تشدید کننده میکروحلقه ای توری براگ

امین قادی، سعید میرزانژاد

گروه فیزیک اتمی و ملکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران

چکیده – در این مقاله ویژگی‌های نوع جدیدی از میکروحلقه‌ها با ضریب‌شکست متناوب مورد تحقیق قرار گرفته است که آن را توری میکروحلقه نامیدیم. با استفاده از شبیه‌سازی تفاضل محدود در حوزه زمانی طول موج‌های تشدید، میانگین زمانی توان حمل شده توسط توری میکروحلقه و افت مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که اثر توری براگ در میکروحلقه منجر به تقویت شدن انبارش انرژی در یک طول موج تشدید مخابراتی نسبت به دیگر طول موج‌های تشدیدی دیگر تا حد چند برابر می‌شود. همچنین افت توری میکروحلقه نیز افزایش می‌یابد. از این اثر می‌توان در طراحی مدارهای مجتمع فوتونیکی برای حذف دیگر طول موج‌ها استفاده نمود.

کلید واژه- تفاضل محدود در حوزه زمانی، توری براگ، طول موج تشدید، میکروحلقه.

Brag Grating Micro-Ring Resonator

Amin Ghadi, Saeed Mirzanejhad

Atomic and Molecular Physics, Faculty of Basic Science, University of Mazandaran

Abstract- In this paper we investigated characteristics of a new kind of micro-rings with periodic refractive index that we named it grating micro-ring. Resonance wavelengths, average power conveyed with the grating micro-ring and loss are investigated by finite difference time domain method. The results show that the effect of brag grating in the micro-ring cases to intensify the filed enhancement up to some orders of magnitude at one of the telecommunication resonance wavelengths with respect to the other resonance wavelength of the grating micro-ring. Also the loss of grating micro-ring increases too. This effect can be used to design of integrated photonic devices to omit the other wavelengths.

Keywords: Brag Grating, Finite Difference Time Domain, Micro-ring, Resonance Wavelength

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

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

۱- مقدمه

میکروحلقه‌های نوری عناصر مفیدی برای فیلتر نمودن طول موج، کلید زدن، مدوله سازی، کاربردهای ترکیب و تفکیک می‌باشند [۱، ۲]. یک میکروحلقه ایده‌آل برای سیستم تفکیک طول موج باید دارای یک گستره طیفی آزاد[۱] و ضریب ظرافت[۲] بزرگ باشد. میکروحلقه‌هایی که بر اساس موجبرها طراحی می‌شوند و در مجاورت موجبرها قرار دارند دارای افت انتشار کمی هستند، اما میزان شفافیت (تمایز) کم ضریب شکست بین محیط هسته و غلاف میکروحلقه منجر به افت حاصل از خمش در ابعاد کوچکتر از یک میلیمتر می‌گردد. برای بدست آوردن فاصله فرکانسی بزرگ بین مدهای میکروحلقه، استفاده از مواد با ضریب شکست بالا در ساخت میکروحلقه‌ها بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد که منتهی به ساخت میکروحلقه‌هایی با افت کم در ابعاد کمتر از یک میلیمتر می‌گردد.

در این مقاله استفاده از توری براگ در میکروحلقه‌ها برای بدست آوردن فاصله فرکانسی بزرگتر بین مدهای تشدیدی پیشنهاد می‌گردد. با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمانی[۳] انتشار نور در میکروحلقه با ضریب‌شکست متناوب (توری میکروحلقه) مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند استفاده از توری براگ در میکروحلقه گرچه افت میکروحلقه را افزایش می‌دهد اما در ایجاد فاصله فرکانسی بین مدهای تشدیدی و ایجاد اثر انتخابی در بسامدی خاص موثر است. این ابزار می‌تواند در طراحی کلیدهای نوری مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روابط و شبیه سازی

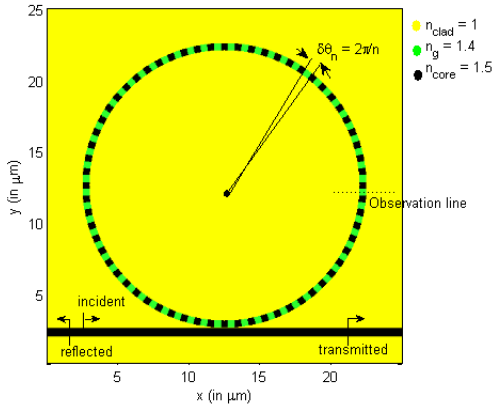
با استفاده از روش شبیه‌سازی تفاضل محدود در حوزه زمانی دو بعدی معادله ماکسول را برای مد TE حل می‌کنیم که دارای مولفه‌های میدانهای مغناطیسی H_x و H_y و میدان الکتریکی E_z است [۳].

