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

بررسی پارامترهای تشدیدگر حلقوی به منظور بهبود حساسیت ژیروسکوپ نوری تشدیدی مجتمع

وحید سلیمانزاده، مهسا پورنیا، مرتضی فتحی پور، محمود شاه آبادی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران،ایران

چکیده – ژیروسکوپهای مجتمع نوری تشدیدی، حسگرهایی هستند که سرعت زاویه ای را با دقت و حساسیت بالا اندازه گیری می نمایند. اساس عملکرد آنها بر پایه اثر ساگناک بوده و تاثیرپذیری بسیار کمی نسبت به پارامترهای محیط مانند ارتعاش و دما دارند. مهمترین بخش این حسگرها تشدیدگر حلقوی است و پارامترهای آن بیشترین تاثیر را بر حساسیت حسگر دارند. در این مقاله به بررسی تاثیر پارامترهای شعاع، ضریب شکست، ضریب تزویج، طول موج لیزر و تلفات بر افزایش حساسیت ژیروسکوپ نوری پرداخته شده است.

کلید واژه: ژیروسکوپ نوری ، سرعت زاویه ای ، اثر ساگناک ، تشدیدگر حلقوی

A Study on the Ring Resonator Parameters to Improve the Sensitivity of Integrated Ring Resonator Gyroscopes

Vahid Soleymanzadeh, Mahsa Pournia, Morteza Fathipour, Mahmood Shahabadi

Department of Electrical and Computer Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

Abstract – Integrated optical gyroscopes (IOGs), are highly precision and sensitive angular velocity sensors which operate based on Sagnac effect and the environmental parameters such as temperature and mechanical vibrations have inconsiderable effects on them. One of the most important parts of an IOG is the ring resonator which plays a critical role on the sensivity of the sensor. In this study, some of the ring resonator's parameters such as radius, coupling coefficients, laser's wavelength and power loss are evaluated in order to improve the sensivity of the IOGs.

Keywords: Optical Gyroscope, Angular Velocity, Sagnac Effect, Ring Resonator

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

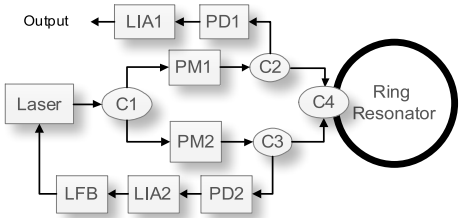
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

ژیروسکوپ نوری تشدیدی مجتمع دسته ای از حسگرهای سنجش سرعت زاویه ای است که دارای دقت بالا، تاثیر پذیری بسیار اندک از محیط و ابعاد کوچک هستند و اساس عملکرد آنها تغییر فرکانس تشدید بر اثر پدیده ساگناک می باشد.

مهمترین بخش یک ژیروسکوپ نوری تشدیدی مجتمع، تشدیدگر حلقوی است و پارامترهای آن بیشترین تاثیر را بر حساسیت حسگر دارند. در این مقاله به تحلیل و بررسی تاثیر پارامترهای تشدیدگر حلقوی برای بهبود حساسیت حسگر می پردازیم. برای این منظور در بخش ۲ بلوک دیاگرام کلی ژیروسکوپ تشدیدی مجتمع مورد بحث ترسیم شده است. در بخش ۳ رابطه تغییر فرکانس تشدید بر اثر چرخش استخراج شده و در بخش ۴ رابطه مربوط به خروجی تشدیدگر محاسبه شده است. در بخش ۵ پارامترهای تشدیدگر با توجه به نتایج بدست آمده از بخش ۴ و شبیه سازی های انجام شده بررسی و تحلیل می شود و در نهایت در بخش ۶ با ارایه نتیجه گیری این مقاله را به پایان می بریم.

۲- بلوک دیاگرام کلی ژیروسکوپ نوری تشدیدی[۱]و[۲]:



شکل۱ بلوک دیاگرام کلی ژایروسکوپ نوری تشدیدی

در ژیروسکوپ از لیزر به عنوان منبع نوری استفاده می شود. بلوک C۱ پرتو لیزر را به دو پرتو کاملا یکسان تقسیم می کند. بلوکهای PM۱ و PM۲ مدولاتورهای فاز می باشند. C۲ و C۳ تزویجگر بوده و پرتو ورودی را به تزویجگر C۴ و پرتو بازگشتی را به آشکارسازهای نوری هدایت می کنند. بلوک C۴ تزویجگر موجبر مستقیم و حلقوی است. بلوکهای PD۱ و PD۲ آشکارساز نوری می باشند. بلوکهای LIA۱ و LIA۲ تقویت کننده های قفل شونده[۱] می باشند. نهایتا LFB بلوک فیدبک لیزر است.

