بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی پالایه شکاف با یک باند بازتاب به روش لایه‌های مجزا در گستره دیدگانی

محمدمهدی حمزه نژاد[۱]، مرتضی حاجی محمودزاده[۱و۲]، حمیدرضا فلاح[۱و۲] و حسین زابلیان[۱]

[۱]گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

[۲]گروه پژوهشی اپتیک کوانتومی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده – در این مقاله، طراحی ساختارها به وسیله روش کلاسیک لایه‌های مجزا انجام شده است. ساختار کلاسیک با تکرار تناوبی دولایه با ضرایب شکست بالا و پایین ایجاد می‌شود. به منظور کاهش پهنای شکاف پالایه، در ساختار بجای استفاده از دو ماده متفاوت از یک ماده با دو چگالی درهم پکیدگی متفاوت استفاده شده است. درنهایت، افت و خیزهای باند عبور با استفاده از بهینه سازی بیرونی-ترین لایه‌ها و اضافه نمودن لایه جفت کننده کاهش می‌یابد. این لایه، روی اولین لایه پس از محیط فرود قرار گرفته است.

کلید واژه- پالاینده شکاف، تمام نگاری ، چگالی درهم پکیدگی ، لایه‌های مجزا، موجدار

Design of notch filter with a reflection-band by discrete layers method in visible region

M. M. Hamzenejad[۱], M. Haji Mahmoodzadeh[۱,۲], H. R. Fallah[۱,۲] and H. Zabolian[۱]

[۱]Department of physics, University of Isfahan, Isfahan

[۲]Quantum optics research group, University of Isfahan, Isfahan

Abstract- In this paper, the design of structures was done by using of classical discrete layers method. Classical structure was made by periods of two layers with high and low refractive index. In order to decreasing notch width of filter, one material with two different packing density was used in structure instead of two different materials. Finally, sidelobes of transmittance band were decreased by optimization of outer most layers and inserting a match layer. This layer is placed on the first layer after incident medium.

Keywords: Notch filter, Holography, Packing density, Discrete-layers, Rugate

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

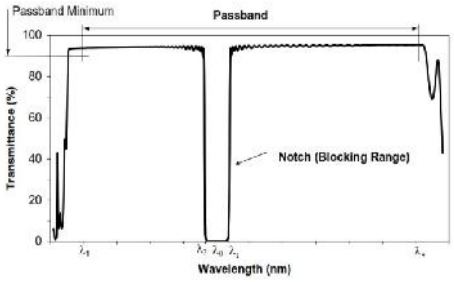
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

پالایه‌های شکاف[۱] به ابزارهای اپتیکی گویند که یک گستره محدود طول موجی را بازتاب کرده و نواحی اطراف باند بازتاب را عبور می‌دهند. این پالایه‌ها به دلیل بهبود عملکرد سامانه‌های نوری، قادرند در زمینه‌های مختلف اپتیکی جایگزین سایر مؤلفه‌های نوری (آینه‌ها، صافی‌ها، پالایه‌ها و...) شوند. این نوع از پالایه‌ها دارای کاربردهای مهمی ازجمله حفاظت از قطعات نوری در برابر پرتوهای پرتوان مانند پرتوی لیزرهای مختلف، افزایش دقت اندازه‌گیری در چیدمان‌های آزمایشگاهی مانند طیف سنجی رامان و ادوات نجومی مانند انواع تلسکوپ‌ها هستند. پالایه‌های شکاف معمولا به سه روش کلاسیک (لایه‌های مجزا[۲])، موجدار[۳] و تمام نگاری[۴] ساخته می‌شوند که دو روش اول از روش‌های لایه نازک محسوب می‌شوند. در بین این روش‌ها روش کلاسیک به دلیل تعداد لایه‌ی کمتری که در آن نسبت به روش موجدار استفاده می‌شود از صرفه اقتصادی بهتری برخوردار است. همچنین ساختار کلاسیک ساخته شده دارای مقاومت بهتری نسبت به ساختار تمام نگاری می‌باشد. بنابراین با توجه به این دلایل در این مقاله طراحی یک نمونه پالاینده شکاف به روش کلاسیک آورده شده است.

