

بررسی و شبیه سازی پالایندهی شکاف و بررسی اثر ماده و ضخامت بر خواص آن

محمدرضا صالح پور، علی حیدری فرد، حمیدرضا فلاح و مرتضی حاجی محمود زاده

گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان

چکیده - پالایندهی شکاف یک ابزار نوری است که عملکرد آن بر اساس پدیده تداخل است. عملکرد پالایندهی شکاف (فیلتر بازتابی) به گونه ای است که یک بازه طول موجی اطراف طول موج مرکزی را بازتاب کرده و طول موج های اطراف این گستره را به طور کامل عبور می دهد. یکی از روش های ساخت این نوع پالاینده ها استفاده از جفت لایه های نازک متناوب چارک موج به صورت $aHbL$ می باشد. اما این طرح دارای مشکلاتی همچون بازتاب های مرتبه بالاتر در ناحیه عبور می باشد. در این پژوهش سعی شده است به بررسی و شبیه سازی ساختارهای $aHbL$ پرداخته شود و با استفاده از مواد مختلف و ضخامت های مختلف میزان بازتاب مرکزی را افزایش و همچنین پهنای باند بازتاب در اطراف طول موج مرکزی کاهش داده شود.

کلید واژه: پالاینده شکاف، چارک موج، لایه نازک

Investigation and simulation of Notch filter and investigation of the effect of matter and thickness on its properties

Mohammad Reza salehpoor, Ali Heydari Fard, Hamid Reza Fallah,

Morteza Hajy Mahmoodzadeh

Physics Department, Sciences Faculty, University of Isfahan

Abstract: Notch filter is an optical instrument that its performance is based on the Interference phenomenon. The Notch filters, (reflective filter) act is that it reflects a wavelength range around the central wavelength and completely passes the rest of the wavelengths. One of the methods for producing these types of fillers is to use a pair of alternating quarter-wavelengths thin films in the form of $aHbL$. Although this design has problems like high-level reflections in the transmission region. In this research it has been tried to study and simulate the structures $aHbL$, with using different materials and thicknesses to increase the central reflection, also reduce the bandwidth of the reflection around the central wavelength has been reduced.

Keywords: Notch Filter, Quarter-Wave, Thin Film

۱- مقدمه

پالاینده شکاف یک ابزار نوری بر مبنای پدیده تداخل است. این پالاینده یک گستره طول موجی پیرامون طول موج مرکزی را بازتاب نموده و طول موج های اطراف این گستره را به طور کامل عبور می دهد. پالاینده های تداخلی لایه نازک دارای کاربردهای متنوعی همچون آینه های دی الکتریک بدون اتلاف، شکافنده های پرتو، پوشش های پادبازتاب و پالاینده هایی که باند های معینی از طول موج را انتخاب یا رد می کنند را دارا است [۱].

۲- بررسی و شبیه سازی پالاینده های تداخلی

۲-۱- بررسی ساختار پالاینده های تداخلی

پالاینده های تداخلی به طور معمول با انباشت لایه های مجزا که از مواد با ضریب شکست متفاوت تشکیل شده اند، ساخته می شوند. معمولا برای این روش طراحی های متفاوتی وجود دارد که به طور معمول از طراحی به صورت $(aHbL)^s$ استفاده می شود که در آن H و L به ترتیب نشان دهنده لایه های چارک موج با ضریب شکست بزرگتر و کوچکتر می باشند و a, b اعداد صحیحی هستند که تعداد چارک موج های لایه های با ضریب شکست بالا و پایین را مشخص می کنند و همچنین s تعداد جفت لایه های موجود در طراحی را نشان می دهد. مشخصات اپتیکی لایه نازک به گونه ای با تنظیم ضخامت و ضرایب شکست معین می شوند که شرایط برای ایجاد تداخل سازنده و ویرانگر را در طول موج های مورد نظر فراهم کند. بر همین اساس، یک پالاینده شکاف در صورتی برای یک انبوه از لایه های متناوب با مواد ضریب شکست بالا و پایین دارای باند عبور و بازتاب خواهد بود که، در گستره عبوری طیف تداخل کاملا و ویرانگر و در گستره بازتابی تداخل کاملا سازنده ایجاد شود تا بازتاب در طول موج مرکزی λ_0 به بیشینه خود برسد، این امر با شرط رابطه ۱ برقرار خواهد شد [۲]:

$$n_H t_H = n_L t_L = \frac{\lambda_0}{4} \quad (1)$$

که در آن n_H و n_L به ترتیب ضرایب شکست مواد با ضریب شکست بالا و پایین هستند و t_H و t_L ضخامت لایه های با ضریب شکست بالا و پایین را نشان می دهند.