[۱] Lock-in Amplifier

۳- اثر ساگناک[۲]

فرکانس تشدید در حالتی که ژیروسکوپ در حالت سکون قرار دارد برابر $\nu_{q,0}$ می باشد:

$$\nu_{q,0} = \frac{qC}{Pn_{eff}} \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) q یک عدد صحیح (مرتبه‌ی تشدید) و p محیط تشدیدگر می‌باشد.

$$\nu_q^{CW} = \frac{q(C - R\Omega)}{Pn_{eff}} \qquad (۲)$$

$$\nu_q^{CCW} = \frac{q(C + R\Omega)}{Pn_{eff}} \qquad (۳)$$

با توجه به روابط (۲) و (۳) اختلاف فرکانس ناشی از اختلاف طول مسیر برای دو مد تشدید برابر است با[۳]:

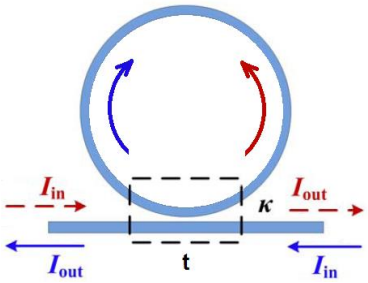
$$\Delta\nu = \nu_q^{CCW} - \nu_q^{CCW} = \frac{2R\nu_{q,0}}{C}\Omega \qquad (۴)$$

در رابطه (۴) R شعاع، P محیط تشدیدگر، Ω سرعت زاویه ای و C سرعت نور می باشد. با فرض اینکه در حالت سکون فرکانس لیزر با فرکانس تشدید یکسان است، رابطه (۴) را به صورت زیر می توان بازنویسی نمود:

$$\Delta f = \frac{2Rf_{Laser}}{C}\Omega = \frac{2R}{\lambda}\Omega = \frac{4A}{\lambda L}\Omega \qquad (۵)$$

λ طول موج، A مساحت، L طول یا همان محیط تشدیدگر می باشد.

۴- پاسخ فرکانسی تشدیدگر حلقوی:



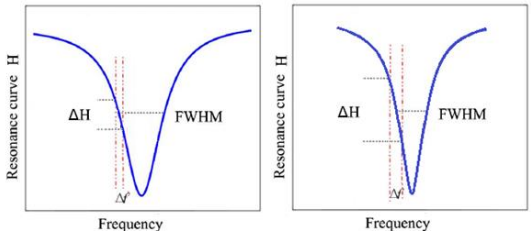
شکل ۲ ساختار تشدیدگر حلقوی

در شکل ۲ ساختار تشدیدگر حلقوی ترسیم شده است[۴]. یکی از پارامترهای مهم تشدیدگر حلقوی،FWHM[۳] است. در شکل ۳ نمودار پاسخ فرکانسی دو تشدیدگر حلقوی با FWHM های متفاوت ترسیم شده است.

[۲] Sagnac Effect

[۳] Full Width at Half Maximum

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]



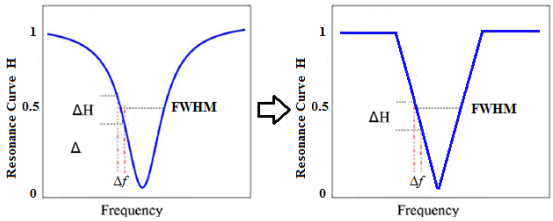
شکل۳ نمودار پاسخ فرکانسی برای دو تشدیدگر با FWHM متفاوت

همانطور در شکل ۳ مشاهده می شود، با کاهش FWHM شیب نمودار تندتر شده و درنتیجه تغییرات خروجی تشدیدگر (ΔH)، با توجه به تغییرات مشخص فرکانس تشدید (Δf)، افزایش می یابد که در نهایت این امر موجب افزایش حساسیت حسگر می شود.

در زیر رابطه مربوط به FWHM آورده شده است[۵]:

$$FWHM = \frac{K^2\lambda^2}{\pi n_{eff} L} = \frac{K^2\lambda^2}{2\pi^2 n_{eff} R} \qquad (۶)$$

برای اینکه بتوان تاثیر FWHM را بر تغییرات خروجی بررسی نمود از تقریب خطی سازی برای پاسخ فرکانسی تشدیدگر استفاده می نماییم.



