بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

پایداری حرارتی در میکرودیسک سیلیکایی آغشته به نانو ذرات طلا ، جفت‌شده به دو موجبر مستقیم

مهلا قائمی مقدم[۱]، دکتر مهدی سویزی[۲]، دکتر علی رحمتی[۲]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فوتونیک، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
۲. استادیار گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

چکیده- در میکرودیسک سیلیکایی جفت‌شده به دو موجبر مستقیم با استفاده تئوری ماتریس انتقال به بررسی دو مد تشدیدی، دامنه میدان بهینه پرداخته می‌شود. نقش دما بر روی شدت عبوری محاسبه نشان می-دهد که در گستره دمایی ۵۰- تا ۸۳ درجه سانتیگراد، عملکرد میکرودیسک پایداری حرارتی خوبی دارد. شدت عبوری وابستگی شدیدی به فاکتور پرشدگی نانو ذرات طلا در میکرودیسک دارد و با افزایش فاکتور پرشدگی، قله‌های عبوری کاهش و پهنای آنها افزایش می‌یابد.

کلید واژه- تشدیدگر میکرودیسک، فاکتور پرشدگی، دامنه عبور

Thermal Stability of Au Nanoparticle Embeded Silica Microdisk Coupled to Two Straight Waveguide

Mahla Ghaemi Moghadam[۱], Dr Mehdi Sovizi[۲],Dr Ali Rahmati[۲]

۱.MSc Student in Photonic, Department of Physics, Faculty of Science, Vali-e-Asr University of Rafsanjan
۲. Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

Abstract- Two resonant modes and optimized field amplitude were investigated in silicate microdisk coupled to two straight waveguide using transmission matrix theory. The role of temperature on transmitted intensity showed that the microdisk operation has good thermal stability in the temperature range of -۵۰ to ۸۳°C. The transmission intensity is strongly dependent on gold nanoparticle filling factor and its increasing cause to decrease and increase in transmission peak and peak width, respectively.

Keywords: Microdisk resonator, filling factor, through transmission

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

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

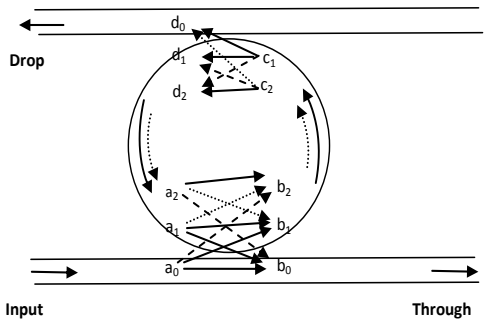
۱- مقدمه

میکروتشدیدگرهای نوری با عمل چرخش متوالی امکان تشدید نور را در حجم کوچکی فراهم می کند از این تقویت باریکه نوری جهت انتقال اطلاعات و داده ها در مسافتهای دور ممکن می‌گردد [۱-۲]. مدتها تلاش جهت افزایش بازده کاری میکرودیسک با تغییر در شکل آن صورت می گرفت . در سالهای اخیر تزریق نانوساختارها مانند نقاط کوانتوم فلزی و نیمرسانا سازوکار دیگری را برای افزایش بهره میکرودیسک معرفی کرده اند [۳-۶]. ژنگ وهمکاران [۳] نانو ذرات بلوری Si را در میکرودیسک SiO_2 تزریق کردند و افزایشی در حدود ۵ برابر در فاکتور کیفیت (Q) مشاهده کردند. ورود نانوذرات فلزی در میکرودیسک علاوه بر تشدید اپتیکی در اثر باز چرخش دورانی، امکان تشدید پلاسمون سطحی را فراهم می کند [۴].

در کار حاضر، رفتار اپتیکی یک میکرودیسک جفت‌شده به یک موجبر مستقیم با تئوری ماتریس انتقال مطالعه می‌شود. جفت شدگی میکرودیسک به موجبر، جهت تشدید در میکرودیسک مورد بررسی قرار می گیرد. در گام بعدی ورود نانوذرات در ساختمان میکرودیسک و تأثیر آن بر عملکرد و پارامترهای میکرودیسک مانند ضریب شکست، شدت عبور و جابجایی قله‌های تشدیدی آن مورد مطالعه قرار می گیرد.

