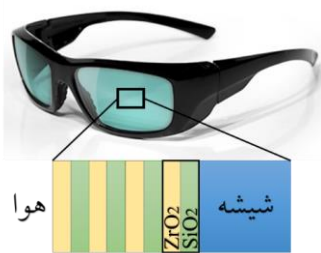
$$k_1(E_{1i} + E_{1r}) = k_2(E_{2i} + E_{2r}) \quad (2)$$

که در آن k_i بردار موج لایه i می‌باشد. با توجه به روابط بالا می‌توان ماتریس‌های مرزی انتقال را تشکیل داد که به شکل زیر هستند:

با این طول موج دارای انرژی بسیار زیادی است که با در نظر گرفتن متمرکز بودن آن خطر آن را به مراتب بالاتر می‌رود. در این راستا استفاده از عینک‌های فیلترکننده می‌تواند به حفاظت از کاربر کمک کند. انواع مختلف عینک‌های محافظ چشم برای شرایط مختلف ساخته شده است. برای توان‌های اپتیکی متوسط، عینک‌های نوری با فیلتر پلاستیکی استفاده می‌شود که این نوع عینک‌ها، به عنوان مثال از یک نوع پلی‌کربنات رنگی یا یک لایه جذبی یا بازتابی ساخته شده‌اند. برای توان‌های بالاتر از شیشه‌های واقعی استفاده می‌شود.

شیشه در برابر نور لیزر و همچنین در برابر خراشیدگی مقاومت بهتری دارد ولی در برابر شوک‌های مکانیکی بسیار ضعیف است. نوع دیگری از این عینک‌ها ممکن است از روکش‌های دی‌الکتریک چند لایه [۱] یا بلورهای نوری ساخته شده باشد [۲] تا مثل آینه‌های براگ در برابر طول‌موج‌های مستقیم عمل کند. این آینه‌ها علاوه بر آن که می‌توانند به عنوان آینه کامل عمل کنند همچنین با ایجاد نقص در ساختارشان می‌توانند یک طول‌موج خاص را از بلور عبور بدهند، به‌علاوه این بلورها در برابر آسیب‌هایی که قبلاً ذکر شد مقاومت بیشتری دارند.

بلورهای نوری به ساختارهای چندلایه‌ای گفته می‌شود که در آن‌ها یک جفت لایه دی‌الکتریک با ضریب شکست متفاوت (بزرگ و کوچک) تکرار می‌شود که با توجه به ابعاد این تناوب، بلورهای نوری به سه شاخه یک، دو و سه بعدی تقسیم می‌شوند. تناوب در ضریب شکست‌ها باعث به وجود آمدن نوار ممنوعه‌ای می‌شود که مانعی برای انتشار فوتون در ساختار می‌شود از این خاصیت به منظور فیلتر کردن نور استفاده می‌شود. با کنترل نوع لایه‌ها، ضخامت آنها، تعداد تکرار تناوب و ایجاد نقص در ساختار می‌توان خواص اپتیکی ساختار و مشخصات فیلتر مورد نظر را با توجه به کاربرد آن مهندسی و کنترل کرد.



شکل (۲): نمای طرحوار ساختار فیلتر بلور نوری
 .Glass/[SiO2/ZrO2]ⁿ/Air

نمای طرحوار فیلتر بلور نوری طراحی شده در شکل (۲) نمایش داده شده است. برای انجام محاسبات، ضرایب شکست دی اکسید سیلیکون و دی اکسید زیرکونیوم از منابع [۵، ۶] استخراج شده و زاویه تابش به صورت عمود در نظر گرفته شده است.

