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

تشدید دوگانه در میکروحلقه‌ی جفت شده به موجبر متناهی

مصطفی دهقان ، مهدی سویزی

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان

چکیده – با قرار دادن یک موجبر مستقیم متناهی در بالای میکروحلقه می‌توان تشدید دوگانه در میکروحلقه ایجاد کرد. هر تشدید نتیجه برهم نهی امواج هم فاز در میکروحلقه است. برای مدل سازی تشدیدگر از تئوری ماتریس‌های انتقال بهره گرفته شده است. در این مقاله نحوه تغییر مشخصه‌های اپتیکی تشدیدگر مانند گستره آزاد طیفی، پهنای باند، فاصله قله‌های مربوط به تشدید دوگانه و فاکتور کیفیت بر حسب پارامترهای آن بررسی شده است. با بهینه کردن شرایط فاکتور کیفیت بسیار بزرگ حاصل می‌شود. از این سیستم می‌توان در هر جایی که دو طول موج نزدیک به هم با شدت بالا نیاز است استفاده کرد.

کلید واژه- تشدید دوگانه، تشدیدگر، میکروحلقه، موجبر.

Dual Resonance in Micro-ring Coupled to Finite Waveguide

Mostafa Dehghan , Mahdi Sovizi

Department of Physics , Faculty of Science , Vali-e-Asr University of Rafsanjan

Abstract- Inserting a finite straight waveguide above the microring can causes dual resonance in it. Each resonance is created by the waves with the same phase in the microring. The resonator have been modelized by using transform matrix method. In this paper the variations of the resonator characteristics such as FSR, FWHM, peak distance of dual resonance and quality factor versus their parameters have been investigated. In optimum condition a great quality factor is achieved. This system can be used whereever two high intensity close wavelength are needed.

Keywords: Dual resonance, Microring, Resonator, Waveguide

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

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

۱- مقدمه

نیاز است که در ابتدا به معرفی برخی از مفاهیم به کاربرده شده در این پژوهش پرداخته شود. انباشتگی میدان[۱] به صورت نسبت شدت در داخل میکروحلقه به شدت در ورودی تعریف می‌شود. گستره آزاد طیفی[۲] فاصله دو قله متوالی در طیف طول موجی است. پهنای باند در نصف بیشینه[۳] (یا به صورت مختصر پهنای باند) بازه طول موجی نمودار در ارتفاع نصف بیشینه است. ضریب کیفیت[۴] نسبت طول موج در قله به پهنای باند است. به نسبت گستره آزاد طیفی به پهنای باند ظرافت[۵] گفته می‌شود.

۲- تئوری

جنس موجبر و میکروحلقه سلیکا با ضریب شکست ۱,۴۵۶ است. با استفاده از تئوری ماتریس‌های انتقال کل چیدمان توصیف می‌شود [۱]. این ماتریس برای جفت‌شدگی موج راستگرد به ورودی اول رابطه زیر است (ر.ک. شکل (۱)):

$$\begin{pmatrix} B_1^+ \\ B_2^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & \kappa_1 \\ -\kappa_1^* & t_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1^+ \\ A_2^+ \end{pmatrix} \qquad (۱)$$

که κ ضریب جفت‌شدگی بین میکروحلقه و موجبر و عددی کاملاً موهومی است و t ضریب عبور و عددی مختلط است. در این رابطه و روابط بعد حروف لاتین بیان‌گر دامنه میدان الکتریکی در قسمتی از سیستم هستند که با همین حروف در شکل (۱) مشخص شده‌اند. درایه‌های ماتریسی با اندیس ۱ مربوط به جفت شدگی تارنوری به میکروحقله، و اندیس ۲ مربوط به جفت‌شدگی بین میکروحلقه و موجبر متناهی فوقانی است. برای جفت شدگی موج چپگرد به ورودی دوم از رابطه ماتریسی زیر استفاده می‌شود:

$$\begin{pmatrix} A_1^- \\ A_2^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & \kappa_1 \\ -\kappa_1^* & t_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1^- \\ B_2^- \end{pmatrix} \qquad (۲)$$