۲- تحلیل و بررسی

یک میکرودیسک از جنس سیلیکا به شعاع ۳ μm که به دو موجبر مستقیم جفت‌شده در نظر می‌گیریم.



شکل۱- نمایی از دو مد تشدیدگر میکرودیسک بصورت متقارن جفت‌شده به دو موجبر مستقیم.

پیکربندی تشدیدگر میکرودیسک جفت‌شده به دو موجبر مستقیم تک مد در شکل ۱ نشان داده شده است.دو مد زمزمه‌ای(WGM (Whispering Gallery Mode در تشدیدگر میکرودیسک درنظر گرفته می‌شود.

جفت‌شدگی تشدیدگر میکرودیسک دو مدی با دو موجبر شامل جفتگرهای ۳×۳ و جابجایی فازی برای اولین مرتبه شعاعی WGM (WGM_1) و دومین مرتبه شعاعی WGM (WGM_2) است. برای این ساختار از روش ماتریس انتقال استفاده می‌شود. در منطقه جفت‌شدگی پایین رابطه ورودیها وخروجیها با جفت‌گرهای ۳×۳ بصورت زیر بیان می‌شود [۷]:

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0 & -jk_1 & -jk_2 \\ -jk_1 & t_1 & -k_c \\ -jk_2 & -k_c & t_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

که $a_{0,1,2}$ و $b_{0,1,2}$ میدان نوری در درگاههای ورودی و خروجی جفتگر ۳× ۳ است. $-jk_{1,2}$ و $-k_c$ ضریب جفت‌شدگی میدان بین مدهای مختلف (مدهای موجبر ، WGM_1 و(WGM_2) و $t_{0,1,2}$ ضریب عبور میدان برای هر مد است. باید توجه داشته باشیم که $t_{0,1,2}$ و$k_{1,2}$ و k_c همگی باید حقیقی باشند. ضریب جفت‌شدگی حقیقی $(-k_c)$ بین WGM_1 و WGM_2 به جفت‌شدگی میدان غیر مستقیم آنها از طریق موجبر مستقیم نسبت داده می‌شود. فرض می‌شود جفت گر ۳× ۳ بدون اتلاف باشد. پس

$$\begin{vmatrix} t_0 & -jk_1 & -jk_2 \\ -jk_1 & t_1 & -k_c \\ -jk_2 & -k_c & t_2 \end{vmatrix} = 1, \qquad (۲)$$

روابط دامنه میدانها در نصف دور چرخش بصورت

$$\begin{aligned} a_1 &= d_1\sqrt{\alpha_1}e^{i\varphi_1/2} \\ a_2 &= d_2\sqrt{\alpha_2}e^{i\varphi_2/2} \end{aligned} \qquad (۳)$$

بیان می‌شود که α_1 و α_2 تضعیف میدان در یک دور چرخش و φ_1 و φ_2 جابجایی فازی در یک دور چرخش به ترتیب برایWGM_1 وWGM_2 است. جابجایی فاز به صورت $\varphi_{1,2} = \left(4\pi^2 R n_{eff\,1,2}\right)/\lambda$ تعریف می‌شود، که R شعاع تشدیدگر میکرودیسک، $n_{eff\,1,2}$ ضریب شکست مؤثر برای $WGM_{1,2}$ و λ طول موج نور در خلأ است. در منطقه جفت‌شدگی بالا رابطه ورودیها و خروجیها با جفت‌گرهای ۳×۳ با موجبر مستقیم بطورکامل مشابه رابطه (۱) می‌باشد. که با جایگذاری $b_{0,1,2}\rightarrow d_{0,1,2}$، $a_{0,1,2}\rightarrow c_{0,1,2}$ ، $jk_{1,2}\rightarrow j\acute{k}_{1,2}$، $t_{0,1,2}\rightarrow \acute{t}_{0,1,2}$ بدست می‌آید.

