

طراحی نانوپالایشگر پلاسمونیک چنددندانه‌ای زنجیره‌ای (CM_{1-r}-TPNF) برای به کارگیری در افزاره‌های ریزساختار پزشکی

فریبا سعید^۱
حسن فاطمی^۲

^۱کارشناس ارشد فوتونیک گرایش الکترونیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.
^۲استادیار فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

خلاصه

مقدمه: در این مقاله به طراحی پالایشگر جدیدی به نام نانوپالایشگر پلاسمونیک چنددندانه‌ای زنجیره‌ای (CM_{1-r}-TPNF) پرداخته شده است که به دلیل داشتن عملکرد گذردهی زیر طول موجی امواج الکترومغناطیس می‌توان آن را در ابعاد هندسی بسیار ریز، در مقیاس نانومتر، طراحی و تولید کرد و در ساخت ابزار ریزساختار دقیق پزشکی مانند MEMSها به کار گرفت.

روش بررسی: این نانوپالایشگر با مدل‌سازی به روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) در فضای مجازی طراحی و شبیه‌سازی شده و بررسی عملکرد آن با استفاده از اصل برهم‌نهی صورت گرفته است. برای اطمینان درستی نتایج با نتایج حاصل از روش هم‌ارزمداری (ECM) مقایسه شده است.

یافته‌ها: CM_{1-r}-TPNF از کنارهم قرار گرفتن زنجیروار ۲ نانوپالایشگر پلاسمونیک چنددندانه‌ای شکل می‌گیرد و در محدوده طول موج‌های ۴۰۰ نانومتر تا ۵ میکرومتر کاربرد دارد و می‌تواند هم نواحی بسیار باریک میان‌گذر و هم پهناهای بسیار وسیع میان‌نگذر را با دقت بالا تولید نماید که فرآیند مربوط به هر دو مورد در مثال‌هایی آورده شده است.

نتیجه‌گیری: باتوجه به ویژگی‌های CM_{1-r}-TPNF استفاده از آن در ساخت ابزار دقیق و ریز ساختار فوتونیک بسیار مناسب است. در پهنای گذردهی نسبی، آن دو فاکتور شدت دامنه و پهنای باریکه گذردهی به هم وابسته‌اند که می‌توان برحسب مورد و برای کاربردهای گوناگون یکی را نسبت به دیگری در اولویت قرار داد. البته بر اثر افزایش درصدی ΔC_1 موج رفتاری نوسانی پلکانی و ΔC_1 عملکردی کاواک‌گونه خواهند داشت.

واژه‌های کلیدی: نانوپالایشگرهای پلاسمونیک، نانوپالایشگرهای پلاسمونیک چنددندانه‌ای، روش تفاضل محدود در حوزه زمان

نویسنده مسئول: فریبا سعید، تلفن ۰۹۱۳۳۴۰۶۴۹۰
پست الکترونیک: fariba.saeed@gmail.com

مقدمه

برای به کارگیری در ساخت دستگاه‌های دقیق پزشکی طراحی شده و با شبیه‌سازی در فضای مجازی چگونگی عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است.

در حال حاضر نانوپالایشگرهای پلاسمونیک^۱ میان‌گذر و میان‌نگذر به دلیل داشتن عملکرد گذردهی زیر طول موجی^۲ امواج الکترومغناطیس آن‌ها در بسیاری از صنایع پیشرفته فوتونیک کاربرد فراوان دارند. باتوجه به همین ویژگی می‌توان این پالایشگرها را در ابعاد هندسی بسیار ریز، نانومتر، کوچک‌تر از

انسان از دیرباز تاکنون سعی در هرچه کوچک‌تر کردن ابعاد هندسی ابزار تبدیل و انتقال انرژی‌ها برای کاربردهای گوناگون داشته است. عواملی چون شتاب انقلاب صنعتی، رشد فناوری‌های نانو و همچنین دست‌یافتن به تکنولوژی ساخت افزاره‌های نانوآپتیکی زمینه را برای گسترش صنایع پیشرفته ساخت مکانیزم‌های ریزساختار تبدیل و یا انتقال انرژی حاصل از امواج الکترومغناطیس فراهم آورده است. بدیهی است ضرورت استفاده از این مکانیزم‌ها در بسیاری از حوزه‌های کاربردی همچون پزشکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا در این مقاله به معرفی نوع جدیدی از نانوپالایشگرهای پلاسمونیک پرداخته شده است که

¹¹¹Plasmonic Nano Filter

²Sub-Wavelength

اطمینان از درستی عملیات، نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از روش مدل هم‌ارزمداری یا CEM^{۱۲} که براساس تئوری خطوط انتقال مخابراتی عمل می‌کند [۱۴-۱۱]، تطبیق داده شده است [۱۵].

