

پایداری حرارتی در میکرو دیسک سیلیکایی آغشته به نانو ذرات طلا، جفت شده به دو موجبر مستقیم

مهلا قائمی مقدم^۱، دکتر مهدی سوزی^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 میکرو دیسک سیلیکایی جفت شده به دو موجبر مستقیم با استفاده تئوری ماتریس انتقال به بررسی دو مد تشدید، دامنه میدان بهینه پرداخته می شود. نقش دما بر روی شدت عبوری محاسبه نشان می دهد که در گستره دمایی ۵۰- تا ۸۳ درجه سانتیگراد، عملکرد میکرو دیسک پایداری حرارتی خوبی دارد. شدت عبوری وابستگی شدیدی به فاکتور پرشدگی نانو ذرات طلا در میکرو دیسک دارد و با افزایش فاکتور پرشدگی، قله های عبوری کاهش و پهنای آنها افزایش می یابد.

کلید واژه- تشدیدگر میکرو دیسک، فاکتور پرشدگی، دامنه عبور

Thermal Stability of Au Nanoparticle Embedded 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 -50 to 133°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

۱- مقدمه

زمزمه‌ای (Whispering Gallery Mode) WGM در تشدیدگر میکرو دیسک در نظر گرفته می‌شود. جفت‌شدگی تشدیدگر میکرو دیسک دو مدی با دو موجبر شامل جفت‌گرهای 3×3 و جابجایی فازی برای اولین مرتبه شعاعی WGM_1 و دومین مرتبه شعاعی WGM_2 است. برای این ساختار از روش ماتریس انتقال استفاده می‌شود. در منطقه جفت‌شدگی پایین رابطه ورودیها و خروجیها با جفت‌گرهای 3×3 بصورت زیر بیان می‌شود [۷]:

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0 & -jk_1 & -jk_2 \\ -jk_1 & t_1 & -k_c \\ -jk_2 & -k_c & t_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

که $a_{0,1,2}$ و $b_{0,1,2}$ میدان نوری در درگاههای ورودی و خروجی جفتگر 3×3 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 $k_{1,2}$ 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 3×3 بدون اتلاف باشد. پس

$$\begin{vmatrix} t_0 & -jk_1 & -jk_2 \\ -jk_1 & t_1 & -k_c \\ -jk_2 & -k_c & t_2 \end{vmatrix} = 1, \quad (2)$$

روابط دامنه میدانها در نصف دور چرخش بصورت

$$\begin{aligned} a_1 &= d_1 \sqrt{\alpha_1} e^{i\varphi_1/2} \\ a_2 &= d_2 \sqrt{\alpha_2} e^{i\varphi_2/2} \end{aligned} \quad (3)$$

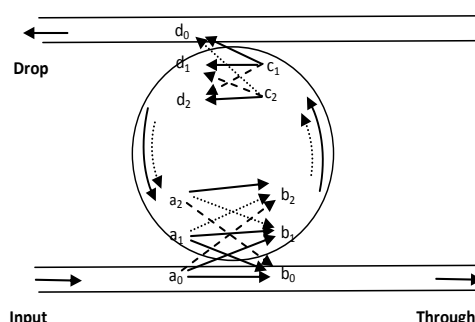
بیان می‌شود که α_1 و α_2 تضعیف میدان در یک دور چرخش و φ_1 و φ_2 جابجایی فازی در یک دور چرخش به ترتیب برای WGM_1 و WGM_2 است. جابجایی فاز به صورت $\varphi_{1,2} = (4\pi^2 R n_{eff,1,2})/\lambda$ تعریف می‌شود، که R شعاع تشدیدگر میکرو دیسک، $n_{eff,1,2}$ ضریب شکست مؤثر برای $WGM_{1,2}$ و λ طول موج نور در خلأ است. در منطقه جفت‌شدگی بالا رابطه ورودیها و خروجیها با جفت‌گرهای 3×3 با موجبر مستقیم بطور کامل مشابه رابطه (۱) می‌باشد. که با جایگذاری $b_{0,1,2} \rightarrow d_{0,1,2}$ و $a_{0,1,2} \rightarrow c_{0,1,2}$ ، $jk_{1,2} \rightarrow t_{1,2}$ ، $-jk_{1,2} \rightarrow t_{1,2}$ بدست می‌آید. رابطه میدانهای عبوری نرمال شده در درگاههای عبوری و ریزشی برای دو موجبر مستقیم جفت‌شده به تشدیدگر

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

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

۲- تحلیل و بررسی

یک میکرو دیسک از جنس سیلیکا به شعاع $3 \mu m$ که به دو موجبر مستقیم جفت‌شده در نظر می‌گیریم.