رابطه میدانهای عبوری نرمال‌شده در درگاههای عبوری و ریزشی برای دو موجبر مستقیم جفت‌شده به تشدیدگر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

میکرودیسک با جابجایی فاز دوگانه، بوسیله بصورت زیر بدست می‌آید:

$$s_t = \frac{b_0}{a_0} = t_0 - jk_1\frac{a_1}{a_0} - jk_2\frac{a_2}{a_0}, \quad (۴)$$

$$s_d = \frac{d_0}{a_0} = t_0'\frac{c_0}{a_0} + \frac{b_1}{a_0}(\alpha_1 e^{i\varphi_1})^{1/2}(-jk_1') + \frac{b_2}{a_0}(\alpha_2 e^{i\varphi_2})^{1/2}(-jk_2').$$

ضریب‌شکست محیط سیلیکا بر حسب طول‌موج (λ) و دما (T) بصورت رابطه سلمیر بیان می‌شود.

$$\varepsilon_d(\lambda,T) = 1 + \sum_{i=1}^{3}\frac{a_i(T)}{b_i^2(T) - E^2} \quad (۵)$$

که $a_i(T)$ و $b_i(T)$ توابعی از دما هستند که وابستگی دمایی آنها بصورت چندجمله‌ای درجه دوم بیان می‌شود، E انرژی فوتون فرودی به درگاه ورودی می‌باشد [۸].

اثر ورود نانوذرات در میکرودیسک بر روی دامنه جفت‌شدگی میکرودیسک به دو موجبر مستقیم بررسی می‌شود. فرض می‌شود نانوذرات طلا به شعاع r_p و کسر پرشدگی f (نسبت حجمی نانوذرات فلزی به حجم کل)، به زمینه سیلیکا تزریق شده باشند. فرکانس پلاسمایی نانوذرات برحسب دما بصورت زیر تعریف می‌شود [۹].

$$\omega_p(T) = \omega_p(T_0)\left[1 + \gamma_e(T - T_0)\right]^{-1/2} \quad (۶)$$

که ω_p فرکانس پلاسمایی در دمای اتاق و γ_e ضریب انبساط طلا می‌باشد. تابع دی‌الکتریک محیط فلزی بوسیله مدل درود توصیف می‌شود [۱۰].

$$\varepsilon_m(\lambda) = \varepsilon_m^{\infty} - \frac{\omega_p^2(T)}{\omega\left(\omega + i\omega_d(r_p)\right)} \quad (۷)$$

که در آن ε_m^{∞} ثابت دی‌الکتریک فرکانس بالا و ω_d فرکانس میرایی نانوذرات می‌باشد که بر حسب شعاع بصورت [۱۰]،

$$\omega_d(r_p) = \omega_d(bulk) + \frac{v_f}{r_p} \quad (۸)$$

بیان می‌شود. مقادیر پارامترهای مهم مربوط به نانوذره طلا در جدول ۱ آورده شده است.

در چارچوب تئوری ماکسول گارنت (MG) تابع دی‌الکتریک ، ε_{eff} محیط کامپوزیت شامل توزیع همگن نانوذرات فلزی در محیط سیلیکا با معادله (۸) بیان می‌شود که $(f \langle 0.2)$ باشد [۱۱].

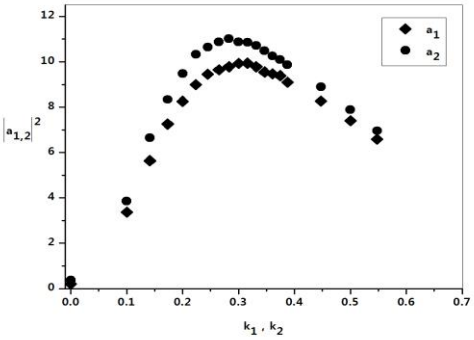
$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_0\frac{\varepsilon_m(1+2f) + 2\varepsilon_0(1-f)}{\varepsilon_m(1-f) + \varepsilon_0(2+f)} \quad (۸)$$