در روش عددی، اختلاف محدود در حوزه زمان دو معادله کرل ماکسول به همراه معادله چگالی شار به شکل تفاضل محدود در هر دو حوزه فضا و زمان تبدیل می‌شوند [۱۶ و ۱۷]. در این معادلات میدان الکتریکی و مغناطیسی برحسب میدان‌ها در زمان قبلی در هر لحظه محاسبه و بازنویسی می‌شوند. اگر k نشان‌دهنده موقعیت و n_t نماد زمان باشند، معادلات (۱) و (۲) فرم اختلاف محدود در حوزه زمان مؤلفه X آن‌ها هستند. به‌طور مشابه این معادلات برای پنج مؤلفه باقی‌مانده نیز نوشته شده است و برای گام‌های زمانی بعدی و نقاط مکانی دیگر فضا در زمان واحد حل می‌شوند.

$$E_x^{n_t+\frac{1}{2}}(k) = E_x^{n_t-\frac{1}{2}}(k) - \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x} [H_y^{n_t}(k+\frac{1}{2}) - H_y^{n_t}(k-\frac{1}{2})] \quad (1)$$

$$H_y^{n_t+1}(k+\frac{1}{2}) = H_y^{n_t}(k+\frac{1}{2}) - \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_x^{n_t+\frac{1}{2}}(k+1) - E_x^{n_t+\frac{1}{2}}(k)] \quad (2)$$

در مدل هم‌ارزمداری که براساس تئوری خطوط انتقال مخابراتی عمل می‌کند و هم‌ارزمداری ساختار پلاایشگرها را شبیه‌سازی می‌کند، ماتریس گذردهی نسبی هر یک از دندان‌های M-TPNF به‌صورت زیر است:

$$T = A(L) B(Z_{Tooth}^{(1)}) A(\Delta_1) B(Z_{Tooth}^{(2)}) A(\Delta_2) \dots B(Z_{Tooth}^{(i+1)}) \dots A(\Delta_{M-1}) B(Z_{Tooth}^{(M)}) A(L) \quad (3)$$

$$A(z) = \begin{pmatrix} \exp(-j\beta z) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta z) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$B(Z_{Tooth}^{(i)}) = \begin{pmatrix} 1 + \frac{Z_{Tooth}^{(i)}}{2Z_{MDM}} & -\frac{Z_{Tooth}^{(i)}}{2Z_{MDM}} \\ \frac{Z_{Tooth}^{(i)}}{2Z_{MDM}} & 1 - \frac{Z_{Tooth}^{(i)}}{2Z_{MDM}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$Z_{MDM} = \frac{\beta(h)h}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1} \quad (6)$$

به بیان ساده می‌توان اصل برهم‌نهی به‌طور هم‌زمان را مجموع و یا هم‌پوشانی هم‌زمان تأثیر دو یا چند عامل اثرگذار را در یک موقعیت دانست که در برخی از پدیده‌های فیزیکی صادق است.

¹²Circuit Equivalent Method

طول موج ورودی و بدون ایجاد پدیده پراش و اتلاف انرژی حاصل از آن [۲۱] طراحی و اجرا کرد تا نواحی میان‌گذر بسیار باریک^۳ و میان‌نگذر بسیار وسیع^۴ را در محدوده‌های فرکانسی مورد نظر و با دقت مطلوب تولید نمایند [۳]. لذا با توجه به ضرورت رشد فن‌آوری‌های به‌کاررفته در ساختار ابزار و ادوات پزشکی دقیق و کم حجم، مانند MEMS، می‌توان از این ویژگی در زمینه طراحی و تولید این افزارها به‌بیش‌ازپیش بهره برد. از این بین، نانوپالایشگرهای پلاسمونیک چنددندانه‌ای و یا M-TPNFs^۵ برای تولید نواحی گذردهی و یا پالایشی محدوده مادون قرمز که برای تشخیص و درمان برخی بیماری‌ها حائز اهمیت است، مناسب به نظر می‌آیند. اما، درصد زیادی از آن‌ها (چه از نوع میان‌گذر یا میان‌نگذر) قادر به تولید محدوده‌های کاربردی کامل نیستند. بنابراین برای رفع این عیب به طراحی نانوپالایشگرهای پلاسمونیک چنددندانه‌ای زنجیره‌ای یا CM_{1-r}-TPNFs^۶ پرداخته شده است که می‌توانند ضمن ایجاد نواحی گذردهی یا پالایشی مورد نظر به اصلاح و بهینه‌سازی دقیق این محدوده‌ها بپردازند.