۲- نظریه‌ی پالایه شکاف

با توجه به شکل طیف این نوع از پالایه‌های تداخلی اصطلاح «پالایه شکاف» به آن‌ها اطلاق می‌شود. به‌طورایده آل، بر اساس شکل ۱ میزان عبور طیف این پالایه باید از طول‌موج λ_1 تا λ_2 و از λ_3 تا λ_4 بیش از ۹۰٪ باشد، و همچنین در گستره λ_2 تا λ_3 پالایه باید دارای میزان بازتاب ۱۰۰٪ باشد[۱-۴].



شکل ۱ میزان نور عبوری در محدوده طیفی یک پالایه تداخلی تک شکاف[۳].

پالایه‌های نوری تداخلی به‌طور معمول با انباشت لایه‌های مجزا که از مواد با ضریب شکست بالا و پایین تشکیل‌شده‌اند، ساخته می‌شوند. در این مجموعه معمولا لایه‌ها به‌صورت تناوبی روی هم قرار می‌گیرند. برای این روش طراحی‌های مختلفی وجود دارد که به‌طور معمول از طراحی به‌صورت $(HL)^s$[۶] استفاده می‌شود، که در آن H و L به ترتیب نشان‌دهنده لایه‌های چارک موج با ضریب شکست بالا و پایین می‌باشند، و s تعداد جفت لایه‌های موجود در طراحی را نمایش می‌دهد[۵, ۶]. یکی از مسائل مهمی که در پالایه‌های شکاف مورد بررسی قرار می‌گیرد پهنای باند بازتاب یا به عبارتی همان پهنای شکاف[۵](NW) است. در روش لایه‌های مجزای پالایه شکاف، میزان پهنای شکاف به مقدار اختلاف ضرایب شکست دو ماده با ضرایب شکست بالا و پایین یا به نسبت بین آن‌ها بستگی دارد. بنابراین پهنای شکاف یک کمیت نسبی است که برای انبوهه‌ی چارک موج متناوب توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود[۳, ۹] :

$$NW = \frac{4}{\pi} Sin^{-1}\left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L}\right) \qquad (۱)$$

مورد دیگری که در بحث پالایه‌های شکاف مطرح می‌شود و دارای اهمیت است، میزان بیشینه بازتاب در باند بازتاب

---

۱ Notch Filters
۲ Discrete layers
۳ Rugate
۴ Holography
۵ Notch Width

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

جدول ۱ مقادیر محاسبه شده توسط روابط (۱) و (۲) و طراحی شده برای سه ساختار مختلف [۱۴] $(Y_2O_3-Y_2O_{3-x})$، [۳۴] $(Y_2O_3-Y_2O_{3-x})$ و $(Y_2O_3-SiO_2)$ [۱۴]

	ماده	چگالی در هم پکیدگی	ضریب شکست	S	بیشینه بازتاب محاسبه شده	پهنای شکاف محاسبه شده	بیشینه بازتاب طراحی شده	پهنای شکاف طراحی شده
ساختار اول	SiO_2	۱	۱,۴۶	۱۴	۹۹,۳	۱۲,۹۵	۹۹,۱۲	۱۵,۹۷
	Y_2O_3	۱	۱,۷۹					
ساختار دوم	Y_2O_3	۰,۹۵	۱,۷۵	۱۴	۷۶,۱	۴,۵۲	۶۹	۸,۴۵
	Y_2O_{3-x}	۰,۸۰	۱,۶۳					
ساختار سوم	Y_2O_3	۰,۹۵	۱,۷۵	۳۴	۹۸,۴	۴,۵۲	۹۷,۷۳	۵,۸۲
	Y_2O_{3-x}	۰,۸۰	۱,۶۳					

است که می‌توان آن را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد[۷]:

$$R_{\max} = \left(\frac{1 - \frac{n_H^{2s+2}}{\left(n_L^{2s} n_{sub}\right)}}{1 + \frac{n_H^{2s+2}}{\left(n_L^{2s} n_{sub}\right)}} \right)^2 \qquad (۲)$$

