بررسی و شبیه‌سازی پالاینده‌ی شکاف و بررسی اثر ماده و ضخامت بر خواص آن

محمدرضا صالح‌پور، 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 گونه‌ای است که یک بازه طول موجی اطراف طول موج مرکزی را بازتاب کرده و طول موج‌های اطراف این گستره را به طور کامل عبور می‌دهد. یکی از روش های ساخت این نوع پالاینده‌ها استفاده از جفت لایه‌های نازک متناوب چارک موج به صورت $(aHbL)^s$ می‌باشد. اما این طرح دارای مشکلاتی همچون بازتاب-های مرتبه بالاتر در ناحیه عبور می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است به بررسی و شبیه سازی ساختارهای $(aHbL)^s$ پرداخته شود و با استفاده از مواد مختلف و ضخامت‌های 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 $(aHbL)^s$. 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 $(aHbL)^s$, 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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

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

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 می‌دهد. پالاینده‌های تداخلی لایه نازک دارای کاربردهای متنوعی همچون آینه‌های دی الکتریک بدون اتلاف، شکافنده‌های پرتو، پوشش‌های پادبازتاب و پالاینده‌هایی که باند های معینی از طول موج را انتخاب یا رد می‌کنند را دارا است[۱].

۲- بررسی و شبیه سازی پالاینده‌های تداخلی

۲-۱- بررسی ساختار پالاینده‌های تداخلی

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

$$n_H t_H = n_L t_L = \frac{\lambda_0}{4} \qquad (۱)$$

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 لایه‌های با ضریب شکست بالا و پایین را نشان می‌دهند.

یکی دیگر از مسائل مهمی که در پالاینده شکاف مورد بررسی قرار می‌گیرد پهنای باند بازتاب یا به عبارتی همان پهنای شکاف است. در روش لایه‌های مجزای پالاینده شکاف میزان پهنای شکاف[۱]NW به مقدار اختلاف ضرایب شکست دو ماده با ضرایب شکست بالا و پایین یا به نسب بین آن‌ها بستگی دارد که در رابطه ۲ نشان داده شده است[۳]:

$$NW = \frac{4}{\pi}\sin^{-1}\left[\frac{\left(\rho^2 + 2\rho\cos\gamma + 1\right)}{\rho + 1}\right] \qquad (۲)$$

که درآن:

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

نکته دیگر در بحث پالاینده‌های شکاف مطرح می‌شود و دارای اهمیت است، میزان بیشینه بازتاب است که می‌توان آن را از رابطه 3 محاسبه کرد[۴].

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

۲-۲- شبیه سازی پالاینده‌های تداخلی

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

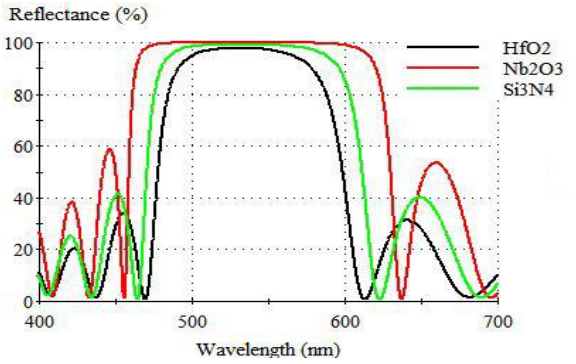
در این پژوهش با استفاده از نرم افزار شبیه‌سازی E.Macleod به بررسی چندین ساختار $(aHbL)^s$ برای مواد نامبرده در طول موج مرجع $\lambda_0 = 532nm$ پرداخته شده است و بستره از جنس BK7 انتخاب شد. نور فرودی در

[۱]-Notch width

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

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 400nm تا700nm با این نوع ساختار، نتایج مربوط به سه ماده ی ضریب شکست بالا $(Hf_{O2}, Nb_2O_5, Si_3N_4)$ که به نسبت دیگر ماده‌ها دارای نتایج بهتری بودند در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده‌است.



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

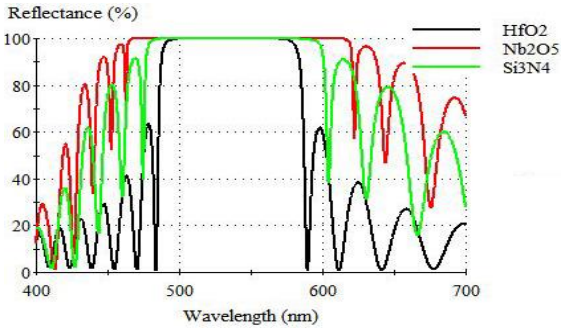
جدول ۱: پارامترهای ترکیب های ساختار $(HL)^{10}$

ترکیب	ساختار لایه‌ای جفت	$R_{max}(\%)$	NW(nm)	ρ
1	$HfO2/SiO2$	97/2%	130nm	1/34
2	Nb_2O_5/SiO_2	99/99%	190nm	1/6
3	$Si3N4/SiO2$	99/3%	180nm	1/4

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

دیگر نکته مهم در مورد پالاینده‌های شکاف افت و خیز-های موجود در باند عبور است. این افت و خیزها نتیجه‌ی ذاتی عملکرد نوری پالاینده‌های شکاف است که شاید بتوان علت آن را در عدم تطابق ضریب شکست معادل انبوهه‌ی 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 ضرایب شکست ماکزیمم بازتاب‌های مراتب بعدی نیز در باند عبور کاهش می‌یابد.

