بیست و چهارمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و
دهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۱۰ الی ۱۲ بهمن ۹۶ - دانشگاه شهرکرد
24th Iranian Conference on Optics and Photonics (ICOP 2018) and
9th Iranian Conference on Photonics Engineering and Technology (ICPET 2018)
Jan 30 - Feb 1 , 2018 - Shahrekord University

بررسی شکل‌خط تشدید فانو در جفت‌شدگی فیبر نوری تک‌مد و میکرومشدد WGM با استفاده از توری پراش

حمید نادگران[۱]، رضا ذوالفقاری قربانی[۱]، راحله پورمند[۲]

[۱] بخش فیزیک دانشگاه شیراز
[۲] مرکز آموزش عالی دولتی استهبان

چکیده – در این کار نشان داده می‌شود که در ساختار جفت‌شدگی عمودی میکرومشدد *WGM* و فیبرنوری تک‌مد با استفاده از توری پراش فلزی، شکل‌خط تشدید فانو به حالت قطبش موج فرودی بستگی دارد. تحت قطبش *TE* و *TM*، شکل‌خط تشدید فانو به ترتیب *peak-dip resonance* و *dip-peak resonance* می‌باشد. همچنین، نشان داده شده است که با افزایش شکاف میان توری پراش و میکرومشدد، ضریب کیفیت افزایش و اختلاف شدت روشن-خاموش در طیف بازتابی به‌طور مداوم کاهش می‌یابد. این روند افزایش ضریب کیفیت تا زمانی که اندازه شکاف به ۳۵۰ نانومتر برسد، ادامه می‌یابد. پس از آن، تشدید فانو به دلیل کاهش قدرت جفت‌شدگی، شکل‌خط ایده‌آل خود را از دست می‌دهد. تعیین این شکاف هوای بهینه در تصویربرداری میدان نزدیک میکروسکوپ‌های کانفوکال اهمیت فراوانی دارد.

کلید واژه- تشدید فانو، جفت‌شدگی عمودی، میکرومشدد WGM

Investigation of Fano resonance line shapes in coupling between single-mode optical fiber and WGM microresonator using diffraction grating

H. Nadgaran[1], R. Zolfaghari Ghorbani[1], R. Pourmand[2]

[1] Physics Dep. Shiraz University, Shiraz 71454, Iran

[2] Physics Dep. Estahban Higher Education Center, Estahban, Iran

Abstract- It has been demonstrated that, in vertical coupling structure between WGM microresonator and a single mode optical fiber using the metallic diffraction grating, Fano resonance line-shape depends on incident wave polarization. Under TE and TM polarization, Fano resonance line-shape are peak-dip resonance and dip-peak resonance respectively. Also, it is shown that by increasing the gap size between the diffraction grating and microresonator, the Q-factor increase and the on-off intensity difference of the reflection spectral line decrease continuously. This progressive trend of Q-factor continues until the gap size reaches 350 nm. Beyond that, the Fano resonance loses its ideal line-shape because of decreasing coupling strength. This optimum gap size can be exploited in near filed imagining of confocal microscopes.

Keywords: Fano resonance, vertical coupling, Microresonator WGM

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

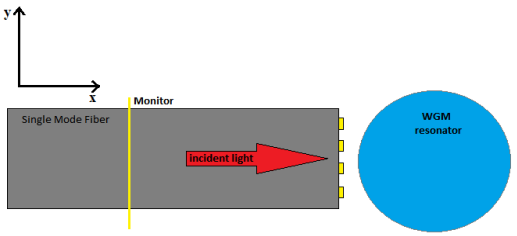
تشدید فانو که نتیجه تداخل دو مد است موجب نوعی شکل‌خط طیفی نامتقارن می‌شود. نمایه نامتقارن این نوع تشدید نتیجه تداخل‌های سازنده و ویرانگر دو مد با اختلاف فاز مشخص در فاصله فرکانسی کوچک است. پدیده فانو در زمینه‌های مختلف از جمله فیزیک هسته‌ای، فیزیک اتمی، اپتیک غیرخطی، و ... پدیدار می‌شود[۱, ۲].

