[5] P. N. Parsad, Nanophotonics, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004.
[6] C. F. Bohren and D. R. Huffman, Absorption and Scattering of Light by Small Particles, John Wiley & Sons, 1983.
[7] S. A. Maier, P. G. Kik, and H. Atwater, "Optical pulse propagation in metal nanoparticle chain waveguide," Phys. Rev. B., vol. 67, 205402, 2003.
[8] K. Li, M. I. Stockman, and D. J. Bergman, "Self-similar chain of metal nanospheres as an efficient nanolens," Phys. Rev. Lett., vol. 91, 227402, 2003.
[9] D. R. Smith, J. B. Pendry, and M. C. K. Wiltshire, "Metamaterial and negative refractive index," Science, vol. 305, pp. 788-792, 2004.
[10] V. M. Shalaev, W. Cai, U. K. Chettiar, et. al., "Negative index of refraction in optical metamaterials," Opt. Lett. 30, 3356-3358, (2005).
[11] H. Ditlbacher, J. R. Krenn, G. Schider, A. Leitner, and F. R. Aussenegg, "Two-dimensional optics with surface plasmon polaritons," Appl. Phys. Lett. 81, 1762, (2002).
[12] C. Jung, S. Yee, and K. Kuhn, "Integrated optics waveguide modulator based on surface plasmon resonance," IEEE J. Lightwav. Technol., vol. 12, pp. 1802, 1994.
[13] S. I. Bozhevolnyi, V. S. Volkov, E. Devaux, J.-Y Laluet, and T. W. Ebbesen, "Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators," Science, vol. 440, pp. 508-511, 2006.
[14] M. L. Brongersma, J. W. Hartman, and H. A. Atwater, "Electromagnetic energy transfer and switching in nanoparticle chain arrays below the diffraction limit of light," Phys. Rev. B, vol. 62, pp. 356, 2000.
[15] T. Pakizeh, M. S. Abrishamian, N. Granpayeh, A. Dmitriev, M. Käll, "Magnetic-field enhancement in gold nanosandwiches," Opt. Express, vol. 14, pp. 8240-8246, 2006.
[16] A. Dmitriev, T. Pakizeh, M. Käll, and D. S. Sutherland, "Surface plasmon hybridization in gold-silica-gold nanosandwiches," Small 3, 294-299, (2006).
[17] A. Taflove and S. C. Hagness, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Artech House, 2005.
[18] D. M. Sullivan, Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method, IEEE Press, 2000.
[19] D. F. Kelly and R. J. Luebbers, "Piecewise Linear Recursive Convolution for Dispersive Media Using FDTD," IEEE Trans. Antenna Propagat., vol. 44, pp. 792, 1996.

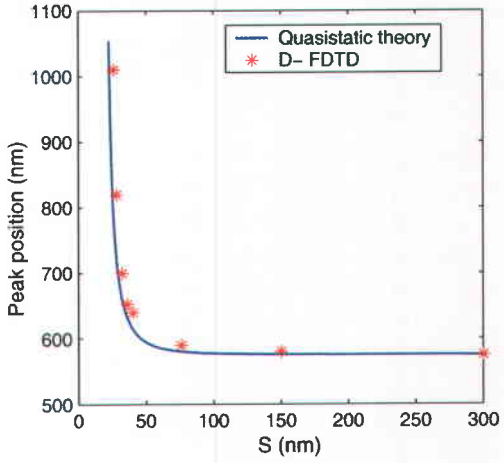
توکل پاکیزه، متولد ۱۳۵۶ در همدان، در سال ۱۳۸۵ دکترای خود را در رشته مهندسی برق – مخابرات از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی با درجه عالی دریافت کرد. ایشان دوره فوق دکتری خود را از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۸ در رشته نانوفوتونیک و نانواپتیک در دانشگاه صنعتی چالمرز – سوئد گذرانید. از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۴ ایشان به عنوان پژوهشگر در گروه فن‌آوری ارتباطات نوری در مرکز تحقیقات مخابرات ایران مشغول شده بود. جایزه دانشمند جوان (YSA) در تئوری الکترومغناطیس در سال ۱۳۸۳ از طرف سازمان بین المللی URSI در سمپوزیم EMT-S در ایتالیا به او تعلق گرفت. دکتر پاکیزه در زمینه‌های نانوپلاسمونیک، الکترومغناطیس، نانوفوتونیک، نور موجی و ارتباطات نوری فعالیت‌های پژوهشی می‌کند.

محمد صادق ابریشمیان در سال ۱۳۲۵ در همدان متولد شد. مهندسی مخابرات را در سال ۱۳۵۰ و کارشناسی ارشد را در سال ۱۳۵۷ از دانشگاه نورتروپ آمریکا اخذ نمود. دوره دکترا را در دانشگاه کالیفرنیا – ایروایین و دانشگاه برادفورد انگلستان بپایان رسانید. از سال ۱۳۵۲ تا کنون در استخدام رسمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بوده و اکنون دانشیار گروه مخابرات آن دانشگاه هستند و بتدریس و تحقیق مشغول می باشند. ایشان تا کنون حدود ۲۴ مقاله در مجلات علمی– پژوهشی بین‌المللی و ۳۰ مقاله در کنفرانس‌ها ارائه و به چاپ رسانیده‌اند. گرایش‌های مورد علاقه ایشان، پراش امواج، روش‌های عددی در الکترومغناطیس و فوتونیک کریستال‌ها می‌باشد.