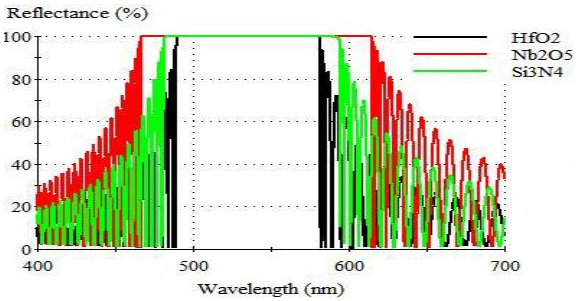
در مرحله دوم ساختار $(HL)^{20}$ با مواد مشابه مرحله قبل بررسی شد. شرایط محیطی و نور فرودی همانند مرحله اول بوده و فقط تعداد جفت لایه‌های مورد استفاده افزایش یافته است(شکل ۲).



شکل۲: نمودار بازتاب ساختار $(HL)^{20}$

بیشینه بازتاب برای ترکیب‌های ۱، ۲ و ۳ برابر با 99/99% است. همچنین پهنای شکاف برای ساختارهای فوق به ترتیب برابر 103nm، 139nmو 126nm می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده و نمودارها ملاحظه می‌شود که با افزایش تعداد جفت لایه‌های مورد استفاده در شبیه-سازی پالاینده، پهنای شکاف کاهش و بیشینه بازتاب افزایش می‌یابد که نتایج مطلوبی هستند. ساختار ۱ با بهره گیری 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 99/99% درصد است و ضخامت فیزیکی ترکیب ها به ترتیب برابر $9/6\ \mu m$، $8/89\ \mu m$ و $9/35\ \mu m$ می‌باشد (شکل ۳).



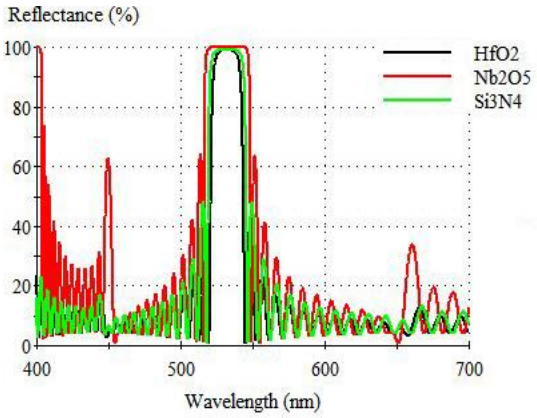
شکل ۳: نمودار بازتاب ساختار $(HL)^{60}$

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که در این ساختار با افزایش تعداد جفت لایه‌ها پهنای طیفی پالاینده هم‌چنان زیاد است و تعداد بازتاب‌های مراتب بالاتر در باند عبور و درصد این بازتاب‌ها نیز افزایش یافته است. در ادامه نشان می‌دهیم که با تغییر ضرایب a وb در ضخامت‌های معادل مشابه با این مرحله، می‌توان به نتایج بهتری دست یافت.

در مرحله چهارم ساختار (5H5L)[۱۲] مورد بررسی قرار گرفت[۷]. در این‌جا نیز مواد همانند سه مرحله قبل انتخاب شده‌اند. در این بخش ۱۲ جفت لایه داریم که ضخامت اپتیکی هر لایه برابر $5\frac{\lambda_0}{4}$ می‌باشد(شکل ۴).



شکل ۴: نمودار بازتاب ساختار (5H5L)[۱۲]

با توجه به نتایج به‌دست آمده بیشینه‌ی بازتاب برای هر سه ترکیب برابر 99/99% است. پهنای طیفی شکاف نیز به میزان قابل قبولی در مقایسه با طراحی‌های قبل کاهش یافته است. به ترتیب برای سه ترکیب ۱، ۲و ۳ پهنای شکاف 22nm، 32nm و26nm و ضخامت فیزیکی معادل همانند ساختار قبلی می‌باشد. افت و خیزهای باند عبور و بیشینه بازتاب‌های مراتب بالاتر نیز نسبت به سه مرحله‌ی قبل از وضعیت بهتری برخوردار هستند. نتایج مناسب‌تر در این مرحله می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد از جمله این که گذار به محیط‌های با ضریب شکست متفاوت کمتر می‌شود و چون عملکرد پالاینده‌های شکاف براساس تداخل نوری در لایه‌های نازک می‌باشد میزان تداخل‌ها کاهش یافته و بسیاری از تداخل های مخرب از بین می‌رود. همچنین حضور لایه‌های غایب(نیم موج) در این ساختار باعث ایجاد پایداری در طراحی و در نتیجه موجب بهینه شدن عملکرد پالاینده‌ی شکاف می‌شود.

۳- نتیجه‌گیری

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، Nb_2O_5 و Si_3N_4 به نسبت دیگر مواد برای ساخت پالاینده‌های شکاف مناسب‌تر 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 بازتاب‌های مراتب بالاتر با درصدهایی به نسبت کمتر از دیگر مواد بود.

دربررسی صورت گرفته مشاهده شد که با افزایش تعداد لایه‌ها و در نتیجه افزایش ضخامت درصد بازتاب در باند بازتاب افزایش و پهنای شکاف فیلتر کاهش می‌یابد که این دو نتایج مطلوبی هستند. در ادامه با تغییر ضرایب a و b به بهبود عملکرد پالاینده 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.

[٤] H. A. Macleod, *Thin-film optical filters* (CRC press, 2001).

[٥] N. Kaiser, and H. K. Pulker, *Optical interference coatings* (Springer, 2013).

[٦] 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).

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]