برای جفت‌شدگی بین میکروحلقه و موجبر متناهی به ترتیب برای موج راست‌گرد و چپ‌گرد داریم:

$$\begin{pmatrix} D_3^+ \\ D_2^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_2 & \kappa_2 \\ -\kappa_2^* & t_2^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_3^+ \\ C_2^+ \end{pmatrix} \qquad (۳)$$

$$\begin{pmatrix} C_3^- \\ C_2^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_2 & \kappa_2 \\ -\kappa_2^* & t_2^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_3^- \\ D_2^- \end{pmatrix} \qquad (۴)$$

در روابط فوق A_1^+ و B_1^- معلوم‌اند، که در واقع ورودی‌ها از سمت چپ و راست تارنوری هستند، و بقیه مجهول‌اند. هر معادله ماتریسی بالا شامل ۲ معادله خطی است. با توجه به رابطه $r = \theta/2\pi$ برای قسمتی که با L_1 در شکل (۱) مشخص شده داریم:

$$B_2^+ P^r = C_2^+ \qquad (۵)$$

$$C_2^- P^r = B_2^- \qquad (۶)$$

که در روابط فوق $P = S^{1/2} e^{i\beta_2 L}$ و β_2 عدد موج در میکروحلقه است. در این رابطه S[۶] عامل بقا در میکروحلقه است. برای مثال اگر S=0.9 باشد بدین معنی است که در هر گردش ۹۰ درصد انرژی موج ابقا می‌گردد. این عامل با تغییر شعاع، ضریب شکست و دیگر مشخصات هندسی میکروحلقه تغییر می‌کند. β از حل معادله مشخصه در موجبر به دست می‌آید. در این محاسبات از مد اول موجبر (بزرگ‌ترین β) استفاده شده است. با توجه به بزرگ بودن شعاع میکروحلقه (۲۰ میکرون و بزرگ‌تر) و هم جنس بودن هسته موجبر و میکروحلقه می‌توان عدد موج در آنها را یکسان در نظر گرفت. برای قسمت L_2 میکروحلقه در شکل (۱) داریم:

$$D_2^+ P^{1-r} = A_2^+ \qquad (۷)$$

$$A_2^- P^{1-r} = D_2^- \qquad (۸)$$

اثر انعکاس در دو انتهای موجبر متناهی با پارامترهای $r_4 = r_3 = i$ وارد معادلات می‌شوند. روابط زیر را برای رفت و برگشت نور در موجبر متناهی داریم:

$$r_3 C_3^- e^{2i\beta_3 L_3} = C_3^+ \qquad (۹)$$

$$r_4 D_3^+ e^{2i\beta_3 L_4} = D_3^- \qquad (۱۰)$$

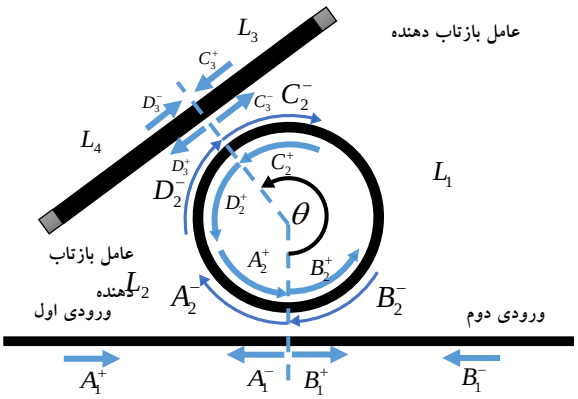
که β_3 عدد موج در موجبر متناهی و برابر با β_2 است. با جایگذاری $a = P^r$، $b = P^{1-r}$ $c = e^{2i\beta_3 L_3}$ و $d = e^{2i\beta_3 L_4}$ در روابط (۵) تا (۱۰) روابط خلاصه می‌شوند.

