لیزر در پزشکی؛ ۱۳۹۲، دوره ۱۰، شماره ۲، ۳ و ٤، صفحات: ۲۳-۱۶ .

مقاله پژوهشی

طراحی نانوپالایشگر پلاسمونیکی چنددندانه‌ای زنجیره‌ای (CM_{1-r} -TPNF) برای به‌کارگیری در افزاره‌های ریزساختار پزشکی

فریبا سعید [۱]
حسن فاطمی [۲]

خلاصه

مقدمه: در این مقاله به طراحی پالایشگر جدیدی به نام نانوپالایشگر پلاسمونیکی چند دندانه‌ای زنجیره‌ای (CM_{1-r} -TPNF) پرداخته شده است که به‌دلیل داشتن عملکرد گذردهی زیر طول‌موجی 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 MEMS ها به‌کارگرفت.

روش بررسی: این نانوپالایشگر با مدل‌سازی به‌روش تفاضل محدود در حوزهٔ 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 قرارگرفتن زنجیروار r نانوپالایشگر پلاسمونیکی چند دندانه‌ای شکل می‌گیرد و در محدودهٔ 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 ریزساختار فوتونیکی بسیار مناسب است. در بیناب گذردهی نسبی، آن دو فاکتور شدت دامنه و پهنای باریکهٔ 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 موج رفتاری نوسانی پلکانی و عملکردی کاواک‌گونه خواهند داشت.

واژه‌های کلیدی: نانوپالایشگرهای پلاسمونیکی، نانوپالایشگرهای پلاسمونیکی چنددندانه‌ای، روش تفاضل محدود در حوزهٔ زمان

۱. *کارشناس ارشد فوتونیک گرایش الکترونیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.*

۲. *استادیار فیزیک، دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.*

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

مقدمه

انسان از دیرباز تاکنون سعی در هرچه کوچک‌ترکردن ابعاد هندسی ابزار تبدیل و انتقال انواع انرژی‌ها برای کاربردهای گوناگون داشته است. عواملی چون شتاب انقلاب صنعتی، رشد فناوری‌های نانو و همچنین دست‌یافتن به تکنولوژی ساخت افزاره‌های نانو اپتیکی زمینه را برای گسترش صنایع پیشرفتهٔ 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 نانوپلایشگرهای پلاسمونیکی پرداخته شده است که برای به‌کارگیری در ساخت دستگاه‌های دقیق پزشکی طراحی شده و با شبیه‌سازی در فضای مجازی چگونگی عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است.

درحال‌حاضر نانوپلایشگرهای پلاسمونیکی[1] میان‌گذر و میان‌نگذر به‌دلیل داشتن عملکرد گذردهی زیر طول‌موجی[2] امواج الکترومغناطیس آن‌ها در بسیاری از صنایع پیشرفتهٔ فوتونیکی کاربرد فراوان دارند. باتوجه به‌همین ویژگی می‌توان این پالایشگرها را در ابعاد هندسی بسیار ریز، نانومتر، کوچک‌تر از طول‌موج ورودی و بدون ایجاد پدیدهٔ پراش و اتلاف انرژی حاصل از آن [۱و۲] طراحی و اجرا کرد تا نواحی میان‌گذر بسیار باریک[3] و میان‌نگذر بسیار وسیع[4] را در محدوده‌های فرکانسی مورد نظر و با دقت مطلوب تولید نمایند[۳]. لذا باتوجه به ضرورت رشد فن‌آوری‌های به‌کاررفته در ساختار ابزار و ادوات پزشکی دقیق و کم حجم، مانند MEMSها، می‌توان از این ویژگی در زمینهٔ طراحی و تولید این افزاره‌ها بیش‌ازپیش بهره برد. از این بین، نانوپلایشگرهای پلاسمونیکی چند دندانه‌ای و یا M-TPNFs[5] برای تولید نواحی گذردهی و یا پالایشی محدودهٔ مادون قرمز که برای تشخیص و درمان برخی بیماری‌ها حائز اهمیت است، مناسب به‌نظر 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 نانوپلایشگرهای پلاسمونیکی چند دندانه‌ای زنجیره‌ای یا CM_{1-r}-TPNF[6] 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 پلاسمونیکی به‌روش عددی اختلاف محدود در حوزهٔ زمان یا FDTD[7] [۴-۶] با دقت $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2nm$ انجام شده است و در مرحلهٔ کدنویسی به‌دلیل تقارن ساختار هندسی مسئله بدون اینکه در نحوهٔ عملکرد این افزاره اختلالی ایجاد شود، محاسبات در فضای دوبُعدی انجام شده است تا طراحی و اجرای برنامه‌ها زمانبری کمتری داشته باشند. قسمتی از این مراحل با کمک محیط نرم‌افزاری Meep[8] [۷] که توسط دانشگاه MIT به‌صورت کدباز[9] و مناسب برای محیط‌های پلاسمونیکی ارائه شده، صورت گرفته است.