نصرت ا... گرانپایه متولد ۱۳۳۱ تهران، مدرک-های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای خود را به ترتیب از دانشکده مخابرات، دانشکده صدا و سیما و دانشکده برق دانشگاه NSW استرالیا در سال‌های ۱۳۵۴، ۱۳۵۹ و ۱۳۷۶ به دست آورد. در سال ۱۳۵۴ به دلیل شاگرد اول بودن به عنوان کارشناس آموزشی در دانشکده مخابرات استخدام شد. پس از دریافت مدرک کارشناسی ارشد و دکترا به ترتیب به رتبه مربی و استادیار ارتقاء یافت. از سال ۱۳۵۹ به طور همزمان به کار تدریس و تحقیق مشغول بوده‌است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه‌ی وی فیبر و ادوات مخابرات نوری، تقویت کننده‌های فیبرنوری، اثرات غیر خطی در فیبر نوری و ... بوده است، که منجر به چاپ بیش از ۱۸ مقاله در مجله‌های علمی و ۵۰ مقاله در کنفرانس‌های داخلی و خارجی شده‌است. گرانپایه عضو انجمن‌های مهندسی برق و الکترونیک ایران و اپتیک و فوتونیک ایران، IEEE و انجمن فوتونیک IEEE است.

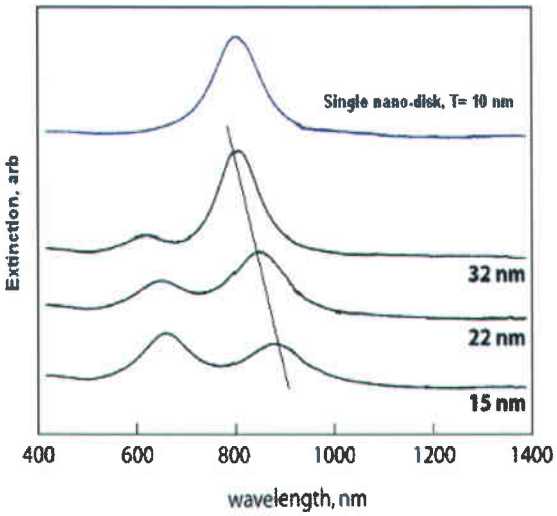
[Downloaded from ijict.itrc.ac.ir on 2024-04-16]

شکل (۶) نتایج آزمایشگاهی بدست آمده برای پاسخ‌های فرکانسی نانوفیلترهای ساخته شده با روش توصیفی بالا را برای چندین حالت (با تغییر فاصله بین دو نانودیسک از ۳۲ به ۱۵ نانومتر) نشان می‌دهد. برای نمونه طیف پاسخ فرکانسی یک تک نانودیسک طلایی با قطر ۱۰۰ نانومتر و ضخامت ۱۰ نانومتر نیز در شکل آورده شده است. حالت نوسانی و فیلتری در ساختار و شیفت محل قله نوسان پلاسمون‌های تحریک شده برروی سطح فلزی نانودیسک‌ها، به سمت طول‌موج‌های بلندتر با تغییر فاصله زوج نانودیسک در شکل (۶) مشخص است. همانطوریکه در شکل (۳c) نشان داده شده، ساختار ساخته شده از چندین زیرنانوساختار (نانوفیلتر) به صورت یک آرایه نامنظم تشکیل شده است. فاصله ی بین زیرنانوساختارها از هم حدود ۱۵۰-۲۰۰ نانومتر تخمین زده می شود. از اینرو تزویج الکترومغناطیسی ضعیفی بین نزدیکترین آنها وجود دارد که باعث افزایش میرایی نوسان مودهای الکترومغناطیسی شده و در نتیجه پهن تر شدن عرض باند می شود.



شکل ۵: تنظیم شیفت قله نوسان ساختار با تغییر فاصله دو نانودیسک (S). محاسبه شده با روش D-FDTD و مقایسه شده با تئوری تقریب الکتریسیته شبه‌ساکن.

در محاسبه های FDTD تنها یک نانوفیلتر در نظر گرفته شده و بنابراین این تزویج ضعیف در نظر گرفته نشده است. قابل ذکر است که اگر یک آرایه منظم با تناوب مشخص از نانوفیلترها فرض کنیم، تزویج مذکور که در حوزه ی میدان دور می باشد منجر به ظهور مرتبه های تفرق در پاسخ طیفی ساختار می شود و نمی توان از آن صرف نظر کرد. ولی در یک آرایه ی نامنظم اثرات تزویج بین زیرنانوساختارها قابل صرفنظر کردن است. تغییر اندازه کل ساختار برروی پاسخ فرکانسی تأثیر می‌گذارد. افزایش قطرهای نانودیسک‌ها باعث شیفت محل نوسان پلاسمون‌ها و پاسخ فرکانسی ساختار به طول‌موج‌های بلندتر می‌شود. از اینرو امکان بررسی ساختار برای کاربردهای مخابراتی وجود دارد. یکی از مشکلات این طرح تلفات اهمی ذاتی در نانودیسک‌های فلزی است. اثر پارامترهای مختلف در طرح پیشنهادی و عملکرد نوری آن و همچنین پتانسیل‌های دیگر آن در کاربردهای دیگر در دست مطالعه و بررسی بیشتر است.



شکل ۶: طیف پاسخ اندازه‌گیری شده برای نانوفیلترهای نوری ساخته شده و شیفت قله نوسان ساختار با تغییر فاصله دو نانودیسک (S) از ۳۲ تا ۱۵ نانومتر و در مقایسه با طیف پاسخ یک تک نانودیسک با ضخامت ۱۰ نانومتر.

۵- جمع‌بندی

یک نانوساختار ساده بر اساس یک زوج نانودیسک از جنس طلا با تحریک انتهایی بررسی شده و کاربرد آن در پالایش بازه نوری برای اولین بار مطرح شد. یک نانوفیلتر مؤثر بر اساس نوسان پلاسمون‌های سطحی و اندرکنش الکترومغناطیسی آنها در فرکانس‌های نوری طراحی و با استفاده از تکنیک نانولیتوگرافی حفره- ماسک (HM) ساخته شده است. پاسخ فرکانسی نانوفیلتر معرفی شده قابل تنظیم در حوزه طول‌موج‌های نور مرئی و مخابراتی است.

