

مشخصه‌یابی و تعیین نوع جفت‌شدگی تشدیدگرهای حلقه‌ای و Add-Drop تار نوری با ضریب کیفیت بالا به روش جاروب سریع فرکانس لیزری

مجتبی ارجمند^{۳,۲,۱}، آیدا آرای^{۳,۲,۱}، محمود سلطان‌الکتابی^۱، حسین ثقفی^۲، Simone Berneschi^۳، Gualtiero N. Conti^۳

^۱دانشگاه اصفهان - دانشکده علوم - گروه فیزیک

^۲دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی

^۳Istituto di Fisica Applicata "N. Carrara", IFAC-CNR, Florence, Italy

چکیده - در این مقاله با برپایی چیدمان آزمایشگاهی تشدیدگرهای حلقه‌ای تار نوری و Add-Drop، طیف تشدید آن‌ها را در سرعت‌های آهسته و سریع جاروب طول‌موج لیزری اندازه‌گیری کرده‌ایم. نشان دادیم که طیف عبوری این تشدیدگرها به ازای فرکانس مدولاسیون بالا به صورت نوسانی در می‌آید. سپس با بکارگیری یک الگوی ریاضی برای تغییرات دامنه میدان درون تشدیدگر و انطباق نتایج تجربی بر نتایج نظری، ویژگی‌های فیزیکی تشدیدگرها از جمله ضریب کیفیت، ضریب جفت‌شدگی، رژیم جفت‌شدگی نور به تشدیدگر و طول عمر فوتون را تعیین کرده‌ایم.

کلید واژه- تشدیدگر فیبر نوری، رژیم جفت‌شدگی، ضریب کیفیت تشدیدگر، طول عمر فوتون.

Characterization and Coupling Regime Determination of Fiber Optic Ring and Add-Drop Resonators Using Rapid Sweeping of Laser Frequency

Mojtaba Arjmand^{1,2,3}, Ayda Aray^{1,2,3}, Mahmood Soltanolkotai¹, Hossein Saghaifar², S. Berneschi³, G. N. Conti³

¹Department of Physics, Faculty of Science, University of Isfahan

²Faculty of Applied Sciences, Malekashtar University of Technology

³Istituto di Fisica Applicata "N. Carrara", IFAC-CNR, Florence, Italy

Abstract- In this paper, we establish an experimental setup for testing fiber optic ring and Add-Drop resonators. The transmission spectrum is measured in slow and fast sweeping of laser wavelength. It is shown that for high modulation frequency of the laser source, the ringing phenomenon appears and the transmission becomes oscillatory. Then, using a mathematical model for amplitude variation of field inside resonator and fitting experimental results with theoretical ones, we will be able to determine the physical characteristics of the resonator such as Q-factor, coupling coefficient, coupling regime and photon lifetime.

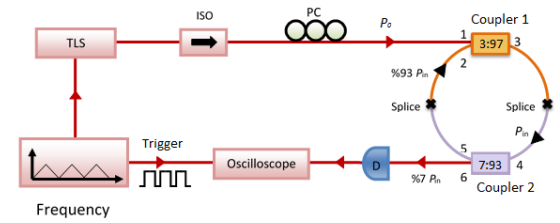
Keywords: Coupling regime, Fiber ring resonator, Photon lifetime, Resonator quality factor.

۱- مقدمه

تشدیدگرها و میکرو تشدیدگرهای نوری با ضریب کیفیت بالا در بسیاری از زمینه ها از جمله اپتیک غیر خطی [۱] و کاربردهای حسگری [۲] اهمیت دارند. در بسیاری از کاربردها علاوه بر نیاز به اندازه گیری دقیق ضریب کیفیت Q ، باید ماهیت و نوع جفت شدگی نور به تشدیدگر نیز معلوم باشد. نوع جفت شدگی نور به تشدیدگر، از طریق اندازه گیری مقدار نسبی میدان جفت شده به تشدیدگر نسبت به تلفات ذاتی تشدیدگر تعیین می شود [۳]. معمولاً ضریب کیفیت Q تشدیدگر، در حالت ایستا اندازه گیری می شود. منظور از حالت ایستا آن است که سرعت اسکن طول موج برای یک چشمه لیزری کوک پذیر بسیار پایین است بطوریکه طیف تشدید خروجی از تشدیدگر مشابه با حالتی خواهد بود که از یک چشمه پیوسته استفاده می شود. بنابراین در این حالت تنها قادر به تشخیص جفت شدگی بحرانی خواهیم بود و آن زمانی است که در طیف عبوری تشدیدگر، بزرگی شدت در فرکانس های تشدید به صفر می رسد. در این مقاله با برپایی چیدمان یک تشدیدگر تار نوری و بکارگیری اسکن سریع طول موج برای چشمه لیزری کوک پذیر، یک طیف تشدید نوسانی حاصل می شود. از طرفی با استفاده از روابط ریاضی و انطباق نتایج تجربی با نتایج حاصل از شبیه سازی، مشخصات فیزیکی تشدیدگر از جمله ضریب کیفیت، ضریب تزویج و نوع جفت شدگی تعیین می شود.