با توجه به اینکه این بلور برای لیزرهای با طول موج ۳۵۰ نانومتر طراحی می شود طول موج کاری (λ_w) نیز در محدوده ۳۵۰ نانومتر در نظر گرفته شده و ضخامت لایه های بلور نوری با توجه به این محدوده طول موجی به صورت $L = \frac{\lambda_w}{4n}$ مورد محاسبه قرار می گیرد. به منظور بررسی طول موج کاری ساختار با طول موج های کاری متفاوت ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ نانومتر شبیه سازی انجام شده و شدت عبور نور از ساختار با شش جفت لایه [SiO₂/ZrO₂] محاسبه شده و نتایج در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانگونه انتظار می رفت بهترین حالت برای طول موج کاری ۳۵۰ به دست آمده است و در این حالت است که کمینه عبور به صورت کامل در اطراف ناحیه طول موجی ۳۵۰ نانومتر قرار گرفته است و در بقیه نواحی طیف نوری عبور نور خیلی کاهش پیدا نکرده و ساختار در محدوده مورد نظر فیلتر را انجام داده و بقیه طول موج ها را عبور می دهد. به این ترتیب طول موج کاری برابر ۳۵۰ نانومتر در نظر گرفته می شود.

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{li} \\ E_{lr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{2i} \\ E_{2r} \end{bmatrix} \quad (3)$$

همچنین برای انتشار پرتو نور در لایه، ماتریس انتشار به صورت زیر تعریف می شود.

$$D_i = \begin{bmatrix} e^{-ik_i L_i} & 0 \\ 0 & e^{+ik_i L_i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

در اینجا L مسافتی است که نور درون لایه طی کرده است. در ساختارهای متناوب با تعداد بیشتر لایه ها، معادلات بالا به شکل زیر بیان می شوند:

$$\begin{bmatrix} E_{li} \\ E_{lr} \end{bmatrix} = A_0^{-1} [A_1 D_1 A_1^{-1} A_2 D_2 A_2^{-1}]^N A_S \begin{bmatrix} E_{2i} \\ E_{2r} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} E_{li} \\ E_{lr} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_{2i} \\ E_{2r} \end{bmatrix} \quad (6)$$

در اینجا ماتریس M ماتریس کلی تعریف کننده ساختار می باشد.

با استفاده از این ماتریس می توان ضرایب فرنل و متعاقبا بازتاب و عبور نور از ساختار را به شکل زیر محاسبه نمود [۴].

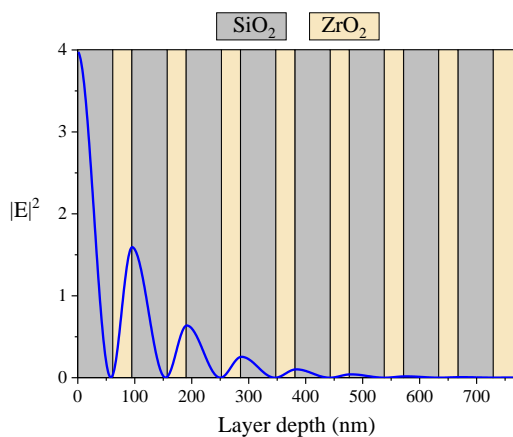
$$r = M(2,1) / M(1,1), \quad (7)$$

$$t = 1 / M(1,1) \quad (8)$$

۳. محاسبات و شبیه سازی

همانگونه که پیشتر اشاره شد در این مقاله بلور نوری به صورتی طراحی شده که شیشه نقش زیرلایه را بازی می کند، همچنین دی اکسید زیرکونیوم (ZrO₂) و دی اکسید سیلیکون (SiO₂) به ترتیب به عنوان لایه ها با ضرایب شکست بالا و پایین انتخاب شدند.

