

تأثیر دما بر روی فیلترنوری کوک پذیر مبتنی بر قطبش نور و دوشکستی فیبر در یک تشدیدگر حلقوی نور

سعیده قاسم زاده^۱ و فرامرز اسمعیلی سراجی^۲

^۱گروه فیزیک و فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، ماهان، کرمان

^۲گروه مخابرات نوری، مرکز تحقیقات مخابرات ایران (پژوهشگاه)، تهران

چکیده—در این مقاله با استفاده از یک تشدیدگر حلقوی نوری، قطبش نور و دوشکستی فیبر نوری یک فیلتر نوری با پهنای باند باریک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است. از آنجا که افزایش دما، موجب تغییرات در ضریب شکست و طول فیبر نوری می‌شود، تأثیر تغییرات دما بر روی خروجی این فیلتر نوری مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نتایج شبیه سازی مشاهده می‌شود که با افزایش دما، طول موج تشدید فیلتر نوری به سمت طول موج‌های بالاتر جابه‌جا می‌شود و علاوه بر آن شدت خروجی نیز تغییر می‌یابد. نشان داده شده که به ازای هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد تغییر در دمای فیلتر، طول موج تشدید فیلتر در حدود ۰/۱ میکرومتر افزایش می‌یابد.

کلید واژه — اثرات ترمو-اپتیکی، تشدیدگر حلقوی نوری، کوک پذیری.

کد - PACS 060.0060

Temperature Effect on Optical Filter Based on Fiber-Optic Resonator Using Polarization and Birefringence Effects in the Resonator Loop

Saeede Gasemzade¹, Faramarz. E Seraji²

¹Department of Physics and Photonic Graduated University of Advanced Technology Mahan, Kerman

²Optical Communication Group Iran Telecom Research Center

Abstract - This paper presents an analysis of optical filter based on fiber-optic ring resonator using polarization and birefringence effects in the resonator loop. The temperature variations, which affect the refractive index and radius of the ring, would cause a change in the filter response. The simulation results show that the resonant wavelengths would shift toward longer wavelengths and output intensity changes with increasing temperature. It is shown that for every 10 deg C change in temperature, would cause the resonance wavelength to increase by 0.1 μm .

Keywords: fiber-optic resonator, optical filter, Thermo-optic tuning, Tunability.

PACS No.: 060.0060

۱- مقدمه

موجبر حامل موجی با بسامد ω تحت تأثیر یک عامل بیرونی مانند q مثل تغییرات دمای محیط قرار بگیرد. وقتی خروجی فیلتر را مورد بررسی قرار می‌دهیم، دو درجه آزادی (q, ω) باید در نظر گرفته شود. اول q را یک تغییر جزئی می‌دهیم، در نتیجه ثابت انتشار β به اندازه $\delta\beta_q$ تغییر می‌کند و بسامد تشدید دیگر ω_0 نیست. برای برگرداندن مقدار β به حالت اولیه، بسامد را تغییر می‌دهیم تا به شرایط تشدید دست بیابیم که به دنبال آن تغییر در β به مقدار $\delta\beta_\omega$ است. بسامد به دست آمده جدید، بسامد کوک شده تلقی می‌شود. بنابراین به-طور کلی داریم:

$$\beta \rightarrow \beta + \delta\beta_q \rightarrow \beta + \delta\beta_q + \delta\beta_\omega = \beta$$

در نتیجه داریم: $\delta\beta_q + \delta\beta_\omega = 0$. بنابراین با جایگذاری پارامترها داریم:

$$\frac{\omega}{c} \frac{\partial n_{eff}}{\partial q} \Delta q + \frac{n_g}{c} \Delta \omega = 0 \quad (2)$$

اگر این عامل بیرونی q در اثر تغییرات دما باشد، خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{1}{n_g} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \Delta T \quad (3)$$

چون ضریب شکست مغزی و غلاف فیبر با هم فرق می‌کند، رابطه (۳) به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\Delta \lambda}{\Delta T} = \left| \frac{\lambda}{n_g} \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{co}} \frac{\partial n_{co}}{\partial T} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{cl}} \frac{\partial n_{cl}}{\partial T} \right) \right| \quad (4)$$