روش بررسی

مدل‌سازی عددی محیط پلاسمونیک به‌روش عددی اختلاف محدود در حوزه زمان یا FDTD^۷ [۴-۶] با دقت $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2nm$ انجام شده است و در مرحله کدنویسی به‌دلیل تقارن ساختار هندسی مسئله بدون اینکه در نحوه عملکرد این افزاره اختلالی ایجاد شود، محاسبات در فضای دو بُعدی انجام شده است تا طراحی و اجرای برنامه‌ها زمانبری کمتری داشته باشند. قسمتی از این مراحل با کمک محیط نرم‌افزاری Meep^۸ [۷] که توسط دانشگاه MIT به‌صورت کد باز^۹ و مناسب برای محیط‌های پلاسمونیک ارائه شده، صورت گرفته است.

بررسی‌های مربوط به نحوه عملکرد CM_{1-r}-TPNF و چگونگی ایجاد، اصلاح و بهینه‌سازی بیناب‌های گذردهی نسبی پالایشگر براساس مدل دروده-لورنتس^{۱۰} [۸-۱۰] و با استفاده از اصل برهم‌نهی^{۱۱} به‌طور هم زمان انجام پذیرفته است و برای

³Narrow-band

⁴Broad-band

⁵Multi-Teeth Plasmonic Nano Filters

⁶Chain Cascaded Multi-Teeth Plasmonic Nano Filters

⁷Finite Diference Time Domain Method

⁸MIT Electromagnetic Equation Propagation

⁹Open Source

¹⁰Drude-Lorentz model

¹¹Super position principle

موج الکترومغناطیس ورودی، موج گوسی است که در محدوده طول موجهای ۴۰۰ نانومتر تا ۲ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفته است و می‌تواند تا محدوده ۵ میکرومتر گسترش پیدا کند.

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega - i\gamma)\omega} + \sum_{n=1}^5 \frac{f_n \omega_n^2}{\omega_n^2 - \omega^2 - i\gamma_n \omega} \quad (8)$$

۲- چگونگی به دست آوردن بیناب گذردهی نسبی CM_{1-r} -TPNF با توجه به این که بیناب گذردهی نسبی هر پالایشگر تأثیر پاسخ محیطی آن سیستم بر موج الکترومغناطیس ورودی می‌باشد و ماتریس انتقال سیستم‌های اپتیکی چندگانه از حاصل ضرب ماتریس‌های انتقال هر یک از اجزای تشکیل دهنده آن‌ها شکل می‌گیرد، اگر تأثیر برهم‌نهی همزمان r پالایشگر M -TPNF که به صورت زنجیروار چیده شده‌اند، شکل ۱ مورد نظر باشد، بنابراین می‌توان با ضرب کردن بیناب‌های گذردهی نسبی آن‌ها در یکدیگر و اضافه کردن تأثیر ΔC های شرکت کننده در ساختار هندسی پالایشگر، بیناب گذردهی نسبی آن را به دست آورد.

باتوجه به مقالاتی که پیش از این ارائه شده‌اند [۱۸، ۲۰]، در هر پالایشگر M -TPNF هر یک از دندانها و فاصله بین دندانهای مجاور، Δ ، همانند کاواک‌های فابری- پرو با اندازه آینه‌های محدود عمل می‌کنند و می‌توانند طی فرآیند تشدید، برخی فرکانس‌ها و همچنین هارمونیک‌های آن‌ها را جذب کنند و شدت انرژی موج الکترومغناطیس را در فرکانس‌های مذکور تضعیف نمایند. البته این موضوع در CM_{1-r} -TPNF برای Δ_r و Δ_{r-1} ($r=1,2,3,\dots$) که به ترتیب فاصله بین دندانها و M -TPNF ها هستند نیز صادق می‌باشد.