بررسی‌های مربوط به نحوهٔ عملکرد CM_{1-r}-TPNF و چگونگی ایجاد، اصلاح و بهینه‌سازی بیناب‌های گذردهی نسبی پالایشگر براساس مدل دروده-لورنتس[10] [۸-۱۰] و با استفاده از اصل برهم‌نهی[11] به‌طور هم‌زمان انجام پذیرفته است و برای اطمینان از درستی عملیات، نتایج به‌دست آمده با نتایج حاصل‌از روش مدل هم‌ارزمداری یا CEM[12] که براساس تئوری خطوط انتقال مخابراتی عمل می‌کند[۱۱-۱۴]، تطبیق داده شده است[۱۵].

در روش عددی، اختلاف محدود در حوزهٔ زمان دو معادلهٔ کرل ماکسول به‌همراه معادلهٔ چگالی شار به‌شکل تفاضل محدود در هر دو حوزهٔ فضا و زمان تبدیل می‌شوند [۱۶و۱۷]. در این معادلات میدان الکتریکی و مغناطیسی برحسب میدان‌ها در زمان قبلی در هر لحظه محاسبه و بازنویسی می‌شوند. اگر k نشان‌دهندهٔ موقعیت و nt نماد زمان باشند، معادلات (۱) و (۲) فرم اختلاف محدود در حوزهٔ زمان مؤلفهٔ x آن‌ها هستند. به‌طور مشابه این معادلات برای پنج مؤلفهٔ باقی‌مانده نیز نوشته شده است و برای گام‌های زمانی بعدی و نقاط مکانی دیگر فضا در زمان واحد حل می‌شوند.

$$E_x^{n_t+\frac{1}{2}}(k) = E_x^{n_t-\frac{1}{2}}(k) - \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta x}\left[H_y^{n_t}(k+\frac{1}{2}) - H_y^{n_t}(k-\frac{1}{2})\right] \quad (۱$$

$$H_y^{n_t+1}(k+\frac{1}{2}) = H_y^{n_t}(k+\frac{1}{2}) - \frac{\Delta t}{\mu \Delta x}\left[E_x^{n_t+\frac{1}{2}}(k+1) - E_x^{n_t+\frac{1}{2}}(k)\right] \quad (۲$$

در مدل هم‌ارزمداری که براساس تئوری خطوط انتقال مخابراتی عمل می‌کند و هم‌ارزمداری ساختار پالایشگرها را شبیه‌سازی می‌کند، ماتریس

1. Plasmonic Nano Filter
2. Sub-Wavelength
3. Narrow-band
4. Broad-band
5. Multi-Teeth Plasmonic Nano Filters
6. Chain Cascaded Multi-Teeth Plasmonic Nano Filters
7. Finite Diference Time Domain Method
8. MIT Electromagnetic Equation Propagation
9. Open Source
10. Drude-Lorentz model
11. Super position principle

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.

12. Circuit Equivalent Method

گذردهی نسبی هر یک از دندانه‌های M-TPNF به‌صورت زیر است:

(۳)

$$T = A(L)B(Z^{(1)}_{Tooth})A(\Delta_1)B(Z^{(i)}_{Tooth})A(\Delta_i)\dots B(Z^{(i+1)}_{Tooth})\dots A(\Delta_{M-1})B(Z^{(M)}_{Tooth})A(L)$$

$$\mathbf{A}(z)=\begin{pmatrix}\exp(-\mathrm{j}\beta z) & 0\\ 0 & \exp(-\mathrm{j}\beta z)\end{pmatrix} \quad (۴)$$

$$\mathbf{B}(Z^{(i)}_{Tooth})=\begin{pmatrix}1+\dfrac{Z^{(i)}_{Tooth}}{2Z_{MDM}} & -\dfrac{Z^{(i)}_{Tooth}}{2Z_{MDM}}\\ \dfrac{Z^{(i)}_{Tooth}}{2Z_{MDM}} & 1-\dfrac{Z^{(i)}_{Tooth}}{2Z_{MDM}}\end{pmatrix} \quad (۵)$$

$$Z_{MDM}=\frac{\beta(h)h}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_1} \quad (۶)$$

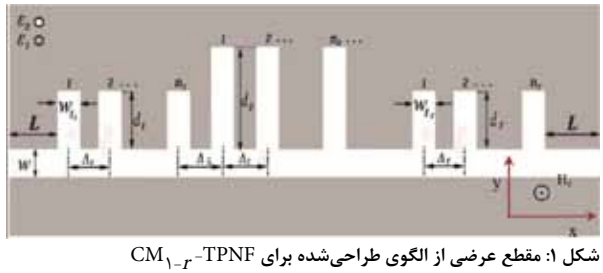
$$Z_{Tooth}=\frac{\beta(w)w\sqrt{\varepsilon_1}-j\sqrt{\varepsilon_2}\tan\beta(w)d}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_1\sqrt{\varepsilon_2}-j\sqrt{\varepsilon_1}\tan\beta(w)d} \quad (۷)$$