شکل ۱- نمایی از دو مد تشدیدگر میکرو دیسک بصورت متقارن جفت‌شده به دو موجبر مستقیم.

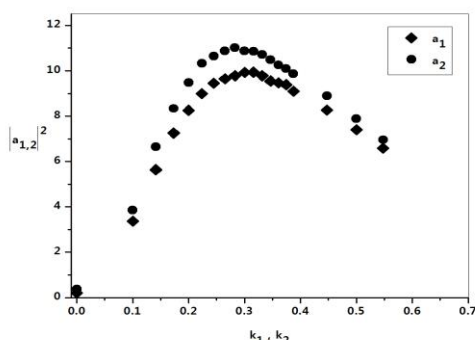
پیکربندی تشدیدگر میکرو دیسک جفت‌شده به دو موجبر مستقیم تک مد در شکل ۱ نشان داده شده است. دو مد

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مهم مربوط به نانوذره طلا

پارامترها	مقدار
$\gamma_e (1/K)$	$1/42 \times 10^5$
$\omega_p(T_0) (rad/s)$	$1/3754 \times 10^{16}$
ε_m^∞	۷/۰
$\omega_d(bulk) (rad/s)$	$3/78 \times 10^{13}$
v_f	$1/40 \times 10^6$

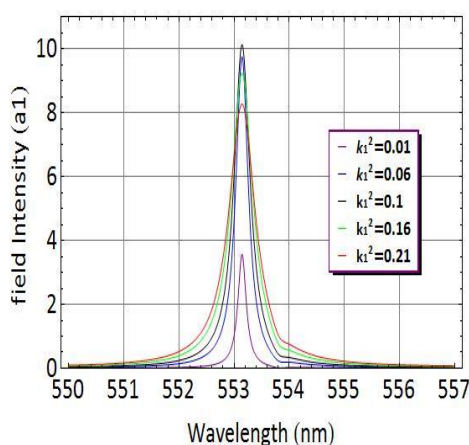
۲-۱- نتایج و بحث

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 $K_1^2 = 0.08$ و $K_2^2 = 0.08$ 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 $|a_1|^2$ بر حسب K_1

میکرو دیسک با جابجایی فاز دوگانه، بوسیله صورت زیر بدست می‌آید:

$$s_t = \frac{b_0}{a_0} = t_0 - jk_1 \frac{a_1}{a_0} - jk_2 \frac{a_2}{a_0}, \quad (4)$$

$$s_d = \frac{d_0}{a_0} = t_0' \frac{c_0}{a_0} + \frac{b_1}{a_0} (\alpha_1 e^{i\theta_1})^{1/2} (-jk_1') + \frac{b_2}{a_0} (\alpha_2 e^{i\theta_2})^{1/2} (-jk_2').$$

ضریب شکست محیط سیلیکا بر حسب طول موج (λ) و دما (T) بصورت رابطه سلمیر بیان می‌شود.

$$\varepsilon_d(\lambda, T) = 1 + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i(T)}{b_i^2(T) - E^2} \quad (5)$$

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 میکرو دیسک بر روی دامنه جفت-شدگی میکرو دیسک 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 بر حسب دما بصورت زیر تعریف می‌شود [۹].

$$\omega_p(T) = \omega_p(T_0) [1 + \gamma_e(T - T_0)]^{-1/2} \quad (6)$$

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].

$$\varepsilon_m(\lambda) = \varepsilon_m^\infty - \frac{\omega_p^2(T)}{\omega(\omega + i\omega_d(r_p))} \quad (7)$$

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

$$\omega_d(r_p) = \omega_d(bulk) + \frac{v_f}{r_p} \quad (8)$$

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 $f < 0.2$ باشد [۱۱].