بدیهی است سیستم مطلوب پالایشگری سیستمی است که بتواند بیشترین جذب و یا گذردهی را در محدوده‌های پالایشی مورد نظر داشته باشد. با در نظر گرفتن کاربردهای متفاوت، در مواردی لازم است در یک محدوده پالایشی گسترده تنها ناحیه بسیار باریکی از بازه فرکانسی اجازه گذردهی داشته باشد یا برعکس در برخی موارد ایجاد محدوده پالایشی گسترده‌تری مورد کاربرد می‌باشد. در هر صورت معمولاً ابتدا محدوده‌ای تقریبی از بازه پالایشی مطلوب را تولید می‌کنند و سپس طی فرآیندی برنامه‌ریزی شده به اصلاح آن می‌پردازند تا بازه پالایشی مورد نظر حاصل شود. البته این روند برای بهینه‌سازی نواحی پالایش شده نیز کاربرد دارد. بنابراین می‌توان با انتخاب صحیح M -TPNF هایی که بیناب‌های گذردهی نسبی‌شان هم‌پوشانی مناسبی با یکدیگر داشته باشند به ایجاد، اصلاح و بهینه‌سازی محدوده‌های گذردهی و پالایشی مطلوب دست یافت. در ادامه، برای واضح‌تر

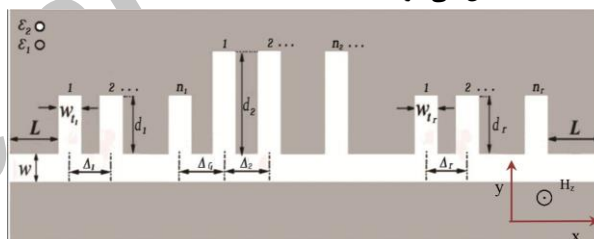
$$Z_{Tooth} = \frac{\beta(w)w\sqrt{\varepsilon_1} - j\sqrt{\varepsilon_2} \tan \beta(w)d}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1 \sqrt{\varepsilon_2} - j\sqrt{\varepsilon_1} \tan \beta(w)d} \quad (9)$$

که در آن $A(L)$ ماتریس انتقال امواج الکترومغناطیسی توصیف‌کننده انتشار موج در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی موجبر، $A(\Delta_r)$ ماتریس مربوط به انتقال در فاصله‌های بین دندانهای موجبر، $B(Z_{Tooth}^{(i)})$ توصیف‌کننده جفت‌شدگی بین موج‌های ورودی و بازتابشی مربوط به هر یک از دندانها و Z_{Tooth} و Z_{MDM} به ترتیب امپدانس‌های هم‌ارزمداری برای موجبر و هر یک از دندانها می‌باشند [۱۵].

یافته‌ها

۱- ساختار هندسی CM_{1-r} -TPNF

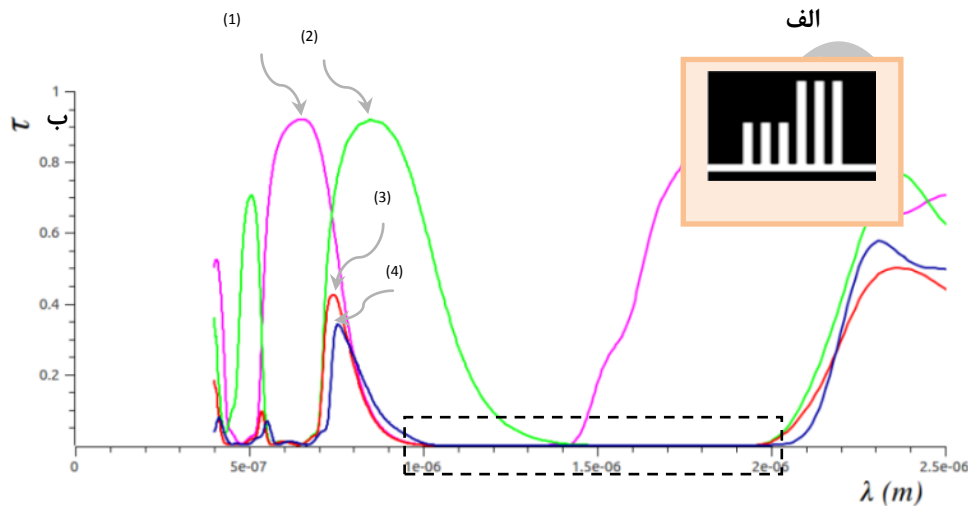
شکل ۱ مقطع عرضی از الگوی طراحی شده برای یک نانوپالایشگر پلاسمونیکی چنددندانه‌ای زنجیره‌ای را نشان می‌دهد. CM_{1-r} TPNF از کنارهم قرار گرفتن زنجیروار r پالایشگر از نوع M -TPNF تشکیل می‌شود.