سپاس‌گذاری

از همکاری‌ها و راهنمایی‌های ارزشمند آقای پروفسور میکائیل شل و دکتر آلکساندر دمیتریف در دانشگاه صنعتی چالمرز سپاس‌گذاری می‌شود.

مراجع

[1] E. Ozbay, "Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions," Science, vol. 311, pp. 189-193, 2006.

[2] W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," Nature, vol. 424, pp. 824-830, 2003.

[3] J. R. Krenn, H. Ditlbacher, G. Schider, A. Hohenau, A. Leitner, and F. R. Aussenegg, "Surface plasmon micro- and nano-optics," J. Micros., vol. 209, pp.167, 2003.

[4] S. A. Maier, M. L. Brongersma, P. G. Kik, S. Meltzer, A. A. G. Requicha, and H. A. Atwater, "Plasmonics: A route to nanoscale optical devices," Adv. Mater., vol.13, pp. 1501, 2001.

[Downloaded from ijict.itrc.ac.ir on 2024-04-16]

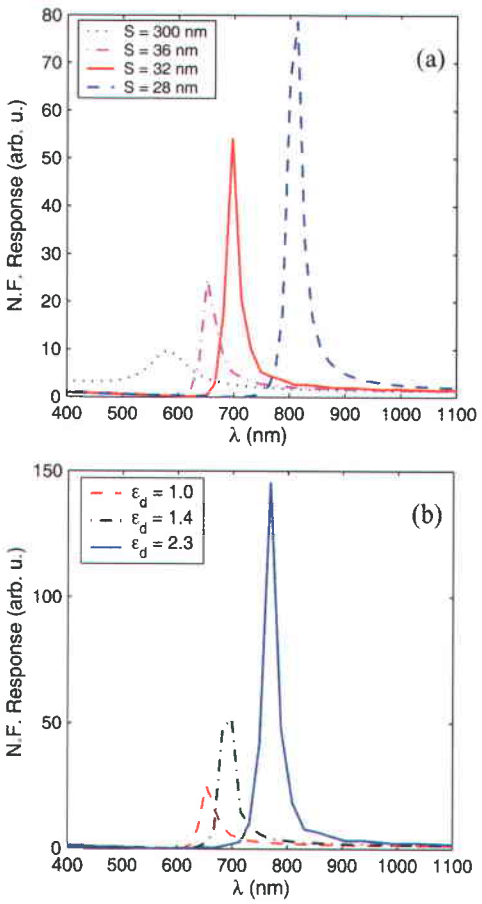
$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_{\infty}+\frac{\omega_p^2}{\omega(j\nu_c-\omega)}+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{G_n\omega_n^2}{(\omega^2-\omega_n^2)+j\omega\Gamma_n} \quad (۷)$$

که Γ_n, G_n, ω_n مشخصات نوسان‌کنندهٔ nام لورنسی هستند و ν_c نرخ برخورد الکترون‌ها در مدل درود است. با توجه به شکل رابطه مشخص است که اگر از کانولوشن یا تبدیل Z استفاده شود، الگوریتم FDTD به دو تاخیر Δt برای اصلاح میدان نیاز خواهد داشت. بنابراین الگوریتم روش D-FDTD با مدل لورنس- درود، پیچیده‌تر از الگوریتم استاندارد یا D-FDTD با مدل درود بوده و همچنین به حافظه بیشتری بدلیل طولانی‌تر شدن زمان محاسبه، احتیاج دارد. برای دخالت دادن هر نوسان‌کننده لورنسی در مدل و الگوریتم محاسبه تدریجی بایستی چهار متغیر کمکی تعریف شود که اگر فرض کنیم که پنج نوسان‌کننده لورنسی برای مدل کردن رفتار الکتریکی ساختار لازم است، در مجموع بیست متغیر جدید باید به متغیرها اضافه شده و به آنها حافظه اختصاص داده شود که سرعت محاسبه را برای ساختارهای سه بُعدی به شدت تحت تاثیر خود قرار می‌دهند.

سلول‌بندی حوزه حل عددی ۸۰ × ۹۰ × ۹۰ در نظر گرفته شده که با تغییر فاصله نانودیسک‌ها سلول‌بندی در راستای z نیز تغییر داده می‌شود. در محاسبات انجام شده اندازه سلول‌ها در سه راستا برابر و $\Delta x=\Delta y=\Delta z=$ ۲ و ۴ nm است. اندازه نمو زمانی نیز طوری اختیار می‌شود که شرط پایداری حفظ شود. از شرط مرز جذبی لایه‌های تطبیق کامل (PML) برای محدود کردن حوزه حل در کناره‌ها استفاده شده است. با بکارگیری تبدیل فوریه برروی داده‌های حوزه زمان می‌توان پاسخ فرکانسی ساختار را محاسبه کرد. طیف افزونگی میدان در روی سطح یک نانوکره طلایی با شعاع ۳۰ نانومتر در شکل(۳) نشان داده شده است. از این طیف مشخص می‌شود که طول‌موج نوسان LSPها در نانوکره ۵۵۰ نانومتر (محل قله افزونگی) است.

یکی از پارامترهای نانوفیلتر بررسی شده، فاصله بین دو نانودیسک است. کم کردن این فاصله تا حد عمق نفوذ پلاسمون‌ها در دیسک‌ها باعث جابجا شدن پاسخ فرکانسی نانوفیلتر می‌شود. این حالت به خوبی در طیف‌های افزونگی شدت میدان[15] ساختار با دونانودیسک فلزی با اندازه قطرهای $D_1=D_2=88$ nm و ضخامت‌های $T_1=T_2=24$nm، با تغییر فاصله از ۳۰۰ تا ۲۸ نانومتر نمایش داده شده در شکل (۴a)، نشان داده شده است. اثر ضریب شکست یا گذردهی الکتریکی فضای بین دو نانودیسک برروی پاسخ ساختار در میدان نزدیک در شکل (۴b) آورده شده است. شکل (۵) شیفت قله نوسان مود پلاسمونی تحریک شده در ساختار بر اثر تابش یک موج صفحه‌ای با تغییر فاصله دونانودیسک (S) را نشان می‌دهد. محدودیت در حافظه و سرعت حل عددی باعث ایجاد محدودیت در شبیه‌سازی ساختارهای مشابه با ابعاد بزرگتر که مناسب برای طول‌موج‌های مخابرات نوری هستند، می‌شود که با در دست داشتن سوپرکامپیوترها مشکل حافظه و سرعت حل از بین می‌رود.