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_m(1 + 2f) + 2\varepsilon_0(1 - f)}{\varepsilon_m(1 - f) + \varepsilon_0(2 + f)} \quad (8)$$

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

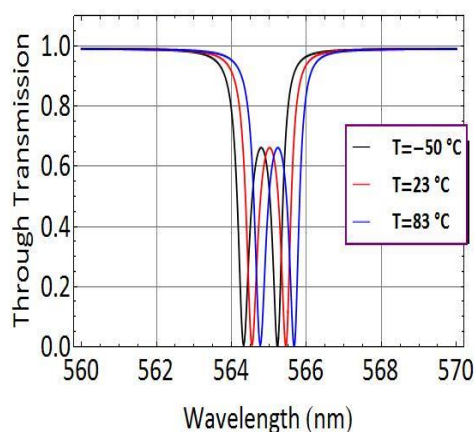
۳- نتیجه‌گیری

دو مد تشدید عبوری، دامنه میدان بهینه آنها در میکرو دیسک 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

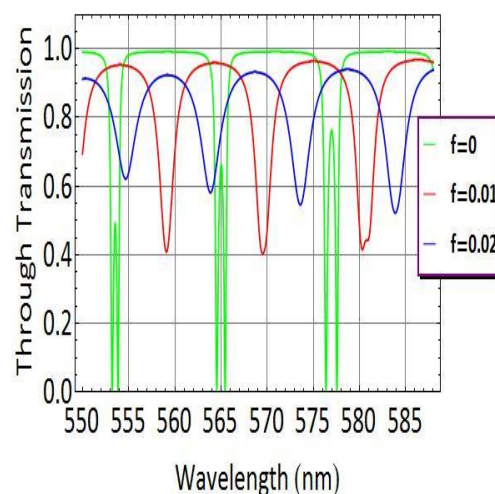
- [۱] K. J. Vahala, "Optical microcavities", Nature ۴۲۴ (۲۰۰۳) ۸۳۹-۸۴۶
- [۲] Y. F. Xiao, C. L. Zou, Y. Li et al, "Asymmetric resonant cavities and their application in optics and photonics: a review", Front. Optoelectron. China ۳(۲) (۲۰۱۰) ۱۰۹-۱۲۴
- [۳] R. J. Zhang, S. Y. Seo, A. P. Milenin, M. Zacharias et al, "Visible range whispering-gallery mode in microdisk array based on size-controlled Si nanocrystals", Applied physics letters ۸۸ (۲۰۰۶) ۱۵۳۱۲۰-۱-۱۵۳۱۲۰-۳
- [۴] B. Min, E. Ostby, V. Sorger et al, "High-Q surface-plasmon-polariton whispering-gallery microcavity", Nature ۴۵۷ (۲۰۰۹) ۴۵۵-۴۵۹
- [۵] K. Srinivasan, O. Painter, "Linear and nonlinear optical spectroscopy of strongly-coupled microdisk-quantum dot system", Nature ۴۵۰ (۲۰۰۷) ۸۶۲-۸۶۵
- [۶] A. K. Sharma, R. Jha, B. D. Gupta, "Fiber-Optic Sensors Based on Surface Plasmon Resonance: A Comprehensive Review", IEEE Sensors Journal ۷(۸) (۲۰۰۷) ۱۱۱۸-۱۱۲۹
- [۷] Q. Zh. Huang, X. Zhang, J. Xia et al, "Dual-band optical filter based on a single microdisk resonator", OPTICS LETTERS ۳۶ (۲۰۱۱) ۴۴۹۴-۴۴۹۶
- [۸] J. Matsuko, N. Kitamura, S. Fujinaga et al, "Temperature dependence of refractive index of sio₂ glass", J.Non-Crys Solid ۱۳۵ (۱۹۹۱) ۸۶-۸۸
- [۹] Chiang, H.P.; Leung, P.T. and Tse, W.S. The Surface Plasmon Enhancement Effect On Adsorbed Molecules At Elevated Temperatures. J. Chem. Phys. ۱۹۹۸, Vol.۱۰۸. ۲۶۵۹-۲۶۶۰.
- [۱۰] M. Salari, H.R. Askari, "Theoretical investigation of absorption and sensitivity of nano-plasmonic fiber optic sensors", Optics & Laser Technology ۴۸ (۲۰۱۳) ۳۱۵-۳۲۵
- [۱۱] 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 ۹۹(۲۰۰۶) ۳۷۵-۳۸۱

در شکل ۴ نحوه تغییرات طیف دامنه‌های عبور در دماهای مختلف رسم شده است. مشاهده می‌شود که موقعیت قله‌ها (λ) و پهنای قله‌ها در نصف دامنه عبور ($\Delta\lambda$) بسیار ناچیز تغییر می‌کند. از اینرو ضریب کیفیت $Q=\lambda/\Delta\lambda$ تغییر چندانی ندارد. بنابراین عملکرد میکرو دیسک 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) 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 میکرو دیسک دامنه عبور را تضعیف می‌کند.



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