شکل ۱: مقطع عرضی از الگوی طراحی شده برای CM_{1-r} -TPNF

اگر M -TPNF های مفروض n_1 -TPNF, n_2 -TPNF, ... و n_r -TPNF باشند، به ترتیب از ابتدای پالایشگر CM_{1-r} -TPNF هر یک دارای n_1, n_2, \dots, n_r دندان عمود بر موجبر MDM که با فاصله $\Delta C_1, \Delta C_2, \dots, \Delta C_{r-1}$ از یکدیگر قرار دارند، می‌باشند. ارتفاع و پهنای دندانها و همچنین فاصله بین دندانهای مجاور در هر یک از این M -TPNF ها با یکدیگر برابرند. پهنای دندانها به ترتیب از ابتدای موجبر برابر w_1, w_2, \dots, w_r ، ارتفاع دندانها d_1, d_2, \dots, d_r و فاصله هر دندان با دندان مجاورش $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_r$ تعریف شده است. اندازه فاصله اولین و آخرین دندان در CM_{1-r} -TPNF از ابتدا و انتهای موجبر L و پهنای موجبر MDM برابر با w می‌باشد. در این ساختار، ماده دی‌الکتریک (هوا) با ضریب گذردهی ε_1 و فلز (نقره) با ضریب گذردهی ε_2 معین شده‌اند. از مدل دروده-لورنتس و از رابطه ۱ با توجه به پارامترهای تجربی به دست آمده است [۱۵، ۱۸ و ۱۹].

نظر می‌باشد. برای این کار مشاهده می‌شود هم‌پوشانی بیناب‌های گذردهی نسبی پالایشگرهای 3-TPNF با ارتفاع دندان‌های ۲۰۰ نانومتر و 3-TPNF با ارتفاع دندان‌های ۳۰۰ نانومتر می‌توانند این محدوده را پوشش دهند. حاصل ضرب این دو بیناب نتیجه برهم‌نهی این دو 3-TPNF می‌باشد که در شکل ۲ نمایش داده شده است. در صورتی که اثر ΔC_1 اضافه شود، بیناب گذردهی نسبی C3-3-TPNF به دست می‌آید (بیناب ۴).



شکل ۲: الف) مقطع عرضی از C3-3-TPNF (ب) بیناب‌های گذردهی نسبی 3-TPNF نخست بیناب (۱)، 3-TPNF دوم بیناب (۲)، حاصل برهم‌نهی آن‌ها بیناب (۳) و C3-3-TPNF بیناب (۴)، درازای $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = \epsilon_{Ag}$ ، $w = w_1 = w_2 = 50nm$ ، $L = 200nm$ ، $\Delta C_1 = \Delta_1 = \Delta_2 = 100nm$ می‌باشند.

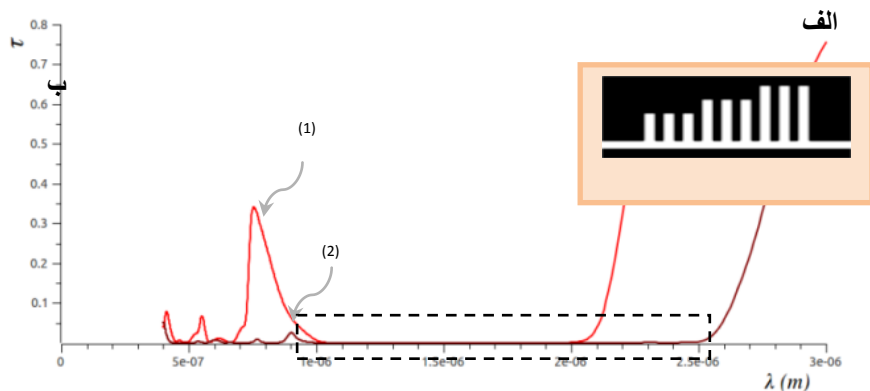
بدیهی است با توجه به افزایش تعداد دندان‌ها، تعداد Δ_r ها و همچنین ΔC ها کیفیت فرآیند پالایشگری افزایش می‌یابد و دامنه بیناب گذردهی کاهش پیدا می‌کند. همان‌گونه که در شکل (۳-الف) نشان داده شده است یک پالایشگر 3-TPNF دیگر با ارتفاع دندان‌های ۴۰۰ نانومتر به مجموعه پالایشگر شکل (۲-الف) اضافه شده است. در شکل (۳-ب) با مقایسه بیناب‌های گذردهی نسبی C3-3-TPNF، بیناب (۱)، و C3-3-TPN، بیناب (۲)، می‌توان به سهولت به محدوده پالایشی پهن‌تر اشاره نمود.

شدن مطلب با دو مثال کاربردی نحوه عملکرد TPNF- CM_{1-r} برای تولید پالایشگرهای میان‌گذر و میان‌نگذر توضیح داده شده است.