میکروکاواک‌ها، مشددهای اپتیکی هستند که ابعادشان از مرتبه طول موج، یا کمتر از آن است. میکرو مشدد WGM با تقارن دایروی قادر به تشکیل مجموعه مدهای سطحی WGM با حجم مد بسیار کوچک و ضریب کیفیت بسیار بالا می‌باشد، که به علت داشتن این خصوصیات، از عناصر کلیدی در ساختارهای اپتیکی به شمار رفته و عملکرد آنها را بهبود می‌بخشد و در حسگرها[۳]، فیلترها[۴]، لیزرها[۵] و ... به کار برده می‌شود[۶].

با استفاده از WGM با ضریب کیفیت بسیار بالا که به راحتی با دیگر منابع اپتیکی برهمکنش می‌کند می‌توان تشدید فانو را تولید کرد[۷]. در این کار هدف پیدا کردن فاصله بهینه توری با میکرودیسک در ساختار مورد مطالعه است که طبق اطلاع نویسندگان تاکنون انجام نشده‌است.

۲- اصول کار

مطابق شکل (۱)، ساختار مورد مطالعه شامل یک توری پراش فلزی از طلا می‌باشد که بر انتهای فیبر نوری تک‌مد قرار داده شده است.



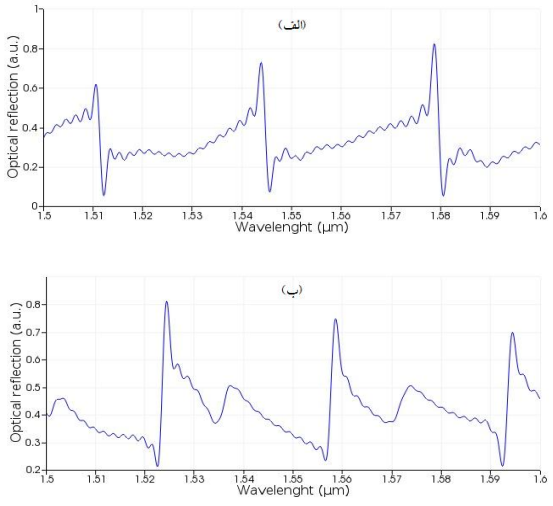
شکل ۱: نمایش دوبعدی جفت‌شدگی عمودی میکرومشدد WGM و فیبر نوری تک‌مد با استفاده از توری پراش طلا

شبیه‌سازی در این کار توسط نرم‌افزار Lumerical به روش FDTD انجام شده‌است. برای محاسبات سریعتر، شبیه‌سازی در دو بعد انجام گرفته است، بدین معنا که از تقریب میکرودیسک به جای میکروکره استفاده شد و قطر میکرودیسک (سیلیکا) ۱۶ میکرومتر انتخاب گردید. دوره توری برابر با ۱/۲ میکرومتر به گونه‌ای که ۰/۶ میکرومتر لایه طلا و ۰/۶ میکرومتر لایه هوا می‌باشد و ضخامت آن ۱۰۰ نانومتر است. شکاف هوا بین توری و میکرودیسک ۱۵۰ نانومتر انتخاب شده است. در این کار از منبع گوسی در بازه طول موجی بین ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ نانومتر استفاده گردیده است.

در این ساختار جفت‌شدگی عمودی بین میکرومشدد WGM و فیبر نوری تک‌مد با استفاده از توری پراش فلزی، نتیجه تداخل بین مدهای WGM و نور بازتابی مستقیم از توری، مطالعه شده است.

۲-۱- شکل‌خط تشدید فانو تحت قطبش TE و TM

مبانی نظری این کار در مرجع [۷] آمده است.در نتایج شبیه‌سازی مشاهده شده است که شکل‌خط طیفی نامتقارن از تشدید فانو به حالت قطبش موج فرودی بستگی دارد، به طوری که اگر موج فرودی دارای قطبش TE باشد شکل‌خط تشدید فانو در نمودار طیفی بازتاب از مقدار بیشینه به مقدار کمینه افت می‌کند که به آن peak-dip resonance گفته می‌شود. و حال اگر موج فرودی دارای قطبش TM باشد شکل‌خط تشدید فانو در نمودار طیفی بازتاب از مقدار کمینه به مقدار بیشینه خود می‌رسد که به آن dip-peak resonance گفته می‌شود. در شکل (۲) بستگی شکل‌خط تشدید فانو به حالت قطبش موج فرودی قابل مشاهده است.