۲- برپایی آزمایشگاهی

برپایی آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. چشمه نوری، یک لیزر کوک پذیر با بیشینه توان 5mW است که در بازه طول موجی $1620\text{nm} - 1515\text{nm}$ عمل می کند. با استفاده از یک فانکشن ژنراتور و اعمال مدولاسیون با شکل مشخص به آینه های کاواک لیزری، طول موج مرکزی لیزر جابجا می شود که بازه جاروب فرکانس مرکزی این لیزر برابر با 3GHz است. با تنظیم توان خروجی لیزر بر روی 1mW و پس از مدوله کردن لیزر بوسیله فانکشن ژنراتور، نور چشمه لیزری از ایزولاتور تار نوری و کنترل کننده قطبش عبور می کند تا نور با قطبش دلخواه درون تشدیدگر فرستاده شود. تشدیدگر Add-Drop در اینجا از اتصال درگاه های خروجی و ورودی دو تزویجگر تار نوری



شکل ۱: چیدمان تجربی بکار رفته برای تعیین ویژگی های فیزیکی تشدیدگر فیبری. TLS: چشمه نوری کوک پذیر- ISO: ایزولاتور نوری- PC: کنترل کننده قطبش- Coupler: تزویجگر- D: آشکارساز سریع

با نسبت تفکیک $3:97$ و $7:93$ تشکیل شده است. طول تشدیدگر تقریباً 4 متر است و طول موج تشدید بر روی 1550nm تنظیم شده است. سیگنال خروجی از تشدیدگر به یک آشکارساز سریع فرستاده شده و بوسیله یک اسیلوسکوپ دیجیتال اندازه گیری می شود.

۳- روابط ریاضی حاکم بر تشدیدگر

اگر دامنه میدان ورودی به موجبر را با S_{in} و دامنه میدان نوری درون تشدیدگر را با u نشان دهیم، در این صورت تحول زمانی u را می توان با استفاده از الگوی ساده ی نوسانگر هماهنگ بدست آورد [۴]:

$$\frac{du}{dt} = \left(j\omega_0 - \frac{1}{\tau} \right) u(t) + \sqrt{\frac{2}{\tau_e}} S_{in}(t) \quad (1)$$

که در آن ω_0 فرکانس زاویه ای تشدید، $\tau/2$ طول عمر کلی فوتون در تشدیدگر، و $\tau_e/2$ طول عمر جفت شدگی نور به بیرون تشدیدگر است. مد نوری تشدیدگر با سه پارامتر مشخص می شود: فرکانس تشدید ω_0 ، آهنگ کاهش دامنه میدان u در اثر اتلاف های داخلی (پارامتر $1/\tau_0$)، و نرخ کاهش دامنه میدان u در اثر نشت توان نوری از طریق تزویجگر (پارامتر $1/\tau_e$). میدان خروجی موجبر هم به شکل زیر به دامنه میدان درون تشدیدگر مربوط می شود:

$$S_{out}(t) = -S_{in}(t) + \sqrt{\frac{2}{\tau_e}} u(t) \quad (2)$$

تنها میدان های ورودی با تغییرات زمانی به شکل $S_{in}(t) = S_0 \exp[j\varphi(t)]$ را در نظر می گیریم که $\varphi(t)$ تابعی حقیقی است. در رژیم ایستا فرض می کنیم $\varphi(t) = \omega t$ که در آن $\omega = \omega_0 + 2\pi\delta$ و پارامتر δ نیز جابجایی فرکانسی از حالت تشدید است. در مدولاسیون سریع فرکانس لیزری، تغییرات زمانی فاز چشمه لیزری را