---

[۱] Field Accumulation
[۲] Free Spectral Range (FSR)
[۳] FWHM
[۴] Quality Factor (Q)
[۵] Finesse
[۶] Survival Factor

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

با جا گذاری مقادیر C_2^+، B_2^-، A_2^+ و D_2^- از روابط (۵) تا (۸) در معادلات (۱) تا (۴) تعداد مجهول‌ها از ۱۴ عدد به ۸ عدد کاهش پیدا می‌کنند.



شکل (۱): چیدمان تارنوری مستقیم در پایین، میکروحلقه در وسط و موجبر متناهی با دو انتهای بازتاب دهنده در بالای میکروحلقه. شاخص + دال بر راستگرد بودن موج است و شاخص – چپگرد بودن موج را مشخص می‌کند.

تمامی این روابط در معادله ماتریسی زیر خلاصه می‌گردند:

$$A\left(D_2^+ \quad B_1^+ \quad B_2^+ \quad C_2^- \quad A_1^- \quad A_2^- \quad D_3^+ \quad C_3^-\right)^\dagger = \left(-t_1A_1^+ \quad \kappa_1^*A_1^+ \quad -t_1B_1^- \quad \kappa_1^*B_1^- \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\right)^\dagger \tag{۱۱}$$

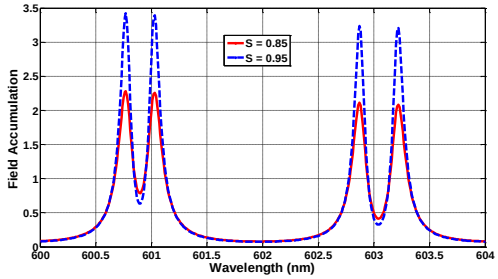
$$A=\begin{pmatrix} b\kappa_1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ bt_1^* & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a\kappa_1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & at_1^* & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b\kappa_2 & dr_4t_2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & bt_2^* & -dr_4\kappa_2^* & 0 \\ 0 & 0 & a\kappa_2 & 0 & 0 & 0 & -1 & cr_3t_2 \\ -1 & 0 & at_2^* & 0 & 0 & 0 & 0 & -cr_3\kappa_2^* \end{pmatrix}$$

این معادله چیدمان را به خوبی توصیف می‌کند. از نرم افزار متلب برای حل معادله ماتریسی فوق بهره گرفته شده است.

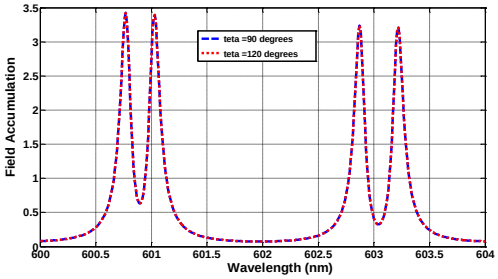
۳- بحث و تحلیل

در شکل (۲) تأثیر عامل بقا مشاهده می‌شود. با افزایش عامل بقا FWHM کاهش پیدا می‌کند اما FSR تغییری نمی‌کند. چرا که انرژی بیشتری در هر گردش در میکروحلقه ابقا می‌گردد.

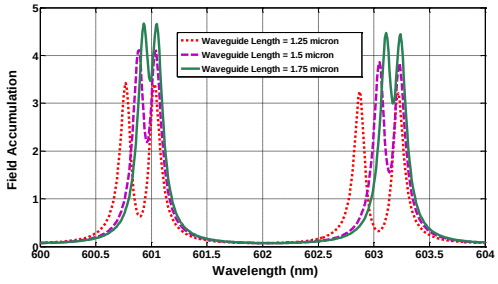
در شکل (۳) نحوه تغییر انباشتگی میدان بر حسب جابجایی موجبر فوقانی مشاهده می‌گردد. این جابجایی بر اساس زاویه‌ی θ مشخص شده در شکل (۱) صورت گرفته است. ملاحظه می‌شود که هیچ تغییری در نمودار حاصل نمی‌گردد و نمودارها کاملاً انطباق دارند. علت این است که مکان موجبر متناهی راه نوری موج در حال گردش را تغییر نمی‌دهد. طول موجبر بسیار کوچکتر از شعاع حلقه است.