شکل۴ تقریب خطی سازی برای پاسخ فرکانسی تشدیدگر حلقوی

باتوجه به تقریب فوق شیب منحنی ها برابر است با:

$$m = \pm\frac{\frac{1}{2}}{\frac{FWHM}{2}} = \pm\frac{1}{FWHM} \qquad (۷)$$

بنابراین تغییرات خروجی بر اثر تغییرات فرکانس از رابطه (۹) محاسبه می شود[۶]:

$$\Delta H \cong m \times \Delta f \qquad (۸)$$

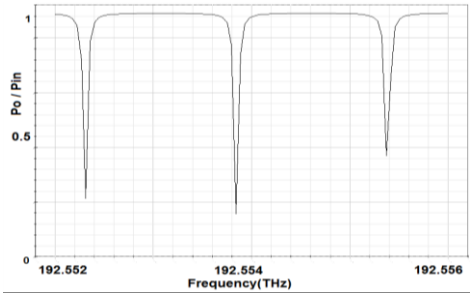
$$\Delta H \cong \frac{2R}{\lambda \times FWHM}\Omega = \pm\frac{2\pi^2 n_{eff} R^2}{K^2\lambda^3}\Omega \qquad (۹)$$

۵- تحلیل پارامترها و نتایج شبیه سازی:

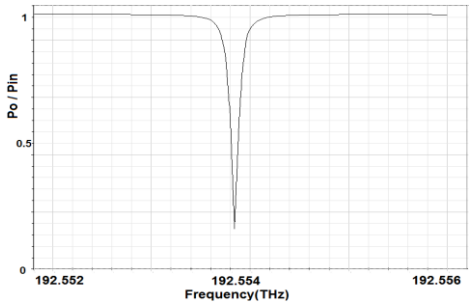
در این بخش با استفاده از رابطه (۹) به تحلیل تاثیر پارامترهای تشدیدگر بر حساسیت حسگر پرداخته و برای تایید از نتایج شبیه سازی انجام شده استفاده می شود.

۵-۱- شعاع تشدیدگر:

طبق رابطه (۹) با افزایش شعاع، میزان حساسیت خروجی حسگر افزایش می یابد. نتایج شبیه سازی نیز مبین این موضوع است که با افزایش شعاع FWHM کاهش و در نتیجه حساسیت افزایش می یابد. واضح است در هنگام افزایش حساسیت حسگر با استفاده از این پارامتر ، باید محدودیت ابعاد حسگر مد نظر قرار گیرد.



شکل۵ پاسخ فرکانسی تشدیدگر با شعاع ۳cm– ضریب تزویج ۰,۰۵db– تلفات ۰,۰۵db/cm



شکل۶ پاسخ فرکانسی تشدیدگر با شعاع ۱,۵cm– ضریب تزویج ۰,۰۵db– تلفات ۰,۰۵db/cm

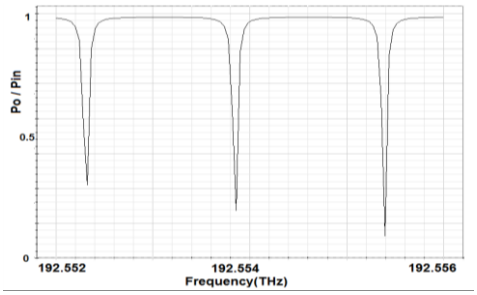
۵-۲- ضریب شکست موثر:

با توجه به رابطه (۹) افزایش ضریب شکست موثر منجر به افزایش حساسیت حسگر می شود. ولی باید توجه داشت تغییر ضریب شکست موثر با تغییر ماده بستری که تشدیدگر بر روی آن ساخته می شود، امکانپذیر است و انتخاب هر مقدار دلخواه برای آن با توجه به شرایط ساخت و هزینه نهایی حسگر امکانپذیر نیست.

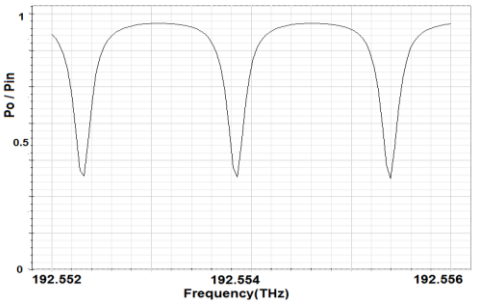
۵-۳- ضریب تزویج:

کاهش ضریب تزویج منجر به افزایش حساسیت حسگر می شود. در صورتیکه ضریب تزویج از مقدار مشخصی کمتر شود به خاطر وجود تلفات، کلیه پرتو تزویج شده تلف می شود و تشدید صورت نمی گیرد. بنابراین اگر بتوان تلفات موجبر را کاهش داد، کاهش ضریب تزویج گزینه مناسبی برای بهبود حساسیت حسگر می باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]