کـه در آن ماتریـس انتقـال امـواج الکترومغناطیسـی توصیف‌کنندهٔ انتشـار موج در قسـمت‌های ابتدایی و انتهایی موجبر، $A(\Delta_i)$ ماتریس مربـوط به انتقـال در فاصله‌های بیـن دندانه‌های موجبر، $B(Z^{(i)}_{Tooth})$ تـوصـیـف‌کـنـنـده جفت‌شـدگی بین مـوج‌های ورودی و بازتابشـی مربـوط به هریک از دندانه‌ها و Z_{MDM} و Z_{Tooth} به‌ترتیب امپدانس‌های هم‌ارزمداری برای موجبر و هریک از دندانه‌ها می‌باشند[۱۵].

یافته‌ها

۱. ساختار هندسی $CM_{1\text{-}r}$-TPNF

شـکل ۱ مقطـع عرضـی از الگـوی طراحی‌شـده بـرای یـک نانوپالایشـگر پلاسـمونیکی چنددندانـه‌ای زنجیره‌ای را نشـان می‌دهد. $CM_{1\text{-}r}$-TPNF از کنارهـم قرارگرفتـن زنجیروار r پالایشـگر از نوع M-TPNF تشکیل می‌شود.



شکل ۱: مقطع عرضی از الگوی طراحی‌شده برای $CM_{1\text{-}r}$-TPNF

اگر M-TPNFهای مفـروض n2-TPNF، n1-TPNF، ... و nr-TPNF باشـند، به‌ترتیب از ابتدای پالایشگر $CM_{1\text{-}r}$-TPNF هریک دارای n1 ،n2 ... nr دندانـهٔ عمـود بـر موجبـر MDM که با فاصلهٔ Δc_1 ، Δc_2 ،... ، Δc_{r-1} از یکدیگـر قـرار دارنـد، می‌باشـند. ارتفاع و پهنـای دندانه‌ها و همچنیـن فاصلهٔ بین دندانه‌های مجـاور در هریک از این M-TPNFها بـا یکدیگر برابرند. پهنای دندانه‌ها به‌ترتیب از ابتدای موجبر برابر $w_{t_1}, w_{t_2}, \dots, w_{t_r}$ ، ارتفاع دندانه‌ها $d_1, d_2, \dots, d_r$ و فاصلـهٔ هـر دندانه با دندانهٔ مجـاورش $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_r$ تعریف شـده اسـت. اندازهٔ فاصلهٔ اولین و آخرین دندانه در $CM_{1\text{-}r}$-TPNF از ابتدا و انتهای موجبر L و پهنای موجبر MDM برابر با w می‌باشـد. در این سـاختار، مـادهٔ دی‌الکتریک (هوا) با ضریب گذردهـی ε_1 و فلز (نقره) با ضریب گذردهی ε_2 معین شـده‌اند. ε_2 از مدل دروده-لورنتس و از رابطهٔ ۱ با توجه به پارامترهای تجربی به‌دسـت آمده اسـت[۱۵، ۱۸و۱۹]. موج الکترومغناطیس ورودی، موج گوسـی است که در محدودهٔ طول‌موج‌های ۴۰۰ نانومتر تا ۲ میکرومتر مورد بررسـی قرار گرفته اسـت و می‌تواند تا محدودهٔ ۵ میکرومتر گسترش پیدا کند.

$$\varepsilon(\omega)=1-\frac{\omega_p^{\,2}}{(\omega-i\gamma)\omega}+\sum_{n=1}^{5}\frac{f_n\omega_n^{\,2}}{\omega_n^{\,2}-\omega^2-i\gamma_n\omega} \quad (۸$$

۲. چگونگی به‌دست‌آوردن بیناب گذردهی نسبی $CM_{1\text{-}r}$-TPNF

با توجه به این‌که بیناب گذردهی نسبی هر پالایشگر تأثیر پاسخ محیطی آن سیسـتم بر مـوج الکترومغناطیس ورودی می‌باشـد و ماتریس انتقال سیستم‌های اپتیکی چندگانه از حاصل‌ضرب ماتریس‌های انتقال هریک از اجزای تشـکیل‌دهندهٔ آن‌ها شکل می‌گیرد، اگر تأثیر برهم‌نهی همزمان r پالایشگر M-TPNF که به‌صورت زنجیروار چیده شده‌اند، شکل ۱ مورد نظر باشد، بنابراین می‌توان با ضرب کردن بیناب‌های گذردهی نسبی آن‌ها در یکدیگر و اضافه کردن تأثیر های شـرکت‌کننده در سـاختار هندسی پالایشگر، بیناب گذردهی نسبی آن‌را به‌دست آورد.