۳-۱- استفاده از TPNF- CM_{1-r} برای پالایش پهنای گسترده‌ای از بازه فرکانسی در طول موج‌های بخصوص در این مرحله به‌عنوان مثال، طراحی پالایشگر میان‌نگذر برای ایجاد پهنای پالایشی بین طول موج‌های ۱ تا ۲/۳ میکرومتر مورد

در این پالایشگر فرض بر این است فاصله بین 3-TPNF نخست و 3-TPNF دوم (با ΔC_1) برابر با فاصله بین هر دو دندان مجاور در هریک از M-TPNFها (یعنی؛ $\Delta C_1 = \Delta_1 = \Delta_2$) باشد. با توجه به اندازه یکسان Δ_1 ، Δ_2 و ΔC_1 ، این پارامترها از عملکرد مشابهی در رابطه با انتخاب و حذف طول موج‌های مناسب برخوردارند. بنابراین همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، بیناب (۴) نسبت به بیناب (۳) از افت دامنه گذردهی بیشتری در طول بازه فرکانسی برخوردار است.

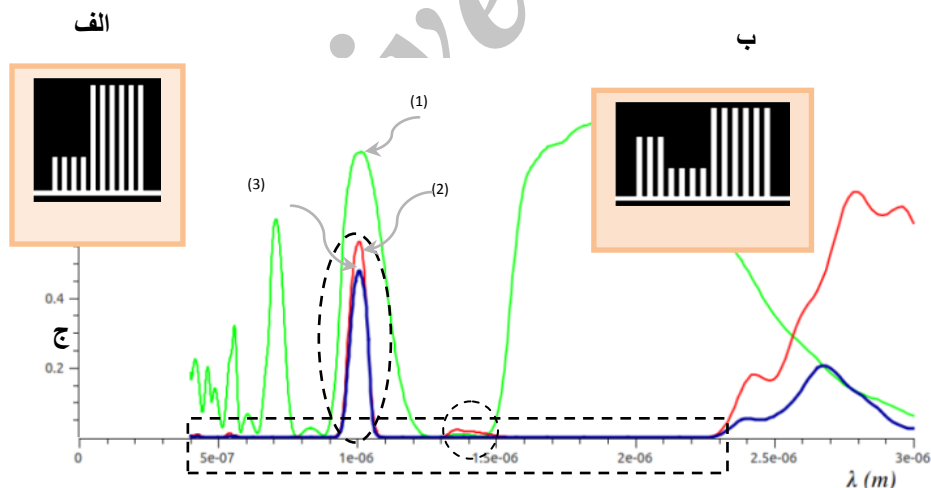
برای پهن‌تر نمودن بازه پالایشی کافی است M-TPNFهای مناسب دیگری را به سیستم اضافه کرد تا بیناب گذردهی نسبی آن‌ها بتواند باقی مانده بازه فرکانسی مورد نظر را پالایش دهد.



شکل ۳: الف) مقطع عرضی از C3-3-TPNF (ب) بیناب‌های گذردهی نسبی C3-3-TPNF بیناب (۱) و C3-3-TPNF بیناب (۲)

شکل (۴-ج) بیناب گذردهی C4-6-TPNF، بیناب (۳) را به‌ازای $d_1=350\text{nm}$ و $d_2=1100\text{nm}$ نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود ناحیه پالایشی از بازه فرکانسی در تمام طول‌موج‌ها از دامنه صفر برخوردار نیست. بنابراین برای به‌دست آوردن محدوده پالایشی دقیق‌تر با دامنه صفر دوباره از اصل برهم‌نهی استفاده می‌شود تا بتوان گستره پالایشی و باریکه گذردهی مورد نظر را ایجاد نمود.

۲-۳- استفاده از CM_{1-r} -TPNF برای گذردهی باریکه‌ای از بازه فرکانسی در طول‌موج‌های بخصوص طراحی پالایشگر میان‌گذری که باریکه گذردهی را در طول موج ۱ میکرومتر و با دامنه گذردهی نسبی حداقل ۴۵ درصد به‌گونه‌ای ایجاد کند که گذردهی طول‌موج‌های پیرامون آن صفر باشد.