نانوساختار بوسیلهٔ تکنیک نانولیتوگرافی[16] حفره- ماسک (HM) که به عبارتی روش اصلاح یافتهٔ لیتوگرافی کولوئیدال محسوب می‌شود، ساخته می‌شود [۱۶]. یک لایه پلی‌متیل متاکریلت (PMMA) (ضخامت ۸۰ نانومتر، PMMA 950K) به صورت یکنواخت روی یک زیرساخت شیشه‌ای (ضخامت ۱ میلی متر، VWRI) پخش شده که بستر مناسبی برای خود جانشینی ذرات کولوئیدال پلی‌استرین باردار شده (اندازه ۱۰۷ نانومتر، Molecular Probes Inc.) است. نیروی الکتریسیته ساکن باعث ایجاد یک آرایه از این ذرات می‌شود. یک لایه نازک (۱۰ نانومتر) ورقه طلا در یک خلاء بالا به صورت حرارتی لایه نشانی می‌شود (AVAC HV6000). سپس با چسب نواری می‌توان پلی‌استرین را برداشت و یک سری نانوحفره در فیلم طلایی و نشسته برروی PMMA باقی گذاشت. این الگو به عنوان یک ماسک برای حک کردن راکتیو یونی (PlasmaTherm BathTop VII, 50 W) که PMMA زیر حفره‌ها را تا زیرساخت شیشه برمی‌دارد، استفاده می‌شود. با این روش یک حفره- ماسک ساخته می‌شود که برای ساخت نانوساختار با لایه نشانی ترکیبات آن ($Au\text{-}SiO_2\text{-}Au$) به روش تبخیر[17] با پرتو الکترونی بکار می‌رود. پس از موارد جزئی مراحل دیگر، نانوساختار ساخته شده (نانوساندویچ) و همگن بودن نانودیسک‌های بوجود آمده، با کمک دستگاه ریزبینی نیروی اتمی (AFM) (Digital Instr. Nanoscope III, Digital Instr. Santa Barbara, CA) و ریزبینی جاروب الکترونی (SEM) (JEOL JSM-6301F) قابل مشاهده، بررسی و تأیید است (شکل (۲c)). اندازه‌گیری طیف پاسخ فرکانسی با استفاده از یک طیف‌نگار نوری (CARY 500) در باند نوری ۳۵۰-۲۰۰۰ نانومتر انجام می‌گیرد.



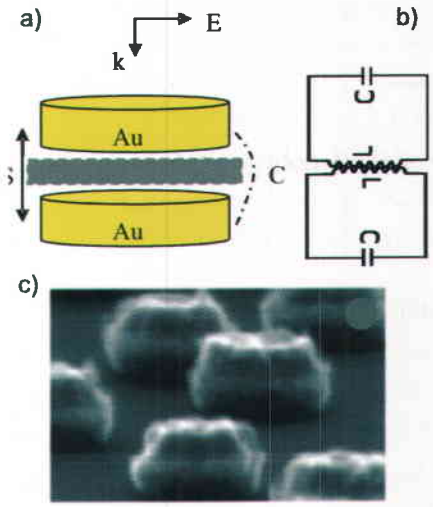
شکل ۴: پاسخ میدان نزدیک و طیف‌های شدت میدان با تغییر (a) فاصله دو نانودیسک (S) از ۳۰۰ تا ۲۸ نانومتر و (b) گذردهی الکتریکی نسبی فضای بین دو نانودیسک از ۱ تا ۲/۳، محاسبه شده با روش D-FDTD.

15 Intensity-enhancement

16 Nanolithography

17 Evaporation

[Downloaded from ijict.itrc.ac.ir on 2024-04-16]



شکل۲: نمای یک نانوفیلتر نوری. (a) ساختار نانوفیلتر نوری و میدان تابشی. با تغییر ضریب شکست در فضای بین دو دیسک فلزی به صورت پویا می‌توان خواص نوری ساختار را تغییر داد. (b) مدار معادل الکتریکی و(c) تصویر نانوساختار ساخته شده در ریزبینی جاروب الکترونی.

اکنون اگر فرض کنیم که یک خازن نوسانی (C_{res}) داریم، آنگاه می‌توان یک حالت نوسانی بدون داشتن یک سلف داشت. به عبارتی دیگر می‌توان رفتار نوری یک نانوذره فلزی (برخاسته از خاصیت الکتریکی و مغناطیسی ذره) را با یک خازن نوسانی به صورت الکتریکی معادل قرار داد. بار الکتریکی ذخیره شده در خازن با رابطه $q = C_{res} V$ تعیین می‌شود.