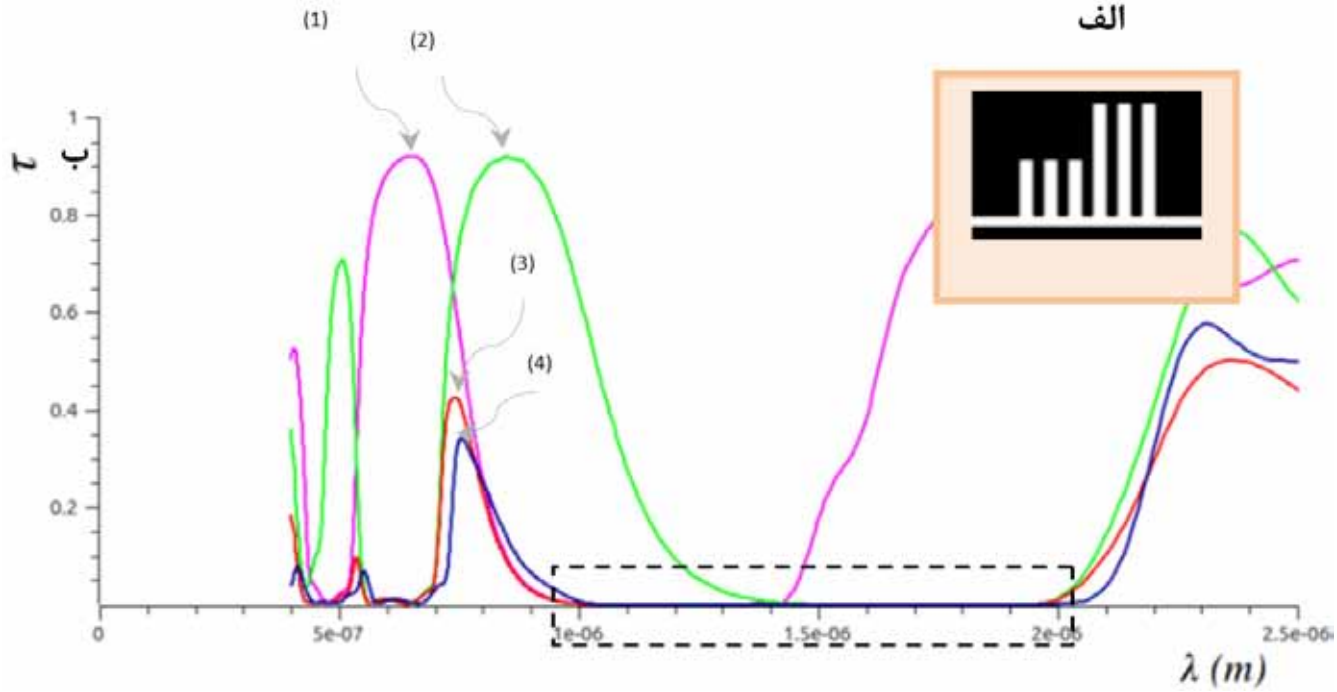
باتوجه به مقالاتی که پیش از این ارائه شده‌اند[۱۸و۲۰]، در هر پالایشگر M-TPNF هریک از دندانه‌ها و فاصلهٔ بین دندانه‌های مجاور، Δ ، همانند کاواک‌های فابری- پرو با اندازهٔ آینه‌های محدود عمل می‌کنند و می‌توانند طی فرآیند تشـدید، برخی فرکانس‌ها و همچنیـن هارمونیک‌های آن‌ها را جـذب کنند و شـدت انرژی موج الکترومغناطیـس را در فرکانس‌های مذکـور تضعیف نماینـد. البته این موضـوع در $CM_{1\text{-}r}$-TPNF برای Δ_r و Δc_{r-1} $(r=1.2.3, \dots)$ کـه به‌ترتیـب فاصلـهٔ بیـن دندانه‌هـا و M-TPNFها هستند نیز صادق می‌باشد.

بدیهی اسـت سیسـتم مطلوب پالایشگری سیستمی اسـت که بتواند بیشـترین جذب و یـا گذردهـی را در محدوده‌های پالایشـی مورد نظر داشـته باشـد. با درنظر گرفتن کاربردهای متفاوت، درمواردی لازم است در یـک محدودهٔ پالایشـی گسـترده تنها ناحیهٔ بسـیار باریکـی از بازهٔ

فرکانسی اجازهٔ گذردهی داشته باشد یا برعکس در برخی موارد ایجاد محدودهٔ پالایشی گسترده‌تری موردکاربرد می‌باشد. درهرصورت معمولاً ابتدا محدوده‌ای تقریبی از بازهٔ پالایشی مطلوب را تولید می‌کنند و سپس طی فرآیندی برنامه‌ریزی‌شده به اصلاح آن می‌پردازند تا بازهٔ پالایشی مورد نظر حاصل شود. البته این روند برای بهینه‌سازی نواحی پالایش‌شده 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. درادامه، برای واضح‌تر شدن مطلب با دو مثال کاربردی نحوهٔ عملکرد CM_{1-r}-TPNF برای تولید پالایشگرهای میان‌گذر و میان‌نگذر توضیح داده شده است.