جدول ۱: . مقادیر پارامترهای مهم مربوط به نانوذره طلا

پارامترها	مقدار
$\gamma_e\ (1/K)$	۱/۴۲×۱۰^۵
$\omega_p(T_0)\left(rad/s\right)$	۱/۳۷۵۴×۱۰^۱۶
ε_m^{∞}	۷/۰
$\omega_d(bulk)\left(rad/s\right)$	۳/۷۸×۱۰^۱۳
v_f	۱/۴۰×۱۰^۶

۲-۱- *نتایج و بحث*

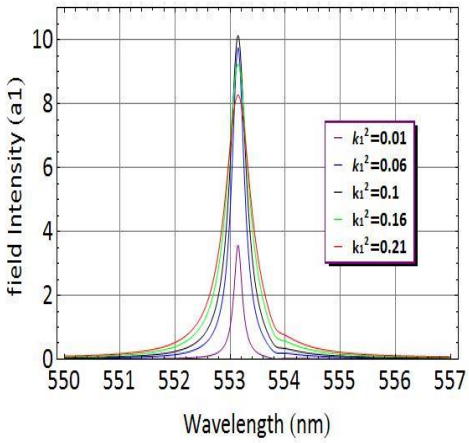
در ابتدا به ازای مقادیر مختلف k_1 (k_2) دامنه میدان نوری a_1 (a_2) به ترتیب در درگاه ورودی WGM_1 (WGM_2) محاسبه می‌شوند که در شکل ۲ رسم شده‌اند مقادیر بهینه K_1^2=۰,۰۱ و K_2^2=۰,۰۸ بدست می‌آید که منجر به دامنه عبور بیشینه می‌گردند.



شکل ۲- تغییرات دامنه‌های $a_{1,2}$ بر حسب $K_{1,2}$

طیف $|a_1|^2$ برای مقادیر مختلف K_1^2 با مقدار بهینه آن در شکل ۳ رسم شده است در حالی که K_2 در مقدار بهینه باشد

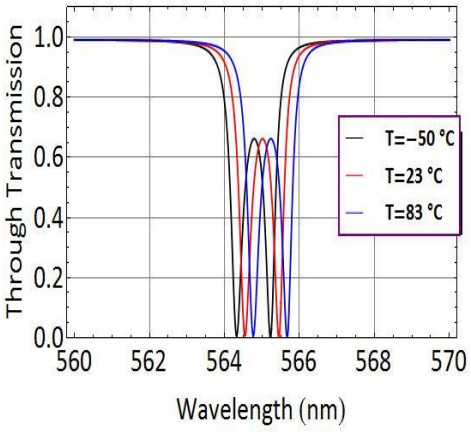
.



شکل ۳- تغییرات دامنه‌های $|a_1|^2$ برحسب K_1.

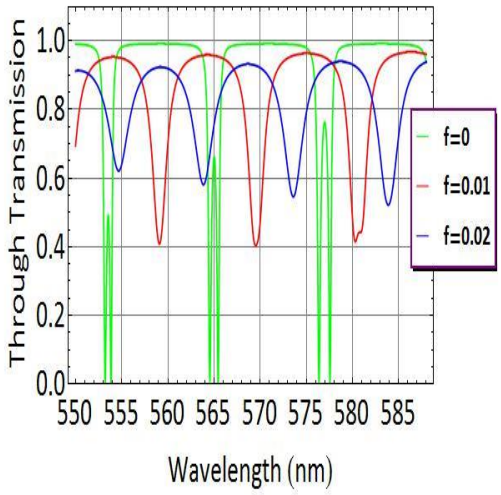
[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]

در شکل ۴ نحوه تغییرات طیف دامنه‌های عبور در دماهای مختلف رسم شده است. مشاهده می‌شود که موقعیت قله‌ها (λ_0) و پهنای قله‌ها در نصف دامنه عبور ($\Delta\lambda_0$) بسیار ناچیز تغییر می‌کند. از اینرو ضریب کیفیت $Q=\lambda_0/\Delta\lambda_0$ تغییر چندانی ندارد. بنابراین عملکرد میکرودیسک جفت‌شده به موجبر پایداری حرارتی بسیار خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۴- تغییرات دامنه عبور برحسب طول موج در دماهای مختلف.