یکی دیگر از مسائل مهمی که در پالاینده شکاف مورد بررسی قرار می گیرد پهنای باند بازتاب یا به عبارتی همان پهنای شکاف است. در روش لایه های مجزای پالاینده شکاف میزان پهنای شکاف NW به مقدار اختلاف ضرایب شکست دو ماده با ضرایب شکست بالا و پایین یا به نسب بین آن ها بستگی دارد که در رابطه ۲ نشان داده شده است [۳]:

$$NW = \frac{4}{\pi} \sin^{-1} \left[\frac{(\rho^2 + 2\rho \cos \gamma + 1)}{\rho + 1} \right] \quad (2)$$

که در آن:

$$\gamma = \left(\frac{s-1}{s} \right) \pi \quad \rho = \frac{n_H}{n_L}$$

نکته دیگر در بحث پالاینده های شکاف مطرح می شود و دارای اهمیت است، میزان بیشینه بازتاب است که می توان آن را از رابطه ۳ محاسبه کرد [۴].

$$R_{\max} = \left(\frac{1 - \frac{n_H^{2s+2}}{(n_L^{2s} n_{\text{sub}})}}{1 + \frac{n_H^{2s+2}}{(n_L^{2s} n_{\text{sub}})}} \right)^2 \quad (3)$$

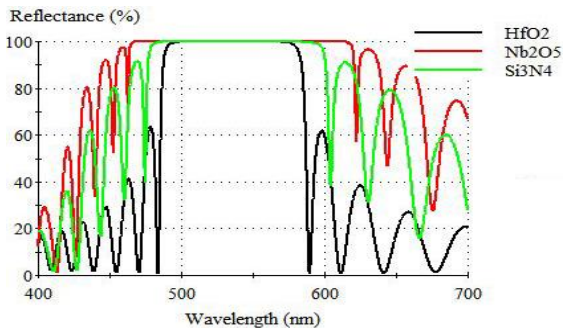
۲-۲- شبیه سازی پالاینده های تداخلی

در شبیه سازی پالاینده شکاف انتخاب مواد از اهمیت ویژه ای برخوردار است. مواد مورد استفاده باید از ویژگی هایی همچون شفافیت در محدوده طیفی پالاینده شکاف، قابلیت لایه نشانی آسان، خلوص بالا، مقاومت در برابر شرایط محیطی و توانایی تولید پوشش با ترکیب یکسان با ماده ای اولیه را دارا باشند [۵]. از این رو در این پژوهش از مواد دی الکتریکی همچون HfO_2 , Nb_2O_5 , Si_3N_4 و TiO_2 , Y_2O_3 , Ta_2O_5 به عنوان مواد با ضریب شکست بالا استفاده شد.

در این پژوهش با استفاده از نرم افزار شبیه سازی E.Macleod به بررسی چندین ساختار $(aHbL)^s$ برای مواد نامبرده در طول موج مرجع $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$ پرداخته شده است و بستره از جنس BK7 انتخاب شد. نور فرودی در

^۱-Notch width

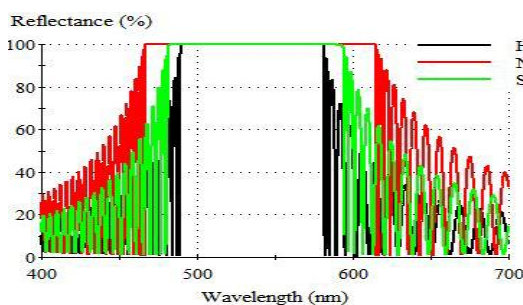
در مرحله دوم ساختار $(HL)^{20}$ با مواد مشابه مرحله قبل بررسی شد. شرایط محیطی و نور فرودی همانند مرحله اول بوده و فقط تعداد جفت لایه‌های مورد استفاده افزایش یافته است (شکل ۲).