۳-۱- استفاده از CM_{1-r}-TPNF برای پالایش پهنای گسترده‌ای از بازهٔ فرکانسی در طول‌موج‌های بخصوص

در این‌مرحله به‌عنوان مثال، طراحی پالایشگر میان‌نگذر برای ایجاد پهنای پالایشی بین طول‌موج‌های ۱ تا ۲/۳ میکرومتر موردنظر می‌باشد. برای این کار مشاهده می‌شود هم‌پوشانی بینابهای گذردهی نسبی پالایشگرهای 3-TPNF با ارتفاع دندانه‌های ۲۰۰ نانومتر و 3-TPNF با ارتفاع دندانه‌های ۳۰۰ نانومتر می‌توانند این محدوده را پوشش دهند. حاصل‌ضرب این دو بینابهای نتیجهٔ برهم‌نهی این دو 3-TPNF می‌باشد که در شکل۲ نمایش داده شده است. درصورتی‌که اثر Δc_1 اضافه شود، بینابهای گذردهی نسبی C3-3-TPNF به‌دست می‌آید (بینابهای ۴).

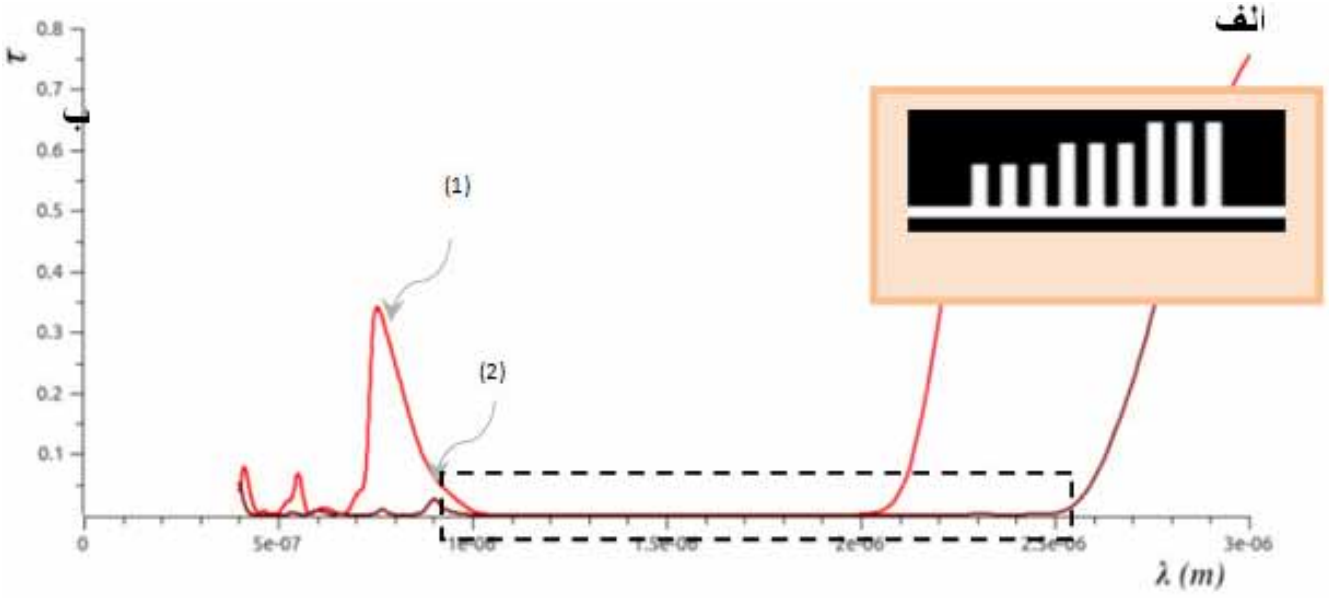


شکل ۲: الف) مقطع عرضی از C3-3-TPNF ب) بینابهای گذردهی نسبی 3-TPNF نخست بینابهای (۱)، 3-TPNF دوم بینابهای (۲)، حاصل برهم‌نهی آن‌ها بینابهای (۳) و C3-3-TPNF بینابهای(۴)، درازای $w = w_{t_1} = w_{t_2} = 50$ nm , L=200 nm , $\varepsilon_1=1,\varepsilon_2=\varepsilon_{Ag}$ و $\Delta c_1 = \Delta_1 = \Delta_2 = 100$ nm می‌باشند.

