



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

محمد مهدی حمزه نژاد^۱، مرتضی حاجی محمودزاده^{۱،۲}، حمیدرضا فلاح^{۱،۲} و حسین زابلیان^۱

^۱گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

^۲گروه 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. در نهایت، 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- پالایه 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

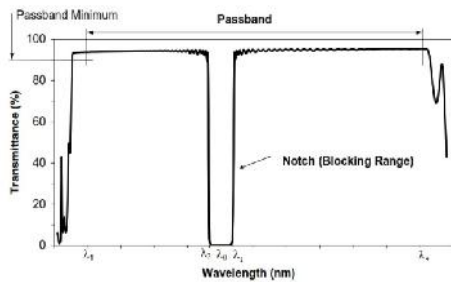
^۱Department of physics, University of Isfahan, Isfahan

^۲Quantum 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

۱- مقدمه



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 تشکیل شده‌اند، ساخته می‌شوند. در این مجموعه معمولاً لایه‌ها به‌صورت تناوبی روی هم قرار می‌گیرند. برای این روش طراحی‌های مختلفی وجود دارد که به‌طور معمول از طراحی به‌صورت $^s(HL)$ 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 $^{\Delta}(NW)$ 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 انبوهی چارک موج متناوب توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳، ۹]:

$$NW = \frac{4}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right) \quad (1)$$

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

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 از جمله 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 معمولاً 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 پالایه 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 طول موج 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 [۴-۱].

^۱ Notch Filters

^۲ Discrete layers

^۳ Rugate

^۴ Holography

^Δ Notch Width

جدول ۱ مقادیر محاسبه شده توسط روابط (۱) و (۲) و طراحی شده برای سه ساختار مختلف $(Y_2O_3-Y_2O_{3-x})^{1/4}$ ، $(Y_2O_3-Y_2O_{3-x})^{3/4}$ و $(Y_2O_3-Y_2O_{3-x})^{1/4}$ SiO_2 ^{۱۴}

پهنای شکاف طراحی شده	بیشینه بازتاب طراحی شده	پهنای شکاف محاسبه شده	بیشینه بازتاب محاسبه شده	S	ضریب شکست	چگالی در هم پیکیدگی	ماده
۱۵,۹۷	۹۹,۱۲	۱۲,۹۵	۹۹,۳	۱۴	۱,۴۶	۱	SiO ₂
					۱,۷۹	۱	Y ₂ O ₃
۸,۴۵	۶۹	۴,۵۲	۷۶,۱	۱۴	۱,۷۵	۰,۹۵	Y ₂ O ₃
					۱,۶۳	۰,۸۰	Y ₂ O _{3-x}
۵,۸۲	۹۷,۷۳	۴,۵۲	۹۸,۴	۳۴	۱,۷۵	۰,۹۵	Y ₂ O ₃
					۱,۶۳	۰,۸۰	Y ₂ O _{3-x}

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 درهم‌پیکیدگی^۱ (P) لایه، ضریب شکست (n) آن را تغییر داد. در اینجا ماده یتروم 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 ۱ را با کمک نرم افزار طراحی لایه‌های نازک شبیه سازی کردیم. در اینجا ما از نرم افزار پیشرفته طراحی لایه‌های نازک مکتود 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

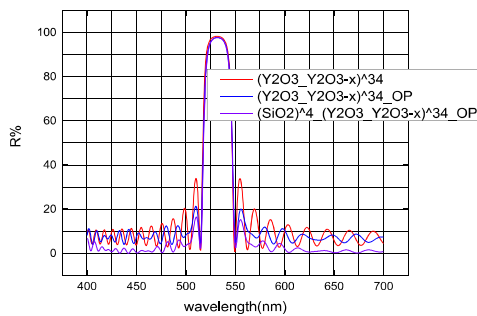
است که می‌توان آن را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد [۷]:

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

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. معمولاً 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 یتروم دی اکسید (Y₂O₃) را به عنوان ماده ضریب شکست بالا و سیسلکون دی اکسید (SiO₂) 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 ۱۳ درصد از طول موج مرکزی را شامل می‌شود، این مقدار برابر ۶۹

^۱ Packing Density



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 انبوه 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 لایه‌ها قابل جبران است.

[۱] A. Thelen, "Design of Optical Minus Filters," J. Opt. Soc. Am. ۶۱, ۳۶۵-۳۶۹ (۱۹۷۱).

[۲] A. Thelen, *Design of optical interference coatings* (McGraw-Hill New York, ۱۹۸۹).

[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, ۲۰۰۸), pp. ۷۱۰۱۰I-۷۱۰۱۰I-۷۱۰۱۰.

[۴] J. Zhang, M. Fang, Y. Jin, and H. He, "Narrow line-width filters based on rugate structure and antireflection coating," *Thin Solid Films* ۵۲۰, ۵۴۴۷-۵۴۵۰ (۲۰۱۲).

[۵] R. W. S. Sprague, Boris; Minott, George L., "Rugate notch filters find use in laser-based applications," *Laser Focus World* ۴۰, ۱۰۷ (۲۰۰۴).

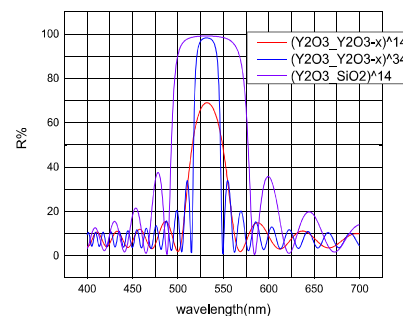
[۶] V. Janicki, M. Lappschies, B. Görtz, D. Ristau, U. Schallenberg, O. Stenzel, and N. Kaiser, "Comparison of gradient index and classical designs of a narrow band notch filter," (۲۰۰۵), pp. ۵۹۶۳۱Q-۵۹۶۳۱Q-۵۹۶۳۷.

[۷] H. A. Macleod, "Thin-Film Optical Filters," in *Thin-Film Optical Filters* (CRC Press, ۲۰۱۰), pp. ۷۰۷-۷۱۸.

[۸] U. Schallenberg, B. Ploss, M. Lappschies, and S. Jakobs, "Design and manufacturing of high-performance notch filters," (۲۰۱۰), pp. ۷۷۳۹۱X-۷۷۳۹۱X-۷۷۳۹۹.

[۹] C.-C. Lee, "Optical interference coatings for optics and photonics [Invited]," *Applied optics* ۵۲, ۷۳-۸۱ (۲۰۱۳).

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 تقریباً 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 ۴ 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 انبوهی 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 انبوه و ضریب شکست محیط فرود می‌شود و در نتیجه 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.