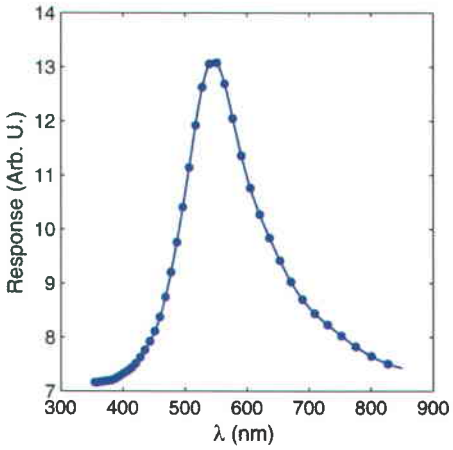
رابطه پلاریزاسیون با میدان تابشی ($p_x = \alpha E_x$) معادل رابطه بار الکتریکی جمع شده در دو سر خازن با ولتاژ اعمالی V به آن است. با این معادل‌سازی، به ترتیب میدان تابشی با ولتاژ اعمالی و پلاریزاسیون با بار الکتریکی خازن معادل می‌شود. بنابراین ظرفیت خازن (که حالت نوسانی دارد) با قطبی‌شدگی نانوذره هم‌ارز قرار می‌گیرد. به همین صورت می‌توان نشان داد که جریان الکتریکی گذرنده از خازن متغیر (i_c) با چگالی جریان الکتریکی القایی در نانوذره نیز معادل است، به طوری که: $j_p = \partial p/\partial t \equiv i_c = C_{res}\,\partial V/\partial t$. با قرار دادن یک خازن الکتریکی نوسانی به عنوان مدار معادل الکتریکی یک نانودیسک، می‌توان برای ساختار نانوفیلتر (شکل(۲a))، مدار معادل الکتریکی شکل(۲b) را در نظر گرفت که شامل یک سلف متغیر موازی با دو خازن الکتریکی است که رابطهٔ فیلتری مشابه رابطه (۶) مربوط به یک مدار نوسانی LC خواهد داشت.

۳- طرح نانوفیلتر نوری

طرح نانوفیلتر پیشنهادی متشکل از یک زوج نانودیسک فلزی با تحریک انتهایی می‌باشد. شکل(۲) نمای ساختاری یک نانوفیلتر را نشان می‌دهد که رفتار الکترومغناطیسی آن قابل توصیف با جمع آثار یک دوقطبی الکتریکی (P) و یک دوقطبی مغناطیسی (M) است، که حاصل اندرکنش میدان نزدیک دو نانودیسک فلزی که در فاصله خیلی نزدیکی از هم قرار گرفته‌اند [۱۵]. با بکارگیری روش تقریبی الکتریسیته شبه‌ساکن برای حالت تحریک انتهایی روابط مربوط به قطبی‌شدگی‌های اصلاح شده بدست می‌آیند. مشخص می‌شود که حالت تحریک انتهایی دارای یک ویژگی دو مود هایبرید است [۱۶]. که یک مود مربوط به نوسان الکتریکی در نانودیسک است و می‌توان آنرا با یک خازن الکتریکی قوی معادل کرد. نوسان مغناطیسی که در بین دو نانودیسک اتفاق می‌افتد، خاصیتی شبیه خاصیت مداری یک سلف را دارد (شکل(۲b)).

امکان ایجاد یک حلقه جریان الکتریکی مجازی در نانوساختار متشکل از یک نانودیسک وجود دارد. یک حلقه جریان الکتریکی دارای یک ممان مغناطیسی است که اندازه آن متناسب با اندازه جریان و سطح مقطع حلقه فرضی بوده و پاسخ مغناطیسی ساختار را تضمین می‌کند [۱۵]. وجود یک پاسخ مغناطیسی قوی در ساختار، معادل وجود یک اندوکتانس قوی در مدار معادل الکتریکی ساختار است.

طرح ارائه شده انعطاف‌پذیری خوبی در تنظیم و کنترل پاسخ فرکانسی با تغییر پارامترهای آن دارد. یکی از این پارامترهای مهم و تأثیرگذار در رفتار نانوفیلتر فاصله بین دو نانودیسک است که مکانیسم اندرکنش الکترومغناطیسی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پارامتر دیگر ثابت دی‌الکتریک لایه دی‌الکتریکی بین دو نانودیسک است که می‌توان با تغییر آن پاسخ نوری را تغییر داد. اگر ثابت دی‌الکتریک (یا ضریب شکست n_d) مفروض را بتوان با اعمال ولتاژ یا حرارت تغییر داد، آنگاه می‌توان پاسخ نانوفیلتر را به صورت پویا کنترل کرد. بنابراین طرح پیشنهادی یک طرح انعطاف‌پذیر در نوع خود بوده و همچنین قابل ساخت است که ارزشمند بودن آنرا بیش از پیش نمایان می‌کند.

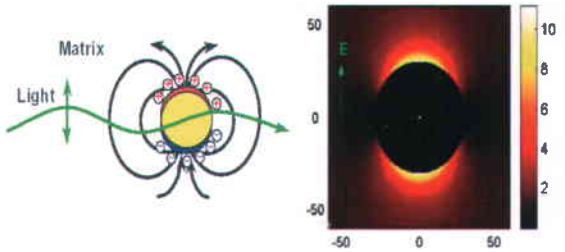


شکل ۳: پاسخ فرکانسی یک نانوکره با شعاع ۳۰ نانومتر و از جنس طلا، طول‌موج نوسان LSPها ۵۵۰ نانومتر. محاسبه شده با روش D-FDTD است.

۴- شبیه‌سازی الکترومغناطیسی و ساخت نانوفیلتر

روش تفاضل محدود در حوزه زمان معادلات ماکسول را که شامل مشتقات حوزه فضا و زمان هستند، به صورت عددی حل می‌کند. روش حل عددی FDTD یک روش نیرومند برای آنالیز و شبیه‌سازی الکترومغناطیسی ساختارهاست [۱۷-۱۸]. برای شبیه‌سازی محیط‌ها و ساختارهای پاشنده مانند فلزها استفاده از یک مدل مناسب و قابل تطبیق با الگوریتم اصلاح تدریجی میدان‌ها در روش FDTD لازم است. روش FDTD تعمیم یافته برای محیط‌های پاشنده به D-FDTD معروف است [۱۹]. برای فلز طلا مدل لورنس-درود یک مدل مناسب و کامل برای فلزی همچون طلا است که ثابت دی‌الکتریک آن با رابطه (۷) به صورت زیر توصیف می شود [۵].