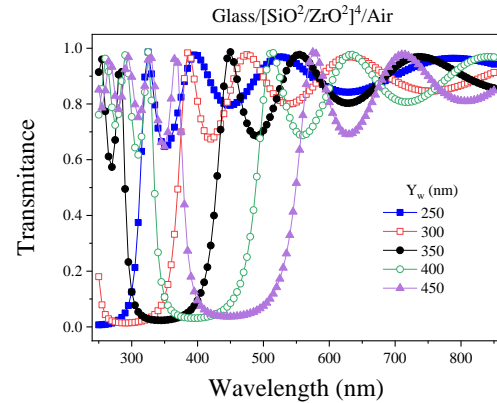
لایه $[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]$ رفتار فیلتری بلور به وضعیت قابل قبولی می‌رسد به نحوی که چگالی نوری (OD) که نشان‌دهنده میزان کاهش شدت نور و سنجه ایمنی عینک بوده برابر $2/3$ می‌باشد. در حالت ۱۰ جفت لایه به بهینه خود یعنی $3/06$ می‌رسد که نسبتاً مقدار مطلوبی می‌باشد اما هنوز به اندازه ۲ واحد از حد استاندارد کمتر است. اما در عمل سادگی و هزینه نیز باید مد نظر گرفته شود از این رو می‌توان ساختار با هشت جفت لایه $[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]$ به عنوان ساختار مرجع و نهایی مد نظر قرار گرفته شود. در این ساختار در طول موج 350 نانومتر عبور نور به $0/038$ کاهش پیدا کرده که بسیار مطلوب و رضایت بخش می‌باشد. مطالعه شدت میدان الکتریکی و تابع توزیع شدت میدان الکتریکی در ساختار می‌تواند مفید بوده و درک بهتری از ساختار به ما ارائه بدهد. در این راستا الگوی توزیع شدت میدان الکتریکی در عمق لایه‌های ساختار $\text{Glass}/[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]^8/\text{Air}$ برای طول موج 350 نانومتر مورد بررسی قرار گرفته، محاسبه شده و در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل (۵): توزیع شدت میدان الکتریکی در فیلتر بلور نوری

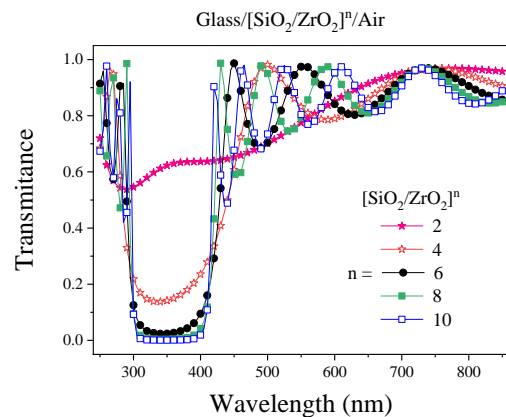
$\text{Glass}/[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]^8/\text{Air}$

با دقت در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با توجه به نتایج توزیع شدت میدان در ساختار برای طول موج 350 نانومتر، عملکرد فیلتر بلور نوری بار دیگر تایید می‌شود. منحنی توزیع



شکل (۳): شدت نور عبوری از ساختار $\text{Glass}/[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]^6/\text{Air}$ برای طول موج‌های کاری 250 ، 300 ، 350 ، 400 و 450 نانومتر.

پس از تعیین طول موج کاری، ضخامت لایه‌ها به ترتیب 59 و 37 نانومتر برای دی‌اکسید سیلیکون و دی‌اکسید زیرکونیوم به دست آمده است. حال با محاسبات بیشتر می‌توان تعداد جفت لایه‌های لازم برای به دست آمدن بهینه شرایط و کمینه عبور نور از ساختار را محاسبه کرد. در این راستا شدت نور عبوری از ساختار برای تعداد 2 ، 4 ، 6 ، 8 و 10 جفت لایه $[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]$ محاسبه شد و نتایج در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل (۴): راستا شدت نور عبوری از ساختار برای تعداد 2 ، 4 ، 6 ، 8 و

10 جفت لایه $[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]$.