شکل۷ پاسخ فرکانسی تشدیدگر با شعاع ۳cm– ضریب تزویج ۰,۰۵db– تلفات ۰,۰۰۵db/cm



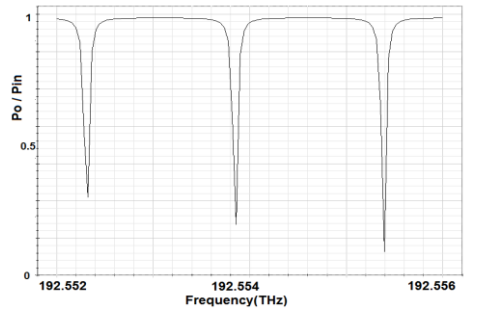
شکل۸ پاسخ فرکانسی تشدیدگر با شعاع ۳cm– ضریب تزویج ۰,۵db– تلفات ۰,۰۰۵db/cm

۵-۴- طول موج:

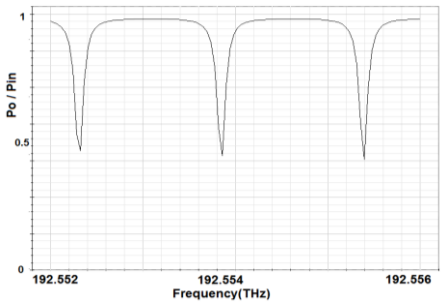
با توجه به رابطه (۹)، کاهش طول موج باعث افزایش حساسیت حسگر می شود. ولی باید توجه داشت این پارامتر نیز با محدودیتهای زیادی از قبیل تغییر ضرایب شکست و تلفات ماده بستر و تغییر ضرایب تزویج بر اثر تغییر طول موج لیزر مواجه است. بنابراین نمی توان به راحتی از آن برای افزایش حساسیت حسگر استفاده نمود.

۵-۵- تلفات موجبرها:

تلفات موجبرها علاوه بر ایجاد محدودیت برای کاهش ضریب تزویج، باعث افزایش FWHM شده و درنتیجه حساسیت را به دو روش کاهش می دهد. تصاویر ۹ و ۱۰ نشان می دهند که با افزایش تلفات، FWHM افزایش می یابد. بنابراین کاهش این پارامتر تاثیر زیادی را بر افزایش حساسیت حسگر خواهد داشت.



شکل۹ پاسخ فرکانسی تشدیدگر با شعاع ۳cm– ضریب تزویج ۰,۰۵db– تلفات ۰,۰۰۵db/cm



شکل ۱۰ پاسخ فرکانسی تشدیدگر با شعاع ۳cm– ضریب تزویج ۰,۰۵db– تلفات ۰,۱db/cm

۶- نتیجه‌گیری

دراین مقاله ابتدا بلوک دیاگرام ژیروسکوپ نوری تشدیدی مجتمع مورد بررسی، ترسیم شد. سپس رابطه تغییر فرکانس تشدید با سرعت زاویه ای محاسبه و پس از آن از تقریب خطی سازی برای کمک به تحلیل پاسخ فرکانسی تشدیدگر استفاده شد. نهایتا پارامترهای تشدیدگر با توجه به رابطه استخراج شده و نتایج شبیه سازی بررسی و امکان افزایش حساسیت با استفاده از هر یک از پارامترها مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد کاهش تلفات ، کاهش ضریب تزویج و افزایش شعاع تشدیدگر پارامترهایی هستند که ساده تر از سایر پارامترها قابل تغییر می باشند و می توانند حساسیت حسگر را افزایش دهند.

۷- مراجع

[۱] Xu-lin Zhang., Hui-Iian Ma., Zhong-he Jin., Chun Ding., *Open-loop operation experiments in a resonator fiber-optic gyro using the phase modulation spectroscopy technique*, APPLIED OPTICS ۲۰۰٦ Vol. ٤٥, No. ۳۱

[۲] Tong Zhang., et al. *Integrated optical gyroscope using active Long-range surface plasmon-polaritonwaveguide resonator*, SCIENCE REPORT ۲۰۱٤ ٤ : ۳۸۵۵

[۳] M.Narmenise., C.Ciminelli., F.Dell'Olio., V.M.N.Passaro., *Advances in Gyroscope Technologies*, Berlin Springer ۲۰۱۰. ISBN ۹۷۸-۳-٦٤۲-۱۵٤۹۳-۵

[۴] Kunbo Wang., Lishuang Feng., Junjie Wang., and Ming Lei.,*Alternative method for design and optimization of the ring resonator used in micro-optic gyro*, APPLIED OPTICS ۲۰۱۳ Vol.۵۲,No.۷

[۵] D.G.Rabus., *Integrated Ring Resonators*, illus Springer ۲۰۰۷, XV, ۲۵۶ p. ۲۴۳ illus. ISBN ۹۷۸-۳-۵۴۰-۶۸۷۸۸-۷.

[۶] S.Ezekiel., J.A.Cole., J.Harrison., G. Sanders., *Passive Cavity Optical Rotation Sensor*, SPIE ۱۹۷۸ Vol. ۱۵۷

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]