شکل (۲): بررسی عامل بقا. ملاحظه می‌شود با افزایش عامل بقا انباشتگی میدان نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۳): جابجایی موقعیت موجبر متناهی در بالای میکروحلقه.



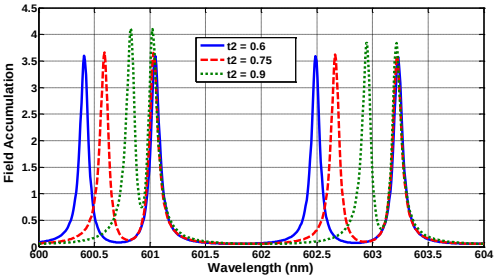
شکل (۴): تاثیر اندازه موجبر متناهی بر انباشتگی میدان میکروحلقه.

در شکل (۴) ملاحظه می‌شود اندازه موجبر متناهی بسیار بر انباشتگی میدان مؤثر است. هنگامی که معیار رایلی بر قرار باشد پهنای باند همواره مقدار ثابتی است. گستره آزاد طیفی نیز مستقل از اندازه موجبر متناهی است.

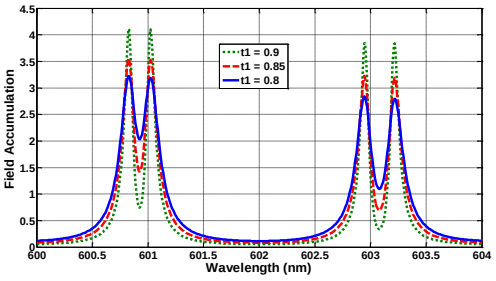
در شکل (۵) به ازای مقدار ثابت $t_1 = 0.9$ و مقادیر متفاوت t_2 انباشتگی میدان ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود پهنای باند مستقل از ضریب جفت شدگی بین میکروحلقه و موجبر متناهی است. با توجه به تغییر نکردن گستره آزاد طیفی مشخصه‌های اصلی تشدیدگر که عبارتند از ظرافت و ضریب کیفیت به ضریب جفت شدگی بین موجبر متناهی و میکروحلقه بستگی ندارند. از این رو به نظر می‌رسد برای بهینه کردن تشدیدگر t_2 پارامتر قابل اتکایی نیست. پارامتر t_2 تنها فاصله بین قله‌ها را دست خوش تغییر می‌کند.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

در شکل (۶) بالعکس شکل (۵) t_2 برابر مقدار ثابت ۰٫۹ در نظر گرفته شده است و انباشتگی میدان به ازی مقادیر مختلف t_1 ترسیم گردیده است. عامل t_1 برخلاف t_2 پهنای باند را متأثر می‌سازد بدین نحو که با افزایش آن پهنای باند کاهش می‌یابد. این عامل فاصله قله‌ها را تغییر نمی‌دهد به طوری که ملاحظه می‌شود قله‌ها روی یکدیگر قرار گرفته‌اند.



شکل (۵): تأثیر t_2 بر تشدید دوگانه. در تمامی نمودارها $FWHM = 0.085nm$ است.

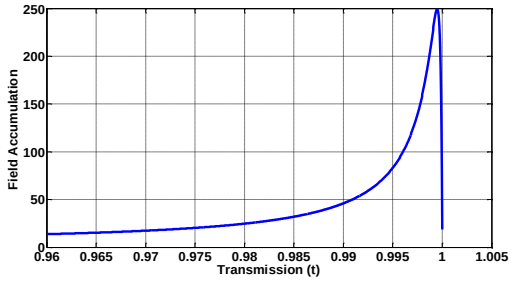


شکل (۶): تأثیر t_1 بر تشدید دوگانه با ثابت گرفتن t_2.