در این پالایشگر فرض بر این است فاصلهٔ بین 3-TPNF نخست و 3-TPNF دوم (یا) برابر با فاصلهٔ بین هردو دندانهٔ مجاور در هریک از M-TPNFها (یعنی؛ $\Delta c_1 = \Delta_1 = \Delta_2$) باشد. با توجه به اندازهٔ یکسان Δ_1، Δ_2 و Δc_1 ، این پارامترها از عملکرد مشابهی دررابطه با انتخاب و حذف طول‌موج‌های مناسب برخوردارند. بنابراین همان‌گونه‌که در شکل۲ دیده می‌شود، بینابهای (۴) نسبت به بینابهای (۳) از افت دامنهٔ گذردهی بیشتری در طول بازهٔ فرکانسی برخوردار است.

برای پهن‌تر نمودن بازهٔ پالایشی کافی‌است M-TPNFهای مناسب دیگری را به سیستم اضافه کرد تا بینابهای گذردهی نسبی آن‌ها بتواند باقی‌ماندهٔ بازهٔ فرکانسی مورد نظر را پالایش دهد.

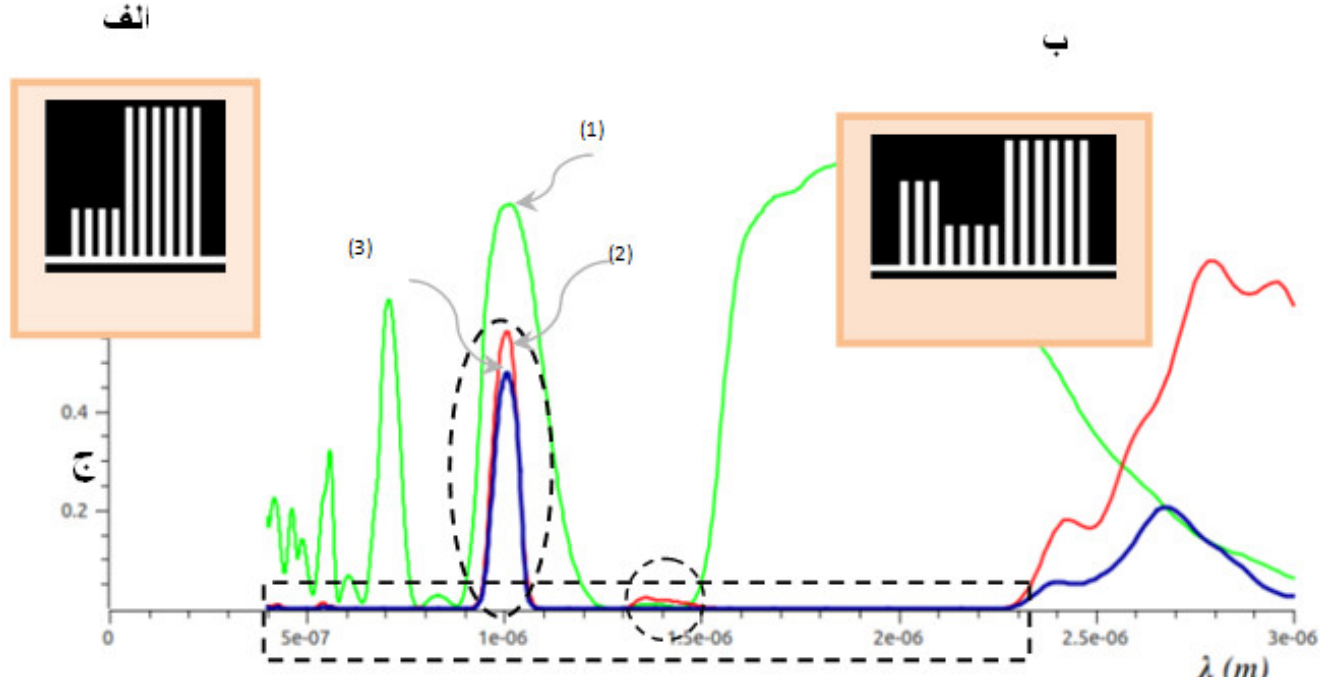
بدیهی است با توجه به افزایش تعداد دندانه‌ها، تعداد Δ_rها و همچنین Δcها کیفیت فرآیند پالایشگری افزایش می‌یابد و دامنهٔ بینابهای گذردهی کاهش پیدا می‌کند. همان‌گونه‌که در شکل (۳- الف) نشان داده شده است یک پالایشگر 3-TPNF دیگر با ارتفاع دندانه‌های ۴۰۰ نانومتر به مجموعهٔ پالایشگر شکل (۲- الف) اضافه شده است. در شکل (۳- ب) با مقایسهٔ بینابهای گذردهی نسبی C3-3-TPNF، بینابهای (۱)، و C3-3-3-TPN، بینابهای (۲)، می‌توان به‌سهولت به محدودهٔ پالایشی پهن‌تر اشاره نمود.