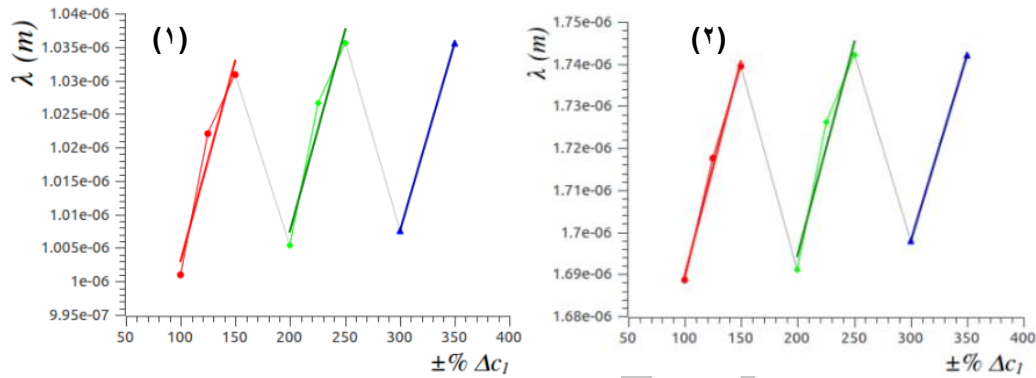


شکل ۴: الف) مقطع عرضی از C4-6-TPNF (ب) مقطع عرضی از C3-4-6-TPNF (ج) بیناب‌های گذردهی نسبی 3-TPNF بیناب (۱)، C4-6-TPNF بیناب (۲) و C3-4-6-TPNF بیناب (۳) درازای $d_3 = 1100\text{nm}$, $d_2 = 350\text{nm}$, $d_1 = 740\text{nm}$

ملاحظه می‌شود اندازه دامنه بازه پالایشی حاصل صفر و همچنین اندازه دامنه ناحیه باریک گذردهی با بزرگی مطلوب می‌باشد.

باتوجه به شکل (۴-ج) که بیناب گذردهی نسبی C3-4-6-TPNF بیناب (۳) را از برهم‌نهی بیناب‌های گذردهی نسبی 3-TPNF بیناب (۱) با C4-6-TPNF بیناب (۲) نشان می‌دهد،

عملکرد کاواک گونه فضای ΔC_1 می باشد. اگر R اندازه درصد اضافه شده به ΔC_1 باشد در درصد های کمتر و یا مساوی با ۱۰۰ طول موج مرکزی ناحیه پالایشی و نقطه بیشینه باریکه گذردهی به سمت طول موج های بلندتر و در درصد های بیشتر از ۱۰۰ به سمت طول موج های کوتاه تر جابه جا می شوند. این روند جابه جایی در درصد های بیشتر نیز دیده می شود.



شکل ۵: نمودارهای تغییرات طول موج های مرکزی محدوده های پالایشی (۱) و تغییرات نقطه بیشینه (۲) بر روی بیناب گذردهی نسبی C3-4-6-TPNF به ازای تغییرات درصدی ΔC_1 ($\pm\%$)

تولید، اصلاح و بهینه سازی محدوده های میان گذر بسیار باریک و همچنین محدوده های میان گذر بسیار وسیع، با دقت نانومتر، به کار روند.

البته با توجه به اینکه بیناب های گذردهی نسبی CM_{1-r} -TPNF ها حاصل از برهم نهی همزمان r ، M-TPNF و همچنین تأثیر نقش پالایشگری ΔC ها می باشند از افت دامنه چشمگیری نسبت به بیناب های گذردهی نسبی هر یک از M-TPNF های اولیه برخوردار هستند. لذا، M-TPNF هایی که در آن ها تعداد دندانها کمتر و اندازه ارتفاع کوچک تر باشد، می توانند بهترین گزینه ها برای طراحی این پالایشگرها باشند.

دقت در نمودارهای شکل ۵ که حاصل از بررسی انجام شده در خصوص افزایش درصدی ΔC_1 می باشند، برای انتخاب اندازه صحیح ΔC_1 در هر پالایشگر مفروض ضروری است. رفتار نوسانی پلکانی موج و عملکردی کاواک گونه ΔC_1 که بر اثر افزایش درصدی آن بروز می کند، مبین عملکردهای یکسان پالایشگرها در طراحی های متفاوت است.

۴-۴ تأثیر تغییرات ΔC_1 بر بیناب گذردهی نسبی CM_{1-r} -TPNF با فرض ثابت بودن دیگر پارامترها تأثیر تغییرات ΔC_1 در بیناب گذردهی نسبی پالایشگر CM_{1-r} -TPNF بررسی شد. در شکل ۵ نمودارهای تغییرات طول موج های مرکزی بازه های پالایشی و نقاط بیشینه بیناب های گذردهی نسبی C3-4-6-TPNF ناشی از تغییرات درصدی ΔC_1 نمایش داده شده است. رفتار پلکانی تکرارشونده موجود مبین رفتار موج نسبت به پارامتر ΔC_1 و

درواقع، پالایشگر CM_{1-r} -TPNF را می توان به گونه ای طراحی نمود که فاصله بین M-TPNF های تشکیل دهنده آن در یکی از این بازه های تکرارشونده قرار بگیرد.