$$\frac{\partial H_x}{\partial t}=\frac{-1}{\mu_0}\frac{\partial E_z}{\partial y}, \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t}=\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial E_z}{\partial x}, \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t}=\frac{1}{\varepsilon}\left[\frac{\partial H_y}{\partial x}-\frac{\partial H_x}{\partial y}\right], \qquad (۳)$$

دراین‌جا ε تابع دی‌الکتریک محیط و μ_0 پذیرفتاری مغناطیسی خلا است. با حل عددی معادلات فوق انتشار نور در بسامدهای مختلف بدست می‌آید [۳]. شکل (۱) تصویر توری میکروحلقه را نشان می‌دهد. ضریب شکست نواحی زرد، سبز و سیاه به ترتیب برابر با ۱، ۱,۴ و ۱,۵ است. پهنای موجبر، شعاع داخلی و شعاع خارجی میکروحلقه به ترتیب ۰,۵، ۹,۵ و ۱۰ میکرومتر است. فاصله گاف بین بدنه میکروحلقه و موجبر در ناحیه کمترین فاصله آنها ۰,۱ میکرومتر است. موج فرودی از سمت چپ موجبر وارد شده و موج عبوری از سمت راست اندازه‌گیری می‌شود. پهنای زاویه‌ای درنظر گرفته شده برای توری میکروحلقه به ازای n=۱۲۸ می‌باشد. اندازه‌های در نظر گرفته شده برای عناصر طول و زمان در این شبیه‌سازی عبارتند از $\Delta x=\Delta y=0.5\mu m$ و $\Delta t=\Delta x/(2.5\ c)$ که c سرعت نور در خلا است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم افزار Matlab-R۲۰۱۴ صورت گرفته است. برای جلوگیری از انعکاسات پنجره محاسباتی از شرایط مرزی جذب کننده مرتبه دوم [۴] استفاده شده است.



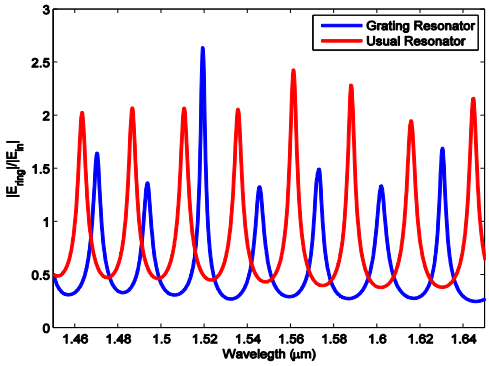
شکل ۱: میکروحلقه با ضریب‌شکست متناوب (توری میکروحلقه). ضریب شکست نواحی زرد، سبز و سیاه به ترتیب برابر با ۱، ۱,۴ و ۱,۵ است. فاصله گاف بین بدنه میکروحلقه و موجبر در ناحیه کمترین فاصله آنها ۰,۱ میکرومتر است. موج فرودی از سمت چپ موجبر وارد شده و موج عبوری از سمت راست اندازه‌گیری می‌شود. پهنای زاویه‌ای توری میکروحلقه به ازای n=۱۲۸ می‌باشد.

برای بدست آوردن گستره طیفی بسامدهای تشدید توری میکروحلقه از روش تبدیل فوریه ناپیوسته[۴] [۳] استفاده شده است. در این روش موج ورودی را بصورت یک پالس

[۱] Free Spectral Range (FSR)
[۲] Finesse
[۳] Finite difference time domain (FDTD)
[۴] Discrete Fourier Transform (DFT)

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

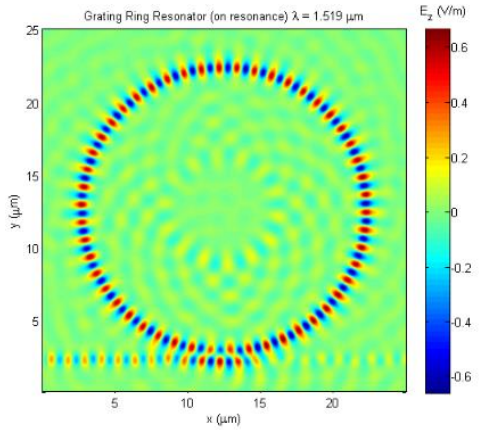
بسیار کوتاه زمانی درنظرگرفته و با انتشار آن به روش تفاضل محدود در حوزه زمانی و استفاده از تبدیل فوریه گستره طیفی بسامدها یا طول موج‌های تشدید توری میکروحلقه را می‌یابیم.