شکل ۲: نمودار بازتاب ساختار $(HL)^{20}$

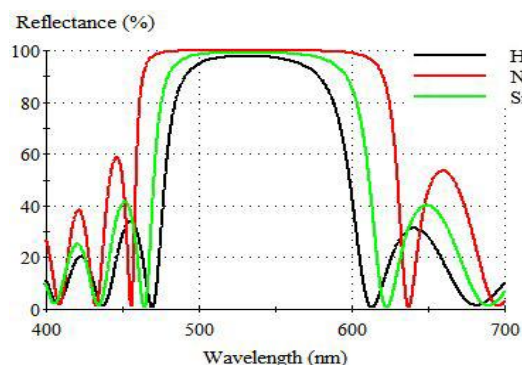
بیشینه بازتاب برای ترکیب‌های ۱، ۲ و ۳ برابر با ۹۹/۹۹٪ است. همچنین پهنای شکاف برای ساختارهای فوق به ترتیب برابر ۱۰۳nm، ۱۳۹nm و ۱۲۶nm می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده و نمودارها ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد جفت لایه‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی پالایند، پهنای شکاف کاهش و بیشینه بازتاب افزایش می‌یابد که نتایج مطلوبی هستند. ساختار ۱ با بهره‌گیری از HfO_2 به عنوان ماده‌ی ضریب شکست بالا با توجه به داشتن اختلاف ضریب شکست کمتر با SiO_2 نسبت به دوماده دیگر از نتایج مطلوب‌تری برخوردار است.

مرحله سوم به ساختار $(HL)^{60}$ اختصاص یافته است. در این شبیه‌سازی همانند نمونه قبلی مواد ضریب شکست بالا HfO_2 ، Nb_2O_5 ، Si_3N_4 هستند و SiO_2 نیز به عنوان ماده با ضریب شکست پایین در نظر گرفته شده است. بیشینه بازتاب در هر ۳ ترکیب اخیر ۹۹/۹۹٪ درصد است و ضخامت فیزیکی ترکیب‌ها به ترتیب برابر $9/6 \mu m$ ، $8/89 \mu m$ و $9/35 \mu m$ می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳: نمودار بازتاب ساختار $(HL)^{60}$

همه‌ی ساختارها عمود بر سطح است. در مرحله اول ساختار $(HL)^{10}$ با در نظر گیری مواد ذکر شده به عنوان مواد با ضریب شکست بالا و از SiO_2 به عنوان ماده با ضریب شکست پایین شبیه‌سازی شد. از بین شش ماده بررسی شده در پهنای طیفی ۴۰۰nm تا ۷۰۰nm با این نوع ساختار، نتایج مربوط به سه ماده‌ی ضریب شکست بالا (HfO_2 ، Nb_2O_5 ، Si_3N_4) که به نسبت دیگر ماده‌ها دارای نتایج بهتری بودند در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱: نمودار بازتاب ساختار $(HL)^{10}$

جدول ۱: پارامترهای ترکیب‌های ساختار $(HL)^{10}$

ترکیب	ساختار لایه‌ای	جفت	R _{max} (%)	NW(nm)	ρ
1	HfO ₂ /SiO ₂	97/2%	130nm	1/34	
2	Nb ₂ O ₅ /SiO ₂	99/99%	190nm	1/6	
3	Si ₃ N ₄ /SiO ₂	99/3%	180nm	1/4	

ضخامت فیزیکی لایه‌ها در ساختار فوق برابر با یک چهارم طول موج است. طبق نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که با کاهش اختلاف ضریب شکست هم مقدار پهنای شکاف و هم مقدار بیشینه بازتاب کاهش می‌یابد که این نتایج با روابط ارائه شده در بخش قبل مطابقت دارند.

دیگر نکته مهم در مورد پالایندهای شکاف افت و خیز-های موجود در باند عبور است. این افت و خیزها نتیجه‌ی ذاتی عملکرد نوری پالایندهای شکاف است که شاید بتوان علت آن را در عدم تطابق ضریب شکست معادل انبوهی مورد نظر و ضریب شکست محیط پیرامون آن (محیط فرود و بستره) جست و جو کرد [۶، ۷]. ملاحظه می‌شود که طبق شکل ۱ با کاهش اختلاف ضریب شکست ماکزیمم بازتاب‌های مراتب بعدی نیز در باند عبور کاهش می‌یابد.

۳- نتیجه گیری

در این پژوهش پالایندهی شکاف با استفاده از مواد با ضریب شکست بالا و پایین طراحی و شبیه سازی شد. مشاهده شد که موادی همچون HfO_2 و Nb_2O_5 و Si_3N_4 به نسبت دیگر مواد برای ساخت پالایندهای شکاف مناسب تر هستند. همچنین در بین این مواد HfO_2 به نسبت دیگر مواد در تمامی شرایط دارای پهنای باند کمتر و درصد بازتاب مناسب و همچنین بازتاب های مراتب بالاتر با درصدهایی به نسبت کمتر از دیگر مواد بود.