شکل۳: الف) مقطع عرضی از C3-3-3-TPNF ب) بیناب‌های گذردهی نسبی C3-3-TPNF بیناب (۱) و C3-3-3-TPNF بیناب (۲)

۳-۲- استفاده از CM_{1-r}-TPNF برای گذردهی باریکه‌ای از بازهٔ فرکانسی در طول‌موج‌های بخصوص

طراحی پالایشگر میان‌گذری که باریکهٔ گذردهی را در طول‌موج ۱ میکرومتر و با دامنهٔ گذردهی نسبی حداقل ۴۵ درصد به‌گونه‌ای ایجاد کند که گذردهی طول‌موج‌های پیرامون آن صفر باشد. شکل (۴-ج) بیناب گذردهی C4-6-TPNF، بیناب (۳) را به‌ازای d_1=350 nm و d_2=1100 nm نشان می‌دهد. همان‌گونه‌که دیده می‌شود ناحیهٔ پالایشی از بازهٔ فرکانسی در تمام طول‌موج‌ها از دامنهٔ صفر برخوردار نیست. بنابراین برای به‌دست آوردن محدودهٔ پالایشی دقیق‌تر با دامنهٔ صفر دوباره از اصل برهم‌نهی استفاده می‌شود تا بتوان گسترهٔ پالایشی و باریکهٔ گذردهی مورد نظر را ایجاد نمود.



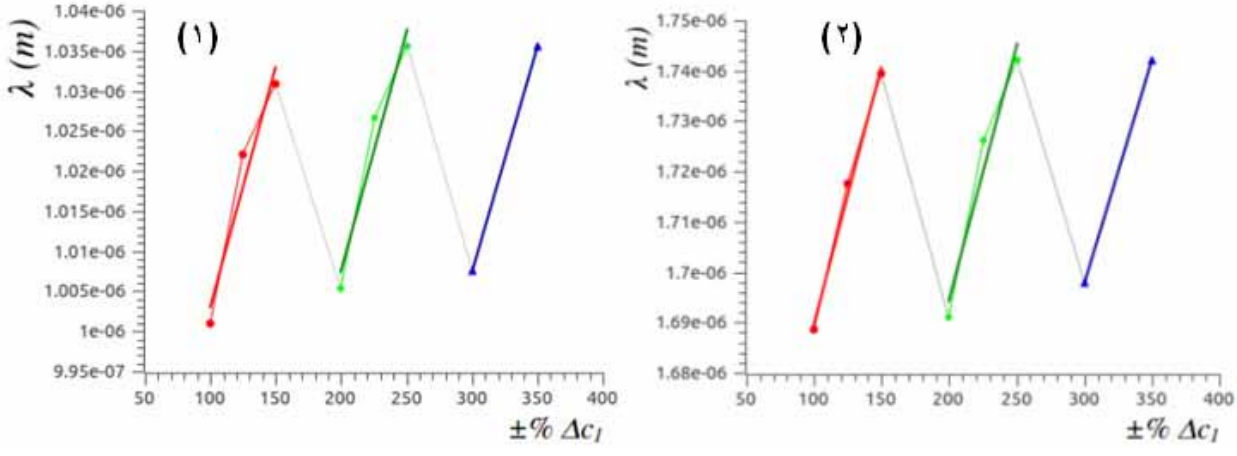
شکل۴: الف) مقطع عرضی از C4-6-TPNF ب) مقطع عرضی از C3-4-6-TPNF ج) بیناب‌های گذردهی نسبی 3-TPNF بیناب (۱)، C4-6-TPNF بیناب (۲) و C3-4-6-TPNF بیناب (۳) درازای d_1 = 740nm , d_2 = 350nm , d_3 = 1100nm

باتوجه به شـکل (۴-ج) که بیناب گذردهی نسـبی C3-4-6-TPNF بیناب(۳) را از برهم‌نهی بیناب‌های گذردهی نسبی ۳-TPNF بیناب(۱) با C4-6-TPNF بیناب(۲) نشان می‌دهد، ملاحظه می‌شود اندازهٔ دامنهٔ بازهٔ پالایشـی حاصل صفر و همچنین اندازهٔ دامنهٔ ناحیهٔ باریک گذردهی با بزرگی مطلوب می‌باشد.