[Downloaded from ijict.itrc.ac.ir on 2024-04-16]



شکل ۱: تحریک یک دوقطبی الکتریکی قوی در یک نانوذره فلزی و توزیع شدت میدان الکتریکی در نزدیکی یک نانوکره از جنس طلا و با شعاع ۳۰ نانومتر در طول‌موج ۵۵۰ نانومتر.

فرکانس تشدید به قدرت نیروی بازدارنده وابسته است. این نیرو نیز مشخصاً به فاصلهٔ بارهای سطحی از هم (اندازهٔ ذره) و قابلیت قطبی شوندگی محیط بین و اطراف بارها وابسته است. نوسانات بارهای سطحی را تقریباً با یک دوقطبی نوسانی، که امواج الکترومغناطیسی تشعشع می‌کند، مدل می‌کنند. سطح نانوذره‌ها الکترون‌های هدایتی را به داخل ذره سوق می‌دهد و یک نیروی بازدارندهٔ مؤثر را برای ایجاد رفتار تشدیدی در فرکانس دیپل پلاسمون سطحی باعث می‌شوند. شکل(۱) تحریک و نوسان یک پلاسمون ذره‌ای بر اثر یک میدان خارجی و همچنین نحوه‌ی توزیع شدت میدان الکتریکی در نزدیکی یک نانوکره از جنس طلا در طول موج نوسان ۵۵۰ نانومتر را نشان می‌دهد. اعتبار مدل دوقطبی به ابعاد ذره وابسته است. در این مدل که به مدل ریلی نیز معروف است، ابعاد ذرات باید خیلی کوچکتر از طول موج نور تابشی باشند. اگر ابعاد قابل مقایسه با طول موج باشند، آنگاه این مدل اعتبار خود را از دست خواهد داد [۵]،[۶].

اگر فرض کنیم نانوذره مفروض یک نانوکره با شعاع a باشد، آنگاه از الکتریسیته ساکن، میدان پراکنده شده توسط این نانوکره با ضریب گذردهی الکتریکی ε_1 و قرار گرفته در یک محیط با مشخصه ε_m، به صورت زیر با یک دوقطبی الکتریکی (P)، با قطبی‌شدگی α، قابل توصیف است [۵]:

$$\mathbf{P} = \alpha\, \mathbf{E_{inc}}, \quad \alpha(\omega) = 4\pi\varepsilon_0 a^3 \frac{\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_m}{\varepsilon_1(\omega) + 2\varepsilon_m} \qquad (۱)$$

رابطه فوق برای قطبی‌شدگی وابسته به فرکانس $\alpha(\omega)$، به رابطه کلاسیاس-موسوتی[12] معروف است [۶]. حالت نوسان وقتی پیش می‌آید که مخرج رابطه (۱) کمینه شود. اگر فرض کنیم نانوکره از جنس فلز است، ضریب گذردهی الکتریکی آن در فرکانس‌های نوری وابسته به فرکانس و تلفاتی خواهد بود:

$$\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_1'(\omega) - j\,\varepsilon_1''(\omega), \qquad (۲)$$

شرط نوسان:

$$\left|\varepsilon_1'(\omega) + 2\varepsilon_m(\omega)\right|^2 + \left|\varepsilon_1''(\omega)\right|^2 = \min. \qquad (۳)$$

این شرط بدان معنا است که باید $\varepsilon_1'(\omega)$ یک مقدار منفی بوده و مشخصه تلفات ماده $\varepsilon_1''(\omega)$ نیز مقداری خیلی کمتر از ۱ باشد. اگر محیط اطراف نانوکره، هوا فرض شود ($\varepsilon_m = 1$) آنگاه شرط نوسان به $\varepsilon_1'(\omega_{res}) \approx -2.0$ منتهی می‌شود.

۲-۲- مدل ساده درود

با بکارگیری مدل ساده درود[13] $\left(\varepsilon_1(\omega) = 1 - (\omega_p/\omega)^2\right)$ برای فلز که ω_p فرکانس زاویه‌ای پلاسمای ماده است و قرار دادن آن در رابطه (۳)، محل نوسان پلاسمون‌های سطحی برای یک نانوکره فلزی به صورت $\omega_{res} = \omega_p/\sqrt{3}$ بدست می‌آید. اگر شکل نانوکره عوض شود (مثلاً به یک نانودیسک یا بیضیگون)، محل نوسان نیز تغییر پیدا می‌کند که می‌توان با در نظر گرفتن یک ضریب شکل (ℓ)، رابطه محل نوسان را اصلاح کرد، $\left(\omega_{res} = \omega_p/\sqrt{3\ell}\right)$ [۵]. قطبی‌شدگی‌ها نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\alpha_{1,2}(\omega) = 4\pi a_{1,2}^3 \frac{-\omega_p^2}{3\ell_{1,2}\,\omega^2 - \omega_p^2} \qquad (۴)$$

فرض می‌شود که دو نانوکره یا نانوذره‌ها دارای اندازه متفاوت هستند ($a_2 \geq a_1$) بنابراین فرکانس نوسان پلاسمون‌های سطحی در آنها به صورت $\omega_{SP_{1,2}} = \omega_p/\sqrt{3\ell_{1,2}}$ در نظر گرفته می‌شود، که ضریب اندازه یا شکل $\ell_2 \geq \ell_1$ هستند.

در بعضی مواد مدل ساده درود یک مدل مناسب نیست، در این حالت ممکن است از مدل لورنس[14] استفاده شود که در آن رابطه چگالی شار الکتریکی با میدان به صورت رابطه زیر توصیف می‌شود [۵-۶].

$$\mathbf{D} = \left(\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0\,\chi_0\,\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\,\Gamma\omega}\right)\mathbf{E} \qquad (۵)$$

که در آن ω_0، χ_0 و Γ به ترتیب فرکانس زاویه‌ای، دامنه و ضریب میرایی نوسان کننده لورنسی هستند. مدل ساده لورنس تا حدی شبیه رابطه مدل درود تلفاتی است و عملاً کاربردی‌تر از مدل ساده درود است. با بکارگیری رابطه (۴) یا (۵) می‌توان معادلات دوقطبی‌های تزویج شده را حل کرد و تقریبی از رفتار یک نانوساختار متشکل از دو نانوذره در حال اندرکنش الکترومغناطیسی را بدست آورد.