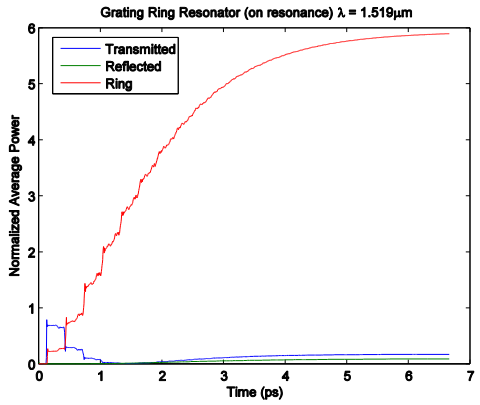
شکل ۲: گستره طیفی توری میکروحلقه با رنگ آبی و گستره طیفی میکروحلقه معمولی (با همان ابعاد توری میکروحلقه و ضریب‌شکست ۱,۵) با رنگ قرمز نشان داده شده است.

شکل (۲) گستره طیفی توری میکروحلقه را با رنگ قرمز نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در طول موج تشدید ۱,۵۱۹μm نسبت میدان الکتریکی میکروحلقه ۲,۶۳ برابر میدان ورودی است و اندازه میدان در این طول موج تشدید حدود ۱,۹۳ تا ۱,۶ بزرگتر از دیگر طول موج‌های تشدید است که این در نتیجه اثر توری است. برای مقایسه گستره طیفی میکروحلقه معمولی (با همان ابعاد توری میکروحلقه و ضریب‌شکست ۱,۵) با رنگ قرمز نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نسبت میدان میکروحلقه به میدان ورودی در طول موج‌های تشدید همگی تقریبا یک اندازه بوده و اختلاف زیادی بین آنها مشاهده نمی‌شود. همچنین فاصله بین طول‌موج‌های تشدید توری میکروحلقه ۰,۰۲۵۶μm که در میکروحلقه عادی به ۰,۰۲۵۷ μm می‌رسد.

شکل (۳) شبیه سازی انتشار نور در طول موج تشدید ۱,۵۱۹μm در توری میکروحلقه برای مد مرتبه ۵۰ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نسبت میدان توری میکروحلقه به میدان ورودی موجبر بسیار بزرگتر است. همچنین بخشی از میدان الکتریکی موج توسط توری میکروحلقه پراکنده و بخشی دیگر در جهت عکس به ورودی منعکس می‌شود که این امر منجر می‌گردد که میزان میدان الکتریکی موج خروجی از موجبر بسیار کمتر از میدان ورودی باشد.



شکل ۳: شبیه‌سازی انتشار نور در بسامد تشدید توری میکروحلقه.



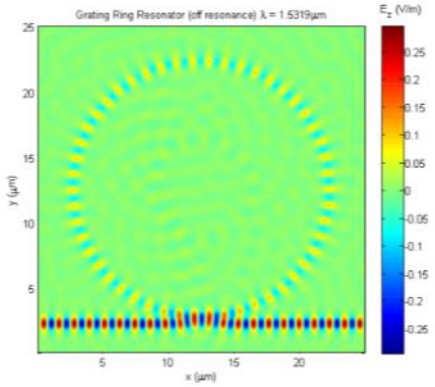
شکل ۴: میانگین زمانی توان بهنجار در توری میکروحلقه در بسامد تشدید.

شکل (۴) میانگین زمانی توان بهنجار شده توری میکروحلقه در طول موج تشدید ۱,۵۱۹μm برای مد مرتبه ۵۰ را با رنگ قرمز نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود توان داخل توری میکروحلقه پس از حدود ۶ پیکوثانیه به حالت پایدار می‌رسد که مقدار آن تقریباً شش برابر میانگین زمانی توان ورودی موجبر است. میانگین زمانی توان خروجی موجبر تقریباً ۱۷٪ توان ورودی است که با رنگ آبی ترسیم شده و توان انعکاس یافته از توری میکروحلقه (که در جهت عکس موج ورودی است) تقریباً ۹٪ توان ورودی است که با رنگ آبی ترسیم شده است.

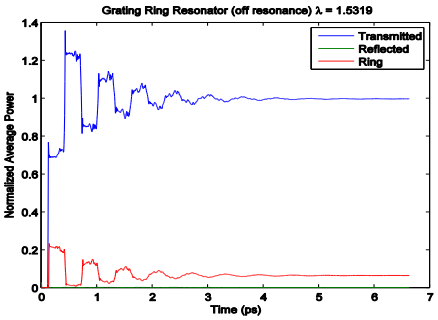
شکل (۵) شبیه سازی انتشار نور در توری میکروحلقه در طول موج غیرتشدید ۱,۵۳۱۹μm برای مد مرتبه ۵۰ را نشان می‌دهد که همانطور که انتظار می‌رود میزان میدان الکتریکی انتقال یافته به توری میکروحلقه بسیار کم بوده بیشتر میدان فرودی از بخش خروجی موجبر خارج می‌شود.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

در شکل (۶) میانگین زمانی توان انتقال یافته به توری میکروحلقه را با رنگ قرمز نشان می‌دهد که در حالت پایدار خود حدود ٪۶٫۳ توان ورودی را در خود دارد. میزان توان انعکاس یافته بسیار ناچیز و میزان توان انتقال یافته از خروجی موجبر تقریباً ٪۹۸ است.