۴-۴ تأثیر تغییرات Δc_1 بر بیناب گذردهی نسبی $CM_{1\text{-}r}$-TPNF

با فرض ثابت بودن دیگر پارامترها تأثیر تغییرات Δc_1 در بیناب گذردهی نسـبی پالایشگر **$CM_{1\text{-}r}$-TPNF** بررسی شـد. در شکل۵ نمودارهای تغییرات طول‌موج‌های مرکزی بازه‌های پالایشی و نقاط بیشینهٔ بیناب‌های گذردهـی نسـبی C3-4-6-TPNF ناشـی از تغییـرات درصدی Δc_1 نمایش داده شـده است. رفتار پلکانی تکرارشوندهٔ موجود مبین رفتار موج نسـبت به پارامتر Δc_1 و عملکرد کاواک‌گونهٔ فضای Δc_1 می‌باشد. اگر R اندازهٔ درصد اضافه‌شـده به Δc_1 باشـد در درصدهای کمتر و یا مساوی با ۱۰۰ طول موج مرکزی ناحیهٔ پالایشـی و نقطهٔ بیشـینهٔ باریکهٔ گذردهی به سـمت طول‌موج‌های بلندتر و در درصدهای بیشـتر از ۱۰۰ به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شوند. این روند جابه‌جایی در درصدهای بیشتر نیز دیده می‌شود.

درواقع، پالایشـگر $CM_{1\text{-}r}$-TPNF را می‌توان به‌گونه‌ای طراحی نمود که فاصلهٔ بین M-TPNFهای تشکیل‌دهندهٔ آن در یکی از این بازه‌های تکرارشونده قرار بگیرد.



شکل۵: نمودارهای تغییرات طول‌موج‌های مرکزی محدوده‌های پالایشی (۱) و تغییرات نقطهٔ بیشینه (۲) برروی بیناب گذردهی نسبی C3-4-6-TPNF بازای تغییرات درصدی Δc_1 $(\pm\%\,\Delta c_1)$

بحث و نتیجه‌گیری

همان‌گونه‌کـه در شـکل‌های ۲ و ۴ دیـده می‌شـود M-TPNFهـا به‌تنهایـی قادر به تولید بازه‌های گذردهی و یا پالایشـی مورد نظر به‌طور کامل نیسـتند. اما با توجه به بیناب‌های گذردهی $CM_{1\text{-}r}$-TPNFها، شـکل‌های ۳ و ۴ کـه از تأثیر عملکرد همزمـان دو یا چند M-TPNF شـکل گرفته‌اند، می‌توان محدوده‌های میان‌گـذر و میان‌نگذر مطلوب را تولید کرد. این محدوده‌های تولید شـده از شدت دامنه و پهنای گذردهی مناسـب برخوردارند درصورتی‌که این دو فاکتـور در بیناب‌های گذردهی M-TPNFهـا بزرگی و دقت کافی را ندارند. بنابراین نانوپالایشـگرهای پلاسـمونیکی چنددندانـه‌ای زنجیـره‌ای ($CM_{1\text{-}r}$-TPNFs) کـه از کنارهـم قرارگرفتـن زنجیـروار r پالایشـگر از نوع M-TPNF شـکل گرفته‌اند می‌توانند در فن‌آوری‌های پیشـرفته و سـاخت ابزار دقیق برای تولیـد، اصـلاح و بهینه‌سـازی محدوده‌هـای میان‌گذر بسـیار باریک و همچنین محدوده‌های میان‌نگذر بسیار وسیع، با دقت نانومتر، به‌کار روند.

البتـه باتوجـه به اینکه بیناب‌های گذردهی نسـبی $CM_{1\text{-}r}$-TPNF هـا حاصل از برهم‌نهی همزمـان r ، M-TPNF و همچنین تأثیر نقش پالایشگری Δcها می‌باشند از افت دامنهٔ چشمگیری نسبت به بیناب‌های گذردهی نسـبی هریـک از M-TPNFهـای اولیه برخوردار هسـتند. لـذا، M-TPNFهایی که در آن‌ها تعداد دندانه‌هـا کمتر و اندازهٔ ارتفاع کوچک‌تر باشـد، می‌توانند بهترین گزینه‌ها برای طراحی این پالایشگرها باشند.

دقت در نمودارهای شکل ۵ که حاصل از بررسی انجام شده درخصوص افزایش درصدی Δc_1 می‌باشـند، برای انتخاب اندازهٔ صحیح Δc_1 در هر پالایشـگر مفروض ضروری است. رفتار نوسـانی پلکانی موج و عملکردی کاواک‌گونـه Δc_1 کـه براثـر افزایش درصـدی آن بروز می‌کنـد، مبین عملکردهای یکسان پالایشگرها در طراحی‌های متفاوت است.

References:

1. Maier S. Plasmonics – Towards Subwavelength 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 Wiely & 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. 3nd 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., Djurisic 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. Photonocs- Optical Electronics in Modern Communications. 6nd edn, Oxford University Press: New York, 2007.