۲-۳- خاصیت نوسانی مدار معادل الکتریکی یک نانوذره فلزی

با در نظر گرفتن یک مدار الکتریکی نوسانی متشکل از یک سلف و خازن موازی (مدار LC، شکل(۲))، رابطه‌ای که برای امپدانس معادل مدار LC (Z_{LC}) بدست می‌آید، یک رابطه مشابه با رابطه قطبی‌شدگی یک نانوکره یا نانودیسک فلزی (رابطه (۴)) است.

$$Z_{LC} = \frac{-j\,\omega L}{\omega^2 LC - 1} \qquad (۶)$$

رابطه (۶) یک فیلتر باندگذر (BPF) ساده را در ذهن تداعی می‌کند.

12 Clausius-Mossotti

13 Drude

14 Lorentz

[Downloaded from ijict.itrc.ac.ir on 2024-04-16]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای در علوم مختلف به خواص و رفتار نوری نانوذره‌ها و نانوساختارهای فلزی به عنوان عناصر پایه‌ای در تکنولوژی نانواپتیک و نانوفوتونیک شده است [۱-۵]. نانوذره‌های فلزی بستر مناسبی برای نوسان میدان‌های نوری محلی و بهره دادن به پاسخ الکترومغناطیسی هستند. تابش نور و یا یک موج الکترومغناطیسی باعث تحریک پلاسمون‌های سطحی و ایجاد حالت تشدید در سطح نانوذره‌های فلزی می‌شود[۶]. ساختارها و قطعه‌های نوری نوین مختلفی از جمله: موجبرها، نانولنزها، لنزهای کامل[۴]، فراماده[۵] الکتریکی و مغناطیسی، تقسیم‌کننده‌های توان، تزویج کننده‌ها، مدولاتورها و سوئیچ‌های نوری بر اساس عناصر نانوذره‌های فلزی و ترکیب آنها، پیشنهاد و ساخته شده‌اند [۷-۱۴].

نانوتکنولوژی در حوزه نور یا نانواپتیک دریچه‌ای را به مباحث جدید نظری و عملی و همچنین کاربردهای نو باز می‌کند. در نانواپتیک قابلیت دستکاری در ساختار اتم‌ها و مولکول‌های مصنوعی که اندازه‌ای در حد چند آنگستروم (10^{-10} متر) یا چند نانومتر دارند، امکان کنترل و دستکاری بعضی از رفتارهای طبیعی حاکم بر اندرکنش نور با مواد ساخته شده صنعتی[۶] و در نتیجه خواص نوری آنها را افزایش می‌دهد. بنابراین با مطرح شدن مواد پیشرفته صنعتی با قابلیت‌های ویژه در تکنولوژی نوین، قطعات نو با کاربردهای ویژه پدیدار می‌شوند [۹-۱۰]. در راستای برداشتن بعضی محدودیت‌ها در اندازه و ساختار قطعات نوری برای ساخت و توسعه قطعات و مدارات مجتمع نانوفوتونیک لازم است که انرژی الکترومغناطیسی در یک سطح زیر حد تفرق نور[۷] هدایت شده و همچنین اطلاعات نیز در یک فضای کوچکتر از طول‌موج نور بتوانند پردازش شوند [۱۴]. بنابراین در نانواپتیک و نانوفوتونیک به ساختارها و مواد جدید (با فیزیک جدیدتری نسبت به فیزیک ساختارهای معمول هدایتی و پردازشی امواج) برای غلبه بر DLL و محدودیت‌های دیگر نیاز است. نیل به این اهداف و توسعه نانوتکنولوژی در مباحث نور و فوتونیک بدون توجه به پدیده پلاسمونیک در نانوذره‌ها، نانورشته‌ها و نانوزنجیره‌های فلزی غیر ممکن به نظر می‌رسد. به همین علت یک نانوکره، نانودیسک و نانونوار فلزی یا یک آرایه از آنها که با تکنیک‌های امروزی به سادگی قابل ساخت هستند [۵]، کاربردهای بسیاری در نانواپتیک و نانوفوتونیک پیدا کرده‌اند.

در این مقاله یک نانوساختار ساده بر اساس یک زوج نانودیسک از جنس طلا با تغذیه انتهایی بررسی شده و کاربرد آن در پالایش[۸] بازه نوری برای اولین بار مطرح شده است. اندرکنش الکترومغناطیسی دو نانودیسک که در فاصله کمی از هم قرار دارند، باعث هایبریداسیون مودهای پلاسمونی ساختار شده و دو مود با رفتار دوگانی توسط موج تابشی تحریک می‌شوند که در طراحی نانوفیلتر پیشنهاد شده بکار گرفته می‌شوند. مقاله شامل ۵ بخش است که در بخش بعدی به بررسی پلاسمون‌های سطحی و ذره‌ای در نانوذره‌ها با مدل‌های فیزیکی، ریاضی و الکتریکی پرداخته شده است. بخش ۳ شامل توصیف طرح نانوفیلتر پیشنهادی و قابلیت‌ها و انعطاف‌پذیری آن می‌شود. حل عددی نانوساختار و پروسه ساخت آن در بخش ۴ توضیح داده شده و جمع‌بندی مباحث در بخش ۵ آورده شده است.