به صورت $\varphi(t) = \omega(t) \cdot t$ در نظر می‌گیریم که در آن:

$$\omega(t) = \omega_i + \frac{\Omega}{2T_s} t \quad (3)$$

در شروع اسکن فرکانس زاویه‌ای (زمان $t=0$)، تشدیدگر با یک موج ایستا به فرکانس ω_i تحریک می‌شود و Ω کل بازه‌ی فرکانس زاویه‌ای است که در مدت زمان T_s روبش می‌شود (ω_i) فرکانس اولیه‌ی چشمه لیزری است و در زمان‌های بعدی و با جابجایی آینه‌های کاواک لیزر کوک-پذیر، فرکانس چشمه لیزری به ω تغییر می‌کند؛ ω_0 نیز فرکانس تشدید مشخصه‌ی تشدیدگر تحت بررسی است). با انتگرال‌گیری از رابطه (۱) داریم:

$$u(t) = \sqrt{\frac{2}{\tau_e}} s_0 \exp\left(j\omega_0 t - \frac{t}{\tau}\right) \times \left[f(t) - f(0) + \frac{1}{j(\omega_i - \omega_0) + 1/\tau} \right] \quad (4)$$

که تابع $f(t)$ را می‌توان با استفاده از تابع خطای مختلط $\text{erf}(z)$ که در آن z عددی مختلط است بیان کرد:

$$f(t) = -\sqrt{\frac{j\pi}{2V_s}} \exp\left[\frac{-j(2\pi\delta_i - j/\tau)^2}{2V_s}\right] \times \text{erf}\left(\frac{j/\tau - 2\pi\delta_i - V_s t}{\sqrt{2jV_s}}\right) \quad (5)$$

در این رابطه $2\pi\delta_i = \omega_i - \omega_0$ بعنوان جابجایی فرکانسی اولیه و $V_s = \Omega/(2\pi T_s)$ یا $\tilde{V}_s = \Omega/(2\pi T_s)$ بعنوان سرعت روبش فرکانس تعریف شده‌اند. عبوردهی $T(t)$ تشدیدگر طبق رابطه (۶) و با استفاده از روابط (۲)-(۵) بدست می‌آید:

$$T = \left| \frac{s_{out}}{s_{in}} \right|^2 = \left| \frac{s_{out}}{s_0} \right|^2 \quad (6)$$

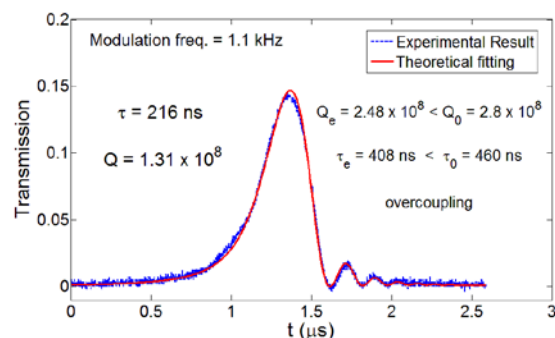
۴- مقایسه نتایج تجربی با نتایج نظری

در این بخش بطور تجربی نشان می‌دهیم که به کمک الگوی نظری ذکر شده در بخش قبل، می‌توان طول عمر جفت‌شدگی فوتون τ_e ، طول عمر ذاتی فوتون τ_0 ، و سرعت روبش V_s را از اندازه‌گیری‌های زمانی بدست آورد و بنابراین با در دست داشتن مقادیر مربوط به این پارامترها،