بحث و نتیجه گیری

همان گونه که در شکل های ۲ و ۴ دیده می شود M-TPNF ها به تنهایی قادر به تولید بازه های گذردهی و یا پالایشی مورد نظر به طور کامل نیستند. اما با توجه به بیناب های گذردهی CM_{1-r} -TPNF ها، شکل های ۳ و ۴ که از تأثیر عملکرد همزمان دو یا چند M-TPNF شکل گرفته اند، می توان محدوده های میان گذر و میان گذر مطلوب را تولید کرد. این محدوده های تولید شده از شدت دامنه و پهنای گذردهی مناسب برخوردارند در صورتی که این دو فاکتور در بیناب های گذردهی M-TPNF ها بزرگی و دقت کافی را ندارند. بنابراین نانوپالایشگرهای پلاسما مونیکی چنددندانه ای زنجیره ای (CM_{1-r} -TPNFs) که از کنارهم قرار گرفتن زنجیروار r پالایشگر از نوع M-TPNF شکل گرفته اند می توانند در فن آوری های پیشرفته و ساخت ابزار دقیق برای

References

1. Maier S. Plasmonics – Towards Sub-wavelength Optical Devices. *Current Nanoscience* 2005; 1: 17-22.
2. Kim K. Plasmonics - Principles and Applications. InTech.: 2012.
3. Sorger V., Oulton R., Ma R., Zhang X. Toward integrated plasmonic Circuits. *MRS Bull.* 2012; 37: 728-38.
4. Hu F., Yi H., Zhou Z. Band-pass plasmonic slot filter with band selection and spectrally splitting capabilities. *Opt. Exp.* 2011; 19: 4848-55.
5. Hu F., Zhou Z. Wavelength filtering and demultiplexing structure based on aperture-coupled plasmonic slot cavities. *J. Opt. Soc. Am. B* 2011; 28: 2518-23.
6. Tao J., Huang X. G., Lin X., Zhang Q., Jin X. A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with asymmetrical multipleteeth- shaped structure. *Opt. Exp.* 2009; 17: 13989-94.
7. Oskooi A., Roundy D., Ibanescu M., Bermel P., Joannopoulos J.D., Johnson S. G. MEEP: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method. *Compu. Phys. Commun.* 2010; 181: 687-702.
8. Maier S. Plasmonics: Fundamentals and Applications. Springer Science+Business Media LLC: New York, 2007.
9. Novotny L., Hecht B. Principles of Nano-Optics. Cambridge University Press: New York, 2006.
10. Jackson J. Classical Electrodynamics. John Wiley & Sons Inc.: New York, 1962.
11. Premaratne M., Pannipitiya A., Rukhlenko I. Analytical modeling of resonant cavities for plasmonic-slot-waveguide junctions. *IEEE Photon. J.* 2011; 3: 220-33.
12. Haroldo M., Pannipitiya T., Rukhlenko I., Agrawal G. Improved transmission model for metal-dielectric-metal plasmonic waveguides with stub structure. *Opt. Exp.* 2010; 18: 6191-204.
13. Pozar D. Microwave Engineering. Wiley: New York, 1998.
14. Zhang D. Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics. 2nd edn, Springer: Berlin, 2008.
15. Saeed F, Fatemi h, Khaksar A. Introducing and characterization of Multi-Teeth Plasmonic Nano Filters (M-TPNFs) and Chained Cascaded M-TPNFs, using FDTD and CE methods. 19th Iranian Annual Physics Conference: Birjand university, June 2013.
16. Sullivan D. Electromagnetic Simulation using FDTD. IEEE Press: New York, 2000.
17. Taflove A., Hagness S. C., Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. 3rd edn, Artech House Publishers: 2005.
18. Khaksar A, Fatemi H. Changes in the transmission properties of multi-tooth plasmonic nano-filters (M-TPNFs) caused by geometrical imperfection. *J Opt* 2012; 14: 085003-11.
19. Rakic A.D., Djuricic A.B., Elazar J.M., Majewski M.L., Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices *Appl. Opt.* 1998; 37: 5271-83.
20. Sheppard C, Fatemi H, Gu M. The Fourier optics of near-field microscopy. *Scanning* 1995; 17: 28-40.
21. Yariv A, Yeh P. Photonics- Optical Electronics in Modern Communications. 6nd edn, Oxford University Press: New York, 2007.