در شکل ۵ تاثیر فاکتور پرشدگی نانوذرات فلزی (Au) (f)بر روی طیف دامنه عبور آمده است. مشاهده می‌شود که دامنه عبور حساسیت بالایی به f دارد که پهنای پیکها و موقعیت آنها تغییر کرده است از اینرو ضریب کیفیت نیز وابستگی قوی به f دارد زیرا جذب پلاسمونی در محیط میکرودیسک دامنه عبور را تضعیف می‌کند.



به عبارت دیگر با تغییر کسر پرشدگی می‌توان دامنه عبور، جابجایی قله‌ها و مکان قله‌ها و پهنای آنها را کنترل کرد.

۳- نتیجه‌گیری

دو مد تشدیدی عبوری، دامنه میدان بهینه آنها در میکرودیسک سیلیکایی جفت‌شده به دو موجبر مستقیم با استفاده تئوری ماتریس انتقال مطالعه می‌شود. در گستره دمایی ۵۰- تا ۸۳ درجه سانتیگراد، شدت عبوری پایداری حرارتی خوبی دارد. افزایش فاکتور پرشدگی نانوذرات طلا منجر به کاهش در شدت قله‌های عبوری و افزایش پهنای آنها می‌شود.

مراجع

[۱] K. J. Vahala, " Optical microcavities ", Nature ٤٢٤ (٢٠٠٣) ٨٣٩- ٨٤٦

[۲] Y. F. Xiao, C. L. Zou, Y. Li et al, " Asymmetric resonant cavities and their application in optics and photonics: a review ", Front. Optoelectron. China ٣(٢) (٢٠١٠) ١٠٩- ١٢٤

[۳] R. J. Zhang, S. Y. Seo, A. P. Milenin, M. Zacharias et al, " Visible range whispering-gallery mode in microdisk array based on size-controlled Si nanocrystals ", Applied physics letters ٨٨ (٢٠٠٦) ١٥٣١٢٠-١- ١٥٣١٢٠-٣

[٤] B. Min, E. Ostby, V. Sorger et al, " High-Q surface-plasmon-polariton whispering-gallery microcavity ", Nature ٤٥٧ (٢٠٠٩) ٤٥٥- ٤٥٩

[٥] K. Srinivasan, O. Painter, " Linear and nonlinear optical spectroscopy of strongly-coupled microdisk-quantum dot system ", Nature ٤٥٠ (٢٠٠٧) ٨٦٢- ٨٦٥

[٦] A. K. Sharma, R. Jha, B. D. Gupta, " Fiber-Optic Sensors Based on Surface Plasmon Resonance: A Comprehensive Review ", IEEE Sensors Journal ٧(٨) (٢٠٠٧) ١١١٨- ١١٢٩

[٧] Q. Zh. Huang, X. Zhang, J. Xia et al, "Dual-band optical filter based on a single microdisk resonator ", OPTICS LETTERS ٣٦ (٢٠١١) ٤٤٩٤-٤٤٩٦

[٨] J. Matsuko, N. Kitamura, S, Fujinaga et al, "Temperature dependence of refractive index of sio٢ glass", J.Non-Crys Solid ١٣٥ (١٩٩١) ٨٦-٨٨

[٩] Chiang, H.P.; Leung, P.T. and Tse, W.S. The Surface Plasmon Enhancement Effect On Adsorbed Molecules At Elevated Temperatures. J. Chem. Phys. ١٩٩٨, Vol.١٠٨. ٢٦٥٩- ٢٦٦٠

[١٠] M. Salari, H.R. Askari, "Theoretical investigation of absorption and sensitivity of nano-plasmonic fiber optic sensors", Optics & Laser Technology ٤٨ (٢٠١٣) ٣١٥- ٣٢٥

[١١] S. Hussain, R. K. Roy, A. k. pal, "Incorporation of silver nano particles in DLC matrix and surface Plasmon resonance effect", Materials Chemistry and Physics ٩٩(٢٠٠٦) ٣٧٥-٣٨١

شکل ۵- تغییرات دامنه عبور برحسب طول موج در کسر پرشدگی‌های مختلف

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-29]