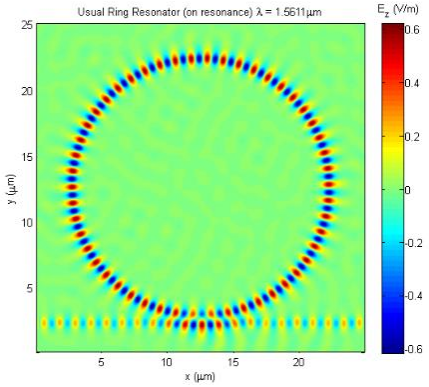


شکل ۵: شبیه‌سازی انتشار نور در بسامد غیرتشدید توری میکروحلقه.

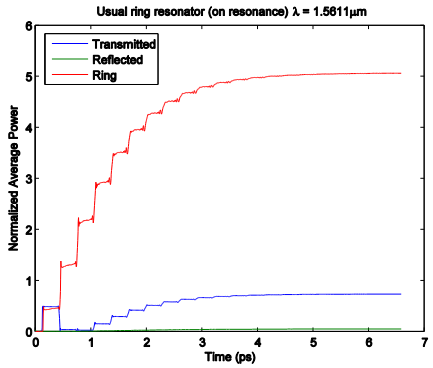


شکل ۶: میانگین زمانی توان بهنجار توری میکروحلقه خارج تشدید.

برای مقایسه عملکرد توری میکروحلقه با یک میکروحلقه معمولی با همان ابعاد شکل (۱) و ضریب‌شکست ۱٫۵، شبیه سازی مشابهی در شکل (۷) برای طول موج تشدید ۱٫۵۶۱۱μm مد مرتبه ۵۰ نشان داده شده است. در شکل (۸) نیز میانگین زمانی توان بهنجار داخل میکروحلقه معمولی برحسب زمان با رنگ قرمز ترسیم شده است که نشان می‌دهد در حالت پایا حدود ۵ برابر میانگین توان ورودی است. میزان توان خروجی از موجبر نیز با رنگ آبی ترسیم شده است که در حالت پایا حدود ٪۷۳ میانگین توان خروجی است. میزان توان انعکاس یافته نیز بسیار ناچیز (حدود ٪۴) است. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که میزان توان پراکنده شده توسط میکروحلقه معمولی ٪۱۳ است که این رقم برای توری میکروحلقه حدود ٪۷۳ می‌باشد. یکی از راه‌های کاهش افت میکروحلقه بزرگتر انتخاب نمودن پهنای بدنه میکروحلقه (تفاضل بین شعاع خارجی و داخلی میکروحلقه) است که پرداختن به آن خارج از موضوع بحث این مقاله است.



شکل ۷: شبیه سازی انتشار نور در تشدید میکروحلقه معمولی.



شکل ۸: میانگین زمانی توان بهنجار میکروحلقه معمولی در تشدید.

۳- نتیجه‌گیری

توری میکروحلقه می‌تواند گستره طیفی طول موج‌های تشدید میکروحلقه را بطور موثر تغییر دهد آنطورکه نسبت میدان الکتریکی موج انتقال یافته به میکروحلقه در یکی از طول‌موج‌های تشدید در حدود دو برابر دیگر طول موج‌های تشدید شود که این پدیده با افزایش افت همراه است. از این اثر می‌توان در طراحی مدارهای مجتمع فوتونیکی جهت حذف دیگر طول موج‌ها استفاده نمود.

مراجع

[1] Kamalakis, T., Alexandropoulos, D., & Vainos, N., *Efficient design of polymer micro-ring resonator filters based on coupled mode theory and finite difference mode solver*. **Optics Communications,** 399(0), (2015) 123-128.

[2] Kang, Y. M., Arbabi, A., & Goddard, L. L., *A microring resonator with an integrated Bragg grating: a compact replacement for a sampled grating distributed Bragg reflector*, **Optical and quantum electronics**, 41(9), (2009) 689-697.

[3] Taflove, A., & Hagness, S. C. *Computational Electrodynamics: the FDTD method*. Artech House Boston, London, third ed, 2005.

[4] Mur, G. *Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations*, **Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on**, (4), (1981) 377-382.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]