۳- انتخاب مواد

با توجه به مطالب بالا انتخاب مواد استفاده شده در ساختار از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین چون گستره عملکرد پالایه در اینجا در گستره مرئی می‌باشد پهنای شکاف باید از درصد کمی برخوردار باشد. معمولا اختلاف ضرایب شکست مواد در دسترس بسیار بالا می‌باشد و در نتیجه پهنای باند بازتاب (پهنای شکاف) نسبت به طول موج مرکز باند بازتاب از اندازه بالایی برخوردار است. در اینجا ابتدا ماده یتریوم دی اکسید(Y_2O_3) را به عنوان ماده ضریب شکست بالا و سیسلکون دی اکسید(SiO_2) را به عنوان ضریب شکست پایین انتخاب نمودیم و با استفاده از روابط (۱) و (۲) مقادیر پهنای شکاف و بیشینه بازتاب را برای طول موج مرکزی ۵۳۲ نانومتر محاسبه کردیم. مقدار بیشینه بازتاب برحسب درصد و مقدار پهنای شکاف برحسب درصدی از طول موج مرکزی بدست آمده است. با محاسبه مقادیر، مشاهده می‌شود میزان پهنای باند بازتاب حدود ۱۳درصد از طول موج مرکزی را شامل می‌شود، این مقدار برابر ۶۹ نانومتر است که برای یک پالایه شکاف در گستره مرئی مناسب نمی‌باشد. برای رفع این مشکل می‌توان از یک ماده استفاده کرد، به این صورت که با استفاده از تغییر چگالی درهم‌پکیدگی[۱] (P) لایه، ضریب شکست (n) آن را تغییر داد. در اینجا ماده یتریوم دی اکسید را به عنوان ماده مصرفی انتخاب کردیم. محاسبات لازم را برای دوساختار چندلایه‌ای که از دو لایه با ماده یکسان و چگالی متفاوت تشکیل شده‌اند انجام دادیم. مقادیر بدست آمده از محاسبه در جدول ۱ آمده است.

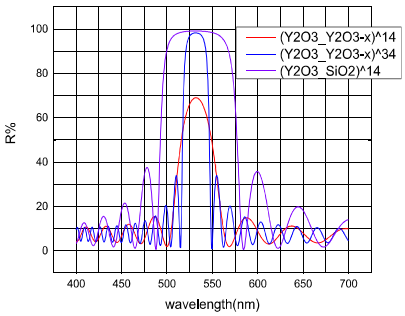
۴- طراحی ساختار پالایه شکاف

به منظور بررسی تاثیر انتخاب یک ماده به عنوان ماده مصرفی و همچنین تاثیر اختلاف ضریب شکست و تعداد لایه‌ها بر ساختار طیفی پالایه، ۳ ساختار موجود در جدول ۱را با کمک نرم افزار طراحی لایه‌های نازک شبیه سازی کردیم. در اینجا ما از نرم افزار پیشرفته طراحی لایه‌های نازک مکلئود استفاده نمودیم که شامل تمامی موارد اساسی برای طراحی و محاسبه عملکرد پوشش‌های نوری می‌باشد. این نرم افزار همچنین شامل بخش‌هایی به منظور بهینه‌سازی عملکرد ساختار طراحی شده می‌باشد. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود ساختار اول که از دو ماده تشکیل شده است به دلیل اختلاف ضریب شکست بیشتر دارای شکافی با پهنای بیشتر نسبت به ساختار دوم می‌باشد، اما از طرفی ساختار دوم با تعداد لایه برابر با ساختار اول از بیشینه بازتاب کمتری در باند

[۱] Packing Density

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

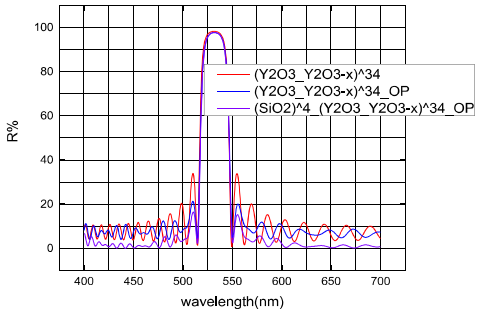
بازتاب برخوردار است. با افزایش تعداد جفت لایه‌ها در ساختار سوم مشاهده می‌شود که یک باند بازتاب با پهنای شکاف کمتر و بیشینه بازتاب بیشتری نسبت به ساختار دوم و تقریبا برابر با ساختار اول ایجاد می‌شود. همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود در ساختار اول و سوم مقادیر طراحی تناسب خوبی با مقادیر محاسبه شده دارند. اما در ساختار دوم اختلاف طراحی و محاسبه کمی زیاد می‌باشد که این به دلیل تعداد لایه کمتر و در نتیجه شیب زیاد بین باند عبور و بازتاب است.



شکل ۲ نمودار سه ساختار مختلفی که در جدول ۱ آورده شده است.

همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود باند عبور پالایه به دلیل وجود موجک‌های متعدد از عملکرد خوبی برخوردار نیست. این موجک‌ها که در واقع هماهنگ‌های مرتبه بالاتر باند بازتاب می‌باشند نتیجه ذاتی عملکرد نوری پالایه‌های شکاف است و شاید بتوان علت آن را در عدم تطابق ضریب شکست معادل انبوهه‌ی موردنظر با ضریب شکست محیط پیرامون آن (محیط فرود و بستره) جستجو کرد.

برای رفع این مشکل با استفاده از روش‌های بهینه سازی عددی و با کمک نرم افزار طراحی ضخامت لایه‌های بیرونی را تغییر دادیم و مقداری از این افت را جبران کردیم. اما مشاهده می‌شود که در برخی از طول موج‌ها هنوز عبور به مقدار مناسب نرسیده است. به منظور کاهش افت در این طول موج‌ها یک لایه با ضریب شکست مناسب را بین محیط فرود و اولین لایه قرار می‌دهیم. این لایه دارای ضریب شکست بین ضرایب شکست محیط فرود و لایه پس از آن می‌باشد. این کار باعث تطابق بهتر ضریب شکست معادل انبوهه و ضریب شکست محیط فرود می‌شود و درنتیجه از حضور موجک‌ها تا حدودی جلوگیری می‌کند. در اینجا ما از یک لایه تمام موج SiO_2 استفاده نمودیم و در شکل ۳ مشاهده می‌شود که عبور در اطراف باند بازتاب از مقدار بهتری نسبت به دو مورد دیگر برخوردار است.



شکل ۳ نمودار بازتاب ساختار سوم در سه حالت عادی، بهینه شده و بهینه شده + حضور لایه تمام موج SiO_2

۵- نتیجه گیری

مقدار پهنای شکاف و بیشینه بازتاب به ترتیب متناسب با اختلاف ضریب شکست دولایه و تعداد جفت لایه استفاده شده در انبوهه تغییر می‌کنند. همچنین می‌توان با قرار دادن یک لایه جفت کننده در انتهای ساختار و با بهینه سازی ضخامت لایه‌های بیرونی کاهش عبور ناشی از هماهنگ‌های مرتبه بالاتر بازتاب را کاهش داد. البته این کاهش افت باعث ایجاد اندکی کاهش بازتاب در گستره بازتاب بالا نیز می‌شود که این مقدار با افزایش تعداد لایه-ها قابل جمراجع

[۱] A. Thelen, "Design of Optical Minus Filters," J. Opt. Soc. Am. ٦١, ٣٦٥-٣٦٩ (١٩٧١).

[۲] A. Thelen, *Design of optical interference coatings* (McGraw-Hill New York, ١٩٨٩).

[۳] M. Scherer, U. Schallenberg, H. Hagedorn, W. Lehnert, B. Romanov, and A. Zoeller" ,High performance notch filter coatings produced with PIAD and magnetron sputtering," in *Optical Systems Design*(International Society for Optics and Photonics, ٢٠٠٨), pp. ٧١٠١٠I-٧١٠١٠I-٧١٠١٠.

[٤] J. Zhang, M. Fang, Y. Jin, and H. He, "Narrow line-width filters based on rugate structure and antireflection coating," Thin Solid Films ٥٢٠, ٥٤٤٧-٥٤٥٠ (٢٠١٢).

[٥] R. W. S. Sprague, Boris; Minott, George L., "Rugate notch filters find use in laser-based applications," Laser Focus World ٤٠, ١٠٧ (٢٠٠٤).

[٦] V. Janicki ,M. Lappschies, B. Görtz, D. Ristau, U. Schallenberg, O. Stenzel, and N. Kaiser, "Comparison of gradient index and classical designs of a narrow band notch filter," (٢٠٠٥), pp. ٥٩٦٣١O-٥٩٦٣١O-٥٩٦٣٧.

[٧] H. A. Macleod, "Thin-Film Optical Filters," in *Thin-Film Optical Filters*(CRC Press, ٢٠١٠), pp. ٧٠٧-٧١٨.

[٨] U. Schallenberg, B. Ploss, M. Lappschies, and S. Jakobs, "Design and manufacturing of high-performance notch filters," (٢٠١٠), pp. ٧٧٣٩١X-٧٧٣٩١X-٧٧٣٩٩.

[٩] C.-C. Lee, "Optical interference coatings for optics and photonics [Invited]," Applied optics ٥٢, ٧٣-٨١ (٢٠١٣).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]