با دقت در شکل دو مشاهده می‌شود که برای تعداد 2 جفت لایه اثر فیلتری در بلور مشاهده نمی‌شود، برای تعداد 4 جفت لایه اثر فیلتری در ناحیه 350 ظاهر می‌شود اما این اثر بهینه نبوده و قسمتی از نور عبور می‌کند. در حالت 8 جفت

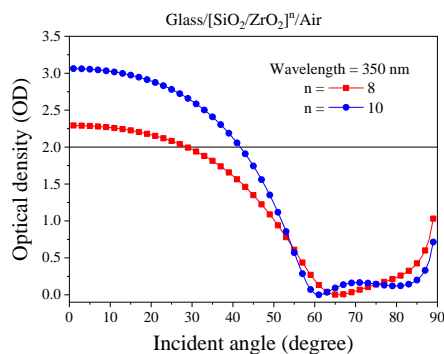
همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می شود ساختار طراحی شده برای حالتی با ۸ جفت لایه می تواند تا زاویه فرودی ۲۹ درجه ایمنی مورد نظر را تامین کند. با افزایش تعداد جفت لایه ها به ۱۰ عدد علاوه بر اینکه OD افزایش می یابد بلکه محدوده زاویه تابشی ایمن نیز بزرگ تر شده تا ۴۲ درجه زاویه تابش لیزر ایمنی را تامین می کند.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله فیلتر نوری بر پایه بلور نوری شامل ۸ جفت لایه $[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]$ با ضخامت ۵۹ نانومتر دی اکسید سیلیکون و ۳۷ نانومتر دی اکسید زیرکونیوم طراحی و مورد بررسی قرار گرفته شده است.

پارامترهای مختلف فیلتر نوری بررسی و مطالعه شده برای طول موج کاری ۳۵۰ نانومتر لیزرهای پراورزی یک فیلتر با کارایی بالا و میزان عبور نور ۰/۰۳۸ طراحی شد. همچنین چگالی نوری در زوایای فرودی مختلف نیز مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که در زوایای بین صفر تا ۲۵ درجه مقدار OD بیشتر از ۲ خواهد بود که نسبتاً مطلوب است.

شدت میدان نشان می دهد که در نهایت در عمق لایه و نزدیکی شیشه، میدان الکتریکی پرتو لیزر به صفر میل کرده و پرتو به کلی فیلتر می شود و موج پراورزی به چشم کاربر نرسیده و ایمنی او تضمین می گردد. تمامی محاسبات و شبیه سازی های پیشین برای حالتی انجام شده بودند که تابش فرودی به صورت عمود بر سطح عینک تابیده شود. اما در عمل این گونه نیست و در عمل نور با زاویه های مختلف بر سطح عینک تابیده می شود. به همین منظور شبیه سازی ها در زوایای تابشی مختلف انجام شده و ایمنی عینک و فیلتر طراحی شده در حالت نزدیک تر به واقعیت بررسی شده و نتایج آن در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶: چگالی نوری در زوایای فرودی مختلف برای طول موج ۳۵۰ نانومتر و هشت جفت لایه $[\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2]$.

۵. مراجع

- [1] K. Ahmed, A. N. Khan, A. Rauf, A. Gul, M. Aslam, Design and development of laser eye protection filter, *Journal of Physics: Conference Series*, 439, conference 1.
- [2] M. Chena, C. Lia, M. Xub, W. Wangb, S. Mab, Y. Xia, Eye-protection glasses against YAG laser injury based on the band gap reflection of one-dimensional photonic crystal, *Optics & Laser Technology*. 39 (2007) 214–218.
- [3] T. Pan, C. Tang, L. Gao, Z. Li, Optical bistability of nonlinear multilayered structure containing left-handed materials, *Phys. Lett. A*. 337 (2005) 473-479.
- [4] S. Mahmoodi, M. Moradi, S. M. Mohseni, Optimization of Magneto-Optical Kerr Effect in Cu/Fe/Cu Nano-structure, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 29 (2016) 1517–1523.
- [5] I. H. Malitson, Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica, *Journal of the Optical Society of America*. 55 (10) (1965) 1205-1208.
- [6] [https://www.filmetrics.com/refractive-index-database/ZrO₂/Zirconium-Dioxide](https://www.filmetrics.com/refractive-index-database/ZrO2/Zirconium-Dioxide).