در بررسی صورت گرفته مشاهده شد که با افزایش تعداد لایه ها و در نتیجه افزایش ضخامت درصد بازتاب در باند بازتاب افزایش و پهنای شکاف فیلتر کاهش می یابد که این دو نتایج مطلوبی هستند. در ادامه با تغییر ضرایب a و b به بهبود عملکرد پالایند و نتایج بدست آمده پرداخته شد.

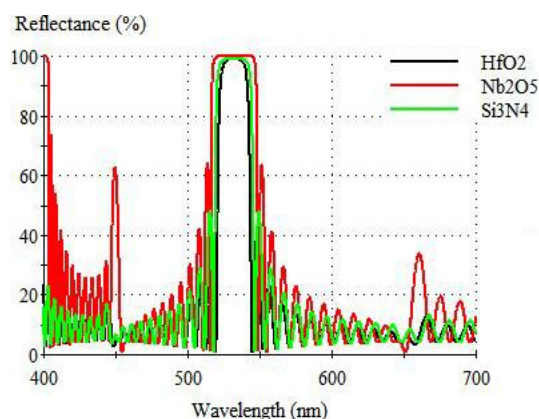
مراجع

- [۱] D. Diehl, "Holographic interference filters," (University of Rochester, 2003).
- [۲] A. Shinman, N. N. Lipkin, R. Kirshner, and H. Zipin, "Continuous index IR notch filter for atmospheric CO2 suppression," in *International Symposium on Optical Science and Technology* (International Society for Optics and Photonics, 2003), pp. 718-727.
- [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 *Proc. SPIE* (2008), p. 71010I.
- [۴] H. A. Macleod, *Thin-film optical filters* (CRC press, 2001).
- [۵] N. Kaiser, and H. K. Pulker, *Optical interference coatings* (Springer, 2013).
- [۶] J. Zhang, M. Fang, Y. Jin, and H. He, "Narrow line-width filters based on rugate structure and antireflection coating," *Thin Solid Films* **520**, 5447-5450 (2012).
- [۷] V. Janicki, M. Lappschies, B. Gortz, D. Ristau, U. Schallenberg, O. Stenzel, and N. Kaiser, "Comparison of gradient index and classical designs of a narrow band notch filter," in *Optical System Design* (2005).

با توجه به شکل ۳ مشاهده می شود که در این ساختار با افزایش تعداد جفت لایه ها پهنای طیفی پالایند هم چنان زیاد است و تعداد بازتاب های مراتب بالاتر در باند عبور و درصد این بازتاب ها نیز افزایش یافته است. در ادامه نشان می دهیم که با تغییر ضرایب a و b در ضخامت های معادل مشابه با این مرحله، می توان به نتایج بهتری دست یافت.

در مرحله چهارم ساختار $(5H5L)^{12}$ مورد بررسی قرار گرفت [۷]. در این جا نیز مواد همانند سه مرحله قبل انتخاب شده اند. در این بخش ۱۲ جفت لایه داریم که

ضخامت اپتیکی هر لایه برابر $5 \frac{\lambda_0}{4}$ می باشد (شکل ۴).



شکل ۴: نمودار بازتاب ساختار $(5H5L)^{12}$

با توجه به نتایج به دست آمده پیشنهادی بازتاب برای هر سه ترکیب برابر ۹۹/۹۹٪ است. پهنای طیفی شکاف نیز به میزان قابل قبولی در مقایسه با طراحی های قبل کاهش یافته است. به ترتیب برای سه ترکیب ۱، ۲ و ۳ پهنای شکاف ۲۲nm، ۳۲nm و ۲۶nm و ضخامت فیزیکی معادل همانند ساختار قبلی می باشد. افت و خیزهای باند عبور و پیشنهادی بازتاب های مراتب بالاتر نیز نسبت به سه مرحله ی قبل از وضعیت بهتری برخوردار هستند. نتایج مناسب تر در این مرحله می تواند دلایل مختلفی داشته باشد از جمله این که گذار به محیط های با ضریب شکست متفاوت کمتر می شود و چون عملکرد پالایند های شکاف بر اساس تداخل نوری در لایه های نازک می باشد میزان تداخل ها کاهش یافته و بسیاری از تداخل های مخرب از بین می رود. همچنین حضور لایه های غایب (نیم موج) در این ساختار باعث ایجاد پایداری در طراحی و در نتیجه موجب بهینه شدن عملکرد پالایند های شکاف می شود.