این نتایج به دست آمده‌اند چرا که موجبر متناهی تنها عاملی برای به گردش در آوردن نور در جهت دیگر است و طبیعتاً نباید موجب تغییر مشخصه‌های اپتیکی تشدیدگر شود.

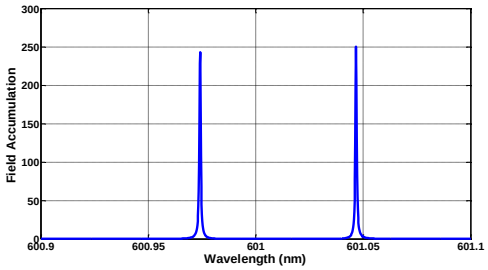
۴- تشدید بهینه

مشخصه‌ی مورد نظر برای بهینه سازی ضریب کیفیت است. عامل اول برای بالا بردن ضریب کیفیت این است که موج بازگشتی از موجبر متناهی و موج در حال گردش در میکروحلقه تداخل سازنده انجام دهند. با اعمال این شرط مقادیر گسسته بهینه برای طول موجبر متناهی به دست می‌آید. عامل دوم بهینه کردن ضریب عبور است. با استفاده از ترسیم مقدار بهینه t_1 مانند شکل (۷) به دست می‌آید. افزایش t به معنی کاهش جفت شدگی و میزان نور نفوذ پیدا کرده به میکروحلقه است. که به راحتی می‌توان با افزایش فاصله میکروحلقه و موجبر به این مقدار دست پیدا کرد. و اندازه موجبر متناهی نیز در مراحل ساخت قابل حصول است. دیگر پارامترها تأثیر بسزایی بر FWHM و به طبع آن ضریب کیفیت ندارند. در شرایطی که هر دو شرط بهینه سازی اعمال شده‌اند قله‌ها کاملاً تیز هستند (شکل (۸)).



شکل (۷): به دست آوردن انباشتگی میدان بیشینه با استفاده از ترسیم.

$S = 0.999, t_2 = 0.9, t_{1,optimum} = 0.9995, L_3 = L_4 = 5.2948\mu m$



شکل (۸): تشدید بهینه. $FWHM = 0.00065nm, Q \cong 924000$

۵- نتیجه گیری

با اعمال شرایط تشدید بهینه که شامل اندازه بهینه شده موجبر و ضریب عبور بهینه است می‌توان به یک شدت بزرگ دست پیدا کرد. از این شدت بالا می‌توان در جاهایی مانند تولید هارمونیک دوم در اپتیک غیر خطی، در کاواک لیزرها و هر جایی که به دو طول موج نزدیک به هم با تشدت بالا نیاز است استفاده کرد.

مراجع

[1] Yariv A., *Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides* **, Electron**. ,36 (2000) 321–322

[2] Joyce K. S. Poon, Jacob Scheuer, Shayan Mookherjea, George TPaloczi, Yanyi Huang, and Amnon Yariv **,** *Matrix analysis of microring coupled-resonator optical waveguides* **, Optical Society of America ,** 12 (2004) 90-103

[3] Ctyrok Jiri., Richter Ivan and Sinor milan, *Dual resonance in a waveguide coupled-ring microresonantor* **, Optical and Quantum Electronics,** 38 (2006) 781–797

[4] Ashok M. Prabhu . Alan Tsay . Zhanghua Han . Vien Van. "*Extreme Miniaturization of Silicon Add–Drop Microring Filters for VLSI Photonics Applications*" ***IEEE Photonics Journal***, 2 **(**2010**)** 435-444

[5] S. Xiao, M. H. Khan, H. Shen, and M. Qi, "*Silicon-on-insulator microring add-drop filters with free spectral ranges over 30 nm*" **J. Lightw. Technol**., 26,(2008). 228–236.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]