۲- پلاسمون‌های سطحی محلی‌شده در نانوذره فلزی

روی سطح یک فلز با هدایت الکتریکی خوب، الکترون‌ها می‌توانند سرگردان و آزادانه حرکت کنند تا یک دریای دوبُعدی از الکترون‌های آزاد را شکل دهند. این دریای الکترون‌های آزاد می‌تواند با امواجی که پلاسمون‌های سطحی نامیده می‌شوند، موجدار شود. نوری که به سطح یک فلز برخورد می‌کند می‌تواند دریای الکترون‌ها را به ارتعاش درآورد. اگر فرکانس نور تابشی به فلز به طوری با فرکانس تشدید پلاسمون‌های سطحی تطبیق شود، اثر عجیبی پدید می‌آید. پلاسمون‌های سطحی در رویه یک ذره یا ورقه فلزی انرژی الکترومغناطیسی نور را جمع کرده و حول برجستگی‌ها یا حفره‌ها آنرا متمرکز می‌کنند. برجستگی‌ها یا حفره‌ها، ممان انرژی پلاسمون‌های سطحی را به طوری تنظیم می‌کنند که با نور تابشی تطبیق یابد. از آنجائی‌که پلاسمون‌های سطحی انرژی الکترومغناطیسی را به داخل یک حجم خیلی ریز متمرکز می‌کنند، یک میدان الکتریکی قوی ایجاد می‌شود که کلید کاربردهای زیادی است [۲]،[۶].

نانوساختارهای فلزی خواص نوری پیچیده و جالبی از خود نشان می‌دهند. برجسته‌ترین پدیده در این ساختارها، تشدید الکترومغناطیسی بواسطه‌ی نوسان‌های منظم و بهم پیوستهٔ الکترون‌های هدایتی یعنی پلاسمون‌هاست. مودهای پلاسمونی در تعداد خاصی از ساختارها و در فلزهای مختلف به خصوص در فلزهای از قبیل طلا و نقره وجود دارند. اگر این مودها برروی فصل مشترک فلز- دی‌الکتریک ایجاد شوند، پلاسمون‌های سطحی و اگر در نانوذره‌ها[۹] فلزی ایجاد شوند، پلاسمون‌های ذره‌ای[۱۰] یا پلاسمون‌های محلی‌شده نامیده می‌شوند. تحت شرایط معینی پلاسمون‌ها باعث می‌شوند که در این ساختارهای نانویی پدیده‌های همچون: پراکندگی قوی، جذب و افزایش محلی میدان الکترومغناطیسی اتفاق بیفتند.

۲-۱- مدل ریلی[۱۱]

با ارائه یک مدل ساده می‌توان خواص زیادی از پلاسمون‌های ذره‌ای را در نانوذرات فلزی شناخت. با توجه به اینکه قطر ذرهٔ نانویی با عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی در فلزات هم مرتبه است، نور محرک قادر است به داخل ذره نفوذ کند. میدان داخل ذره الکترون‌های هدایتی را با هم و با توجه به بارهای مثبت ثابت یون‌ها شیفت می‌دهد. الکترون‌ها در روی سطح یک طرف ذره تجمع می‌کنند. بین دو طرف ذره که بارهای مثبت و منفی جمع شده‌اند یک نیروی بازدارنده شکل می‌گیرد. اگر فرکانس نور محرک با فرکانس ویژهٔ این نوسانات تجمعی برابر باشد، حتی یک میدان تحریکی کوچک باعث یک تشدید قوی می‌شود.

4 Perfect lens
5 Metamaterial
6 Artificial
7 Diffraction limit of light: DLL
8 Filtering
9 Nanoparticles
10 Particle plasmons
11 Rayleigh

[Downloaded from ijict.itrc.ac.ir on 2024-04-16]

IJICT International Journal of Information & Communication Technology

ITRC

Volume 1- Number 2- May 2009 (pp.21-27)

طراحی و ساخت یک نانوفیلتر نوری بر اساس نوسان پلاسمون‌های سطحی

توکل پاکیزه

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران
گروه فن‌آوری ارتباطات نوری، پژوهشکده ارتباطات، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، تهران، ایران
دانشکده مهندسی فیزیک و میکروالکترونیک، دانشگاه صنعتی چالمرز، گوتنبرگ، سوئد
Pakizeh@eetd.kntu.ac.ir

محمد ص. ابریشمیان
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران
msabrish@eetd.kntu.ac.ir

نصرت ا. گرانپایه
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران
granpaye@eetd.kntu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۶/۳۰- تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۲/۱

چکیده - با بکارگیری نانودیسک‌های فلزی با تغذیه انتهایی و بر اساس نوسان پلاسمون‌های سطحی محلی[1] یک نانوفیلتر ساده و مؤثر در فرکانس‌های نوری طراحی و با استفاده از تکنیک نانولیتوگرافی حفره-ماسک[2] ساخته شده است. مفاهیم فیزیکی و فیلترینگ نانوساختار با استفاده از تقریب الکتریسیته شبه‌ساکن و مدار معادل الکتریکی نانوساختار بررسی شده است. رفتار الکترومغناطیسی نانوفیلتر پیشنهادی با روش تفاضل محدود حوزه زمان پاشنده[3] شبیه‌سازی شده است. پاسخ فرکانسی نانوفیلتر معرفی شده قابل تنظیم در بازه طول‌موج‌های نوری است. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی هم‌خوانی دارند.

کلید واژه- پلاسمون‌های سطحی، نانوساختار، مدل ریلی، نانوفیلتر نوری، نانودیسک فلزی، D-FDTD.

Abstract- **Based on the metal nanodisks arranged in the longitudinal configuration and their coupled localized surface plasmon resonances, a simple optical nanofilter is designed and fabricated using the hole-mask nanolithography technique. The filtering and physical concepts of the nanostructure are discussed using the quasi-static approximation and the circuit model. The optical properties of the proposed nanofilter are investigated using the dispersive finite-difference time-domain method. The spectral response of the filter is tunable in the considered optical range. The model and simulations results agree with the experiments.**

1 Localized surface plasmons: LSPs

2 Hole-Mask: HM

3 Dispersive finite-difference time-domain: D-FDTD

[Downloaded from ijict.itrc.ac.ir on 2024-04-16]