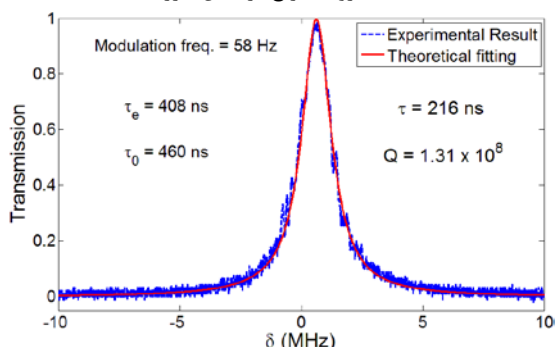
تمامی اطلاعات تشدیدگر نوری از جمله بزرگی اتلاف‌های ذاتی تشدیدگر، و ضریب جفت‌شدگی نور به تشدیدگر به طور دقیق قابل اندازه‌گیری است. قابل ذکر است که این روش برای دستیابی به اطلاعات تمامی تشدیدگرهای نوری از جمله تشدیدگرهای میکرو کره، میکرو دیسک، میکرو حلقه و ... قابل انجام است. برای پیاده‌سازی این روش از چیدمان آزمایشگاهی شکل (۱) استفاده کرده‌ایم. ابتدا به جای تشدیدگر Add-Drop شکل (۱)، از یک تشدیدگر حلقه‌ای ساده استفاده کرده‌ایم. این تشدیدگر حلقه‌ای از اتصال درگاه‌های ورودی و خروجی یک تزویجگر تار نوری 2×2 با نسبت تزویج ۹۹:۱ شکل گرفته است. با مقایسه نتایج تجربی مربوط به عبوردهی T_{meas} با نتایج الگوسازی نظری و تغییر پارامترهای نظری، بهترین انطباق زمانی حاصل می‌شود که خطای زیر کمینه گردد:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N [T_{meas,i} - T_{theo,i}(\tau_0, \tau_e, V_s)]^2 \quad (7)$$

در رابطه فوق N تعداد نقاط نمونه‌گیری زمانی است. با تغییر اتوماتیک مقادیر τ_0 ، τ_e ، V_s ، مقدار σ^2 نیز تغییر می‌کند و هنگامی که بهترین تطابق بین نتایج تجربی و نظری حاصل شود مقدار σ^2 کمینه می‌شود. شکل (۲) نتایج حاصل برای طیف عبور تشدیدگر را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها به ازای مقادیر مختلف فرکانس مدولاسیون اعمالی به لیزر انجام شده است. چنانچه مشاهده می‌شود به ازای فرکانس‌های مدولاسیون پایین (۱۲ Hz)، طیف تشدید همان شکل لورنتسی مورد انتظار را دارد و هنگامی که نرخ جاروب فرکانس لیزری سریع است (۱۰۸ Hz)، پیک‌های تشدید از حالت لورنتسی محض خارج شده و شکل نوسانی میرا شونده را به خود می‌گیرند. چنانچه از شکل (۲) مشخص است برای این تشدیدگر $Q_e \sim 5 \times 10^9$ و $Q_0 \sim 10^9$ بنابراین $Q_e > Q_0$ و این تشدیدگر همواره در رژیم جفت‌شدگی کمتر از حد بحرانی قرار دارد. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده برای τ_0 ، τ_e و τ_L برای ضریب کیفیت کل مقدار $Q \sim 8/9 \times 10^9$ و برای ضریب جفت‌شدگی تزویجگر $|k|^2 = 0/67$ بدست آمده است که در توافق با مشخصات ارائه شده برای تزویجگر ($|k|^2 = 1\%$) است و این امر درستی مقدار بدست آمده برای Q_e را نشان می‌دهد.



الف) جاروب سریع فرکانس لیزری



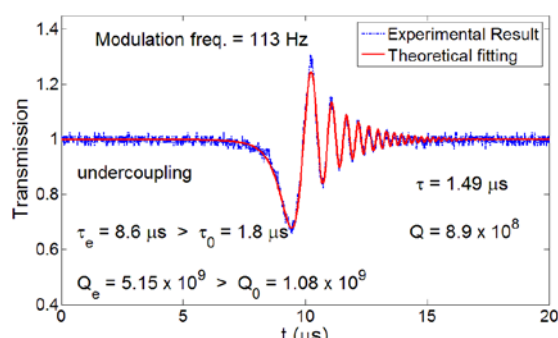
ب) جاروب آهسته فرکانس لیزری

شکل ۳: تطبیق نتایج نظری (منحنی پیوسته قرمز) بر نتایج تجربی (منحنی خطچین آبی) مربوط به طیف عبور تشدیدگر Add-Drop در دو حالت (الف) جاروب سریع فرکانس لیزری و (ب) جاروب آهسته فرکانس لیزری (حالت متداول در اندازه‌گیری طیف عبوری تشدیدگر). توان خروجی لیزر برابر ۱ mW و طول موج لیزر برابر ۱۵۵۰ nm است.