شکل ۲: نمایش تفاوت شکل‌خط تشدید فانو در ساختار مورد بررسی که موج در نمودار(الف) تحت قطبش TE و در نمودار(ب) تحت قطبش TM می‌باشد.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

تفاوت فاز ۹۰ درجه‌ای بین قطبش‌های TE و TM باعث متفاوت بودن شکل‌خط طیفی تشدید فانو صرف‌نظر از اندازه مشدد، قدرت و توان جفت‌شدگی، فرکانس ورودی و یا هندسه توری می‌شود.

۲-۲- بررسی ویژگی‌های شکل‌خط تشدید فانو در اثر تغییر شکاف میان توری طلا و میکرو مشدد WGM

در این قسمت کار، با تغییر شکاف میان توری پراش طلا و میکرومشدد WGM به بررسی ویژگی‌های شکل‌خط تشدید فانو در ساختار پرداخته شده است.

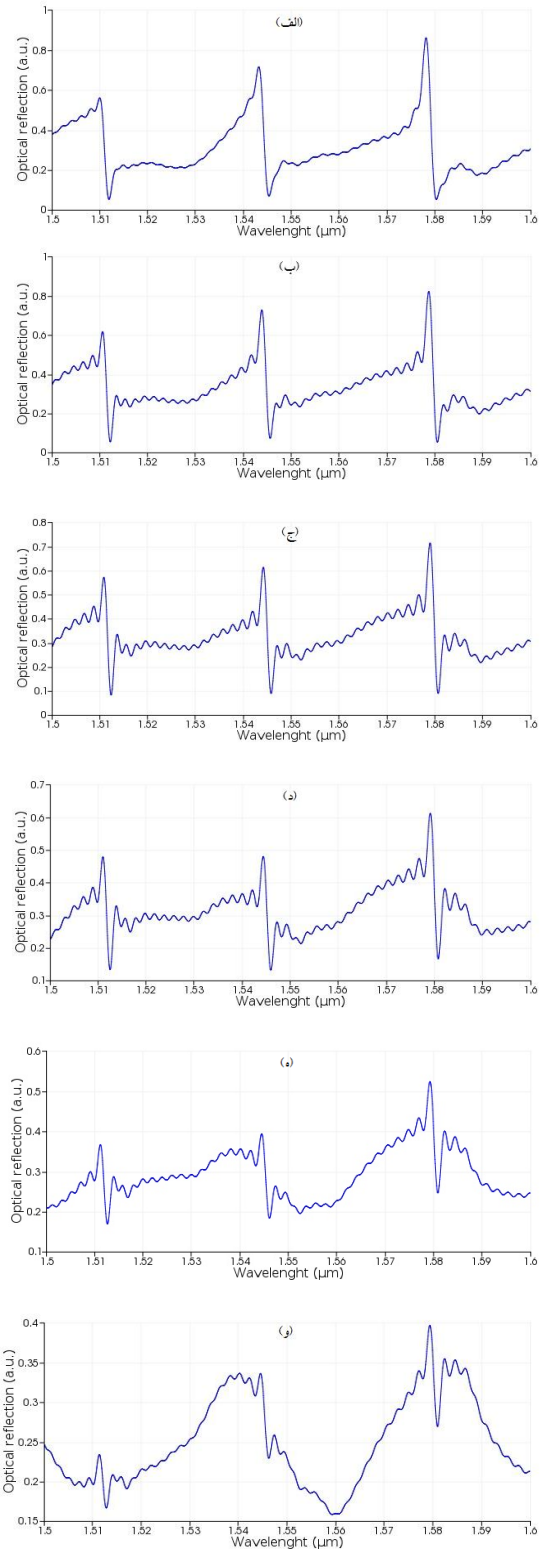
با تغییر شکاف از ۵۰ نانومتر تا ۵۵۰ نانومتر، روند تغییرات شکل‌خط تشدیدهای فانو در شکاف‌های مختلف در شکل (۳) قابل مشاهده است.

در جدول (۱) برای شکل‌خط تشدید فانو تشکیل‌شده در طول موج ۱۵۸۰ نانومتر در این بازه طول موجی در شکاف‌های مختلف مقادیر ضریب کیفیت با استفاده از رابطه(۱) و اختلاف شدت(اختلاف بیشینه و کمینه) در طیف بازتابی آورده شده است.