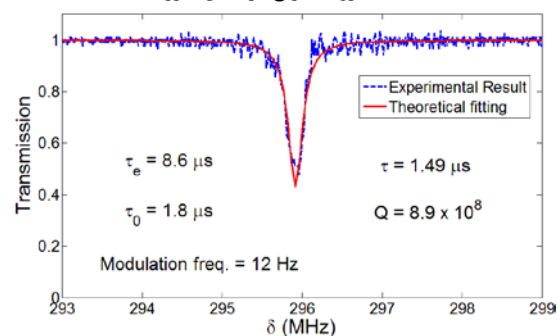
تشدیدگرهای با ضریب کیفیت بالا، در صورتیکه فرکانس لیزری با سرعت بالایی مدوله شود، طیف عبور تشدیدگر به صورت نوسانی در می‌آید. در این حالت می‌توانیم مقادیر مربوط به ضریب کیفیت کل (Q)، ضریب جفت-شدگی نور به تشدیدگر، نوع رژیم جفت‌شدگی، اتلاف نور درون تشدیدگر، طول عمر فوتون (τ_e و τ_0) و زمان رفت و برگشت نور درون تشدیدگر (τ_L) را تنها با یک اندازه‌گیری تعیین کنیم.

مراجع

- [1] A. Rasoloniaina et al, "Analysis of third-order nonlinearity effects in very high-Q WGM resonator cavity ringdown spectroscopy," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 32, pp. 370, 2015.
- [2] J. Zhu et al., "On-chip single nanoparticle detection and sizing by mode splitting in an ultrahigh-Q micro-resonator," Nat. Photonics, Vol. 4, pp. 4649, 2009.
- [3] J. E. Heebner et al., "Optical transmission characteristics of fiber ring resonators," IEEE J. Quantum Electron, Vol. 40, pp. 726-730, 2004.
- [4] Y. Dumeige et al., "Determination of coupling regime of high-Q resonators and optical gain of highly selective amplifiers," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 25, 20732080, 2008.



الف) جاروب سریع فرکانس لیزری



ب) جاروب آهسته فرکانس لیزری

شکل ۲: تطبیق نتایج نظری (منحنی پیوسته قرمز) بر نتایج تجربی (منحنی خطچین آبی) مربوط به طیف عبور تشدیدگر فیبری در دو حالت (الف) جاروب سریع فرکانس لیزری و (ب) جاروب آهسته فرکانس لیزری (حالت متداول در اندازه‌گیری طیف عبوری تشدیدگر). توان خروجی لیزر برابر ۱ mW و طول موج لیزر برابر ۱۵۷۰ nm است.

اکنون ساختار تشدیدگر تار نوری Add-Drop را در نظر می‌گیریم. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، تشدیدگر تار نوری Add-Drop را از اتصال درگاه‌های دو تزویجگر تار نوری 2×1 به یکدیگر ایجاد کرده‌ایم. از آنجا که در تشدیدگر Add-Drop از دو تزویجگر با ضرایب جفت‌شدگی و اتلاف‌های متفاوت استفاده شده است، بنابراین طول عمر جفت‌شدگی فوتون ($\tau_e/2$) برای هر یک از این تزویجگرها متفاوت خواهد بود. شکل (۳) نتایج حاصل برای طیف عبور تشدیدگر Add-Drop را نشان می‌دهد. برای این تشدیدگر $Q_e \sim 2/5 \times 10^8$ و $Q \sim 2/8 \times 10^8$ و $Q_0 \sim Q_e$ بنابراین تشدیدگر همواره در رژیم جفت-شدگی بیشتر از حد بحرانی قرار دارد. با توجه به مقادیر τ_e و τ_0 برای ضریب کیفیت کل مقدار $Q \sim 1/3 \times 10^8$ ، برای ضرایب جفت‌شدگی دو تزویجگر $|K_1|^2 = 2/9$ و $|K_2|^2 = 7/2$ و بدست می‌آید.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله نشان دادیم که در چیدمان تست