جدول ۱: مقادیر ضریب کیفیت و اختلاف شدت در طیف بازتابی در شکاف‌های مختلف

اختلاف شدت	ضریب کیفیت	مقدار شکاف هوا
۰/۸۰۷	۹۴۶/۹۴۸	۵۰ نانومتر
۰/۷۷۹	۱۱۹۵/۹۴۶	۱۵۰ نانومتر
۰/۶۲۴	۱۲۹۴/۱۹۶	۲۵۰ نانومتر
۰/۴۴۵	۱۳۲۶/۹۴۹	۳۵۰ نانومتر
۰/۲۷۷	۱۲۱۴/۵۴۲	۴۵۰ نانومتر
۰/۱۲۷	۱۰۱۲/۳۷۱	۵۵۰ نانومتر

با توجه به مقادیر جدول مشاهده می‌شود که با افزایش شکاف هوا ضریب کیفیت افزایش و اختلاف شدت کاهش می‌یابد تا جایی که برای شکاف هوای بزرگتر از ۳۵۰ نانومتر به دلیل ضعیف شدن جفت‌شدگی و کاهش ضریب کیفیت و کوچک بودن اختلاف شدت، تشدید فانو شکل خط ایده‌آل خود را از دست می‌دهد.



شکل ۳: نمایش شکل‌خط تشدید فانو در شکاف هوا (الف) ۵۰ نانومتر (ب) ۱۵۰ نانومتر (ج) ۲۵۰ نانومتر (د) ۳۵۰ نانومتر (ه) ۴۵۰ نانومتر (و) ۵۵۰ نانومتر

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

$$Q = \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} \quad (۱)$$

که λ_0 طول موج تشدید و $\Delta\lambda$ پهنای کل در نیم‌بیشینه می‌باشد.

۳- مقایسه

نتایج این کار با نتایج تجربی مرجع [۸] مقایسه شده‌است که حاکی از تطابق خوبی میان این دو مورد است.

۴- نتیجه‌گیری

در این کار با ساختار جفت‌شدگی عمودی میان میکرومشدد WGM و فیبر نوری تک‌مد با استفاده از توری پراش طلا مشاهده شد که تغییر در شکل‌خط تشدید فانو از قطبش موج فرودی سرچشمه می‌گیرد.

تاثیر اندازه شکاف هوای بین توری پراش و میکرومشدد WGM و بهینه کردن مقدار آن اهمیت کلیدی در تصویربرداری میکروسکوپ‌های کانفوکال دارد. این مقدار برای این ساختار ۳۵۰ نانومتر بدست آمده است.

عدد ۳۵۰ نانومتر، اندازه شکاف میان توری پراش و میکرودیسک برای کار کردن با میدان‌های نزدیک عدد بزرگی است ولی از آنجا که می‌توان با میکروسکوپ‌های کانفوکال، میدان‌های تشکیل‌شده در این فاصله را به میدان‌های دور تبدیل کرد، فاصله مزبور می‌تواند مبنایی برای انتقال تصویر به دور باشد.

مراجع

[1] Bianconi, A. *Ugo Fano and shape resonances*. in *AIP Conference Proceedings*. 2003. AIP.

[2] Miroshnichenko, A.E., S. Flach, and Y.S. Kivshar, *Fano resonances in nanoscale structures.* Reviews of Modern Physics, 2010. **82**(3): p. 2257.

[3] Vollmer, F. and S. Arnold, *Whispering-gallery-mode biosensing: label-free detection down to single molecules.* Nature methods, 2008. **5**(7): p. 591-596.

[4] Monifi, F., et al., *A robust and tunable add–drop filter using whispering gallery mode microtoroid resonator*. Journal of Lightwave Technology, 2012. **30**(21): p. 3306-3315.

[5] Spillane, S., T. Kippenberg, and K. Vahala, *Ultralow-threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity.* Nature, 2002. **415**(6872): p. 621-623.

[6] Zhou, Y., et al., *Controlled excitation of higher radial order whispering gallery modes with metallic diffraction grating.* Optics express, 2015. **23**(4): p. 4991-4996.

[7] Zhou, Y., et al., *Fano resonances in metallic grating coupled whispering gallery mode resonator.* Applied Physics Letters, 2013. **103** :(۱۰)p. 151108.

[8] Zhou, Y., et al. *Metallic grating coupled whispering gallery mode resonator*. in *Frontiers in Optics*. 2013. Optical Society of America.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]