که در آن $(\lambda/n_g)(\partial n_{eff}/\partial n_{co})$ و $(\lambda/n_g)(\partial n_{eff}/\partial n_{cl})$ ضریب‌های وزنی هستند که مقدار توان در ناحیه‌های مربوطه را تعیین می‌کنند. این ضریب‌ها برای هر یک از ناحیه‌های مورد نظر به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\Gamma = \frac{n_g \iint_A \varepsilon |E|^2 dx dy}{n_A \iint \varepsilon |E|^2 dx dy} \quad (5)$$

که در آن ε ضریب دی‌الکتریک محیط و n_g ضریب شکست گروه و n_A ناحیه‌ای از ضریب شکست است که نور در آن نفوذ کرده است. در نتیجه تغییرات ضریب شکست مغزی و غلاف نسبت به تغییرات دما به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\Delta n_{co} = \Gamma_{co} \left(n_{co} + \frac{dn_{co}}{dT} (T - T_0) \right) \quad (6)$$

$$\Delta n_{cl} = \Gamma_{cl} \left(n_{cl} + \frac{dn_{cl}}{dT} (T - T_0) \right)$$

فیلترهای نوری که امروزه در سیستم‌های فیبرنوری مورد استفاده قرار می‌گیرند، بر اساس روش‌های مختلفی مثل حلقه تشدیدگر نوری و حلقه ساگناک، فیبر پراشنده نوری، استفاده از آرایه موجبر پراشنده و یا استفاده از فیبر تداخلی لایه نازک و غیره طراحی می‌شوند. کوک کردن این فیلترهای نوری نیز از عنصرهای مهمی که مخصوصاً در سیستم‌های مخابرات نوری WDM که فاصله بین کانال‌ها کم‌تر از ۵۰ گیگاهرتز است، باید مورد توجه قرار بگیرند.

در این مقاله فیلترنوری که مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است، از یک تشدیدگر حلقوی نوری ساخته شده که در فیبرنوری آن دوشکستی [۱] ایجاد شده است. امروزه از تشدیدگرهای حلقوی نوری برای کاربردهای مختلفی مثل طراحی حسگرهای قطبش‌پذیر، بیوسنسورها، ادوات جبران‌ساز پاشش نوری، سوئیچ‌های نوری و دیگر کاربردها استفاده می‌شوند. روشی که قبلاً برای کوک کردن این فیلتر به کار برده شده، با استفاده از تغییر ضریب جفت شدگی نور، استفاده از حلقه ساگناک برای ایجاد جابه جایی فاز، کوک شدگی با استفاده از دوشکستی فیبر و قطبش نور بوده است. حال می‌خواهیم تأثیر گرما را بر روی این فیلترنوری [۱] بررسی کرده و کوک‌پذیری آن را با استفاده از گرما مورد تجزیه و تحلیل قرار بدهیم.

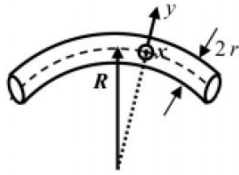
۲- مبانی نظری

در یک تشدیدگر حلقوی نوری، هرگونه تغییری که بر روی ساختار و پارامتر حلقه ایجاد شود، مثل تغییر در شعاع حلقه و ضریب شکست مؤثر، باعث می‌شود که طول موج تشدید تغییر بکند. یکی از مهم‌ترین علت‌هایی که باعث تغییر در شعاع حلقه و ضریب شکست مؤثر فیبر می‌شود، تغییرات دمای محیط است. البته پارامتری که بیش‌تر تحت تأثیر دما تغییر پیدا می‌کند، ضریب شکست مؤثر فیبر است. تغییر در طول موج تشدیدگر حلقوی فیبرنوری در اثر تغییرات ضریب شکست مؤثر، به وسیله رابطه زیر بیان می‌شود [۲]:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \left| \frac{\Delta n_{eff}}{n_{group}} \right| \quad (1)$$

برای توجیه رابطه بالا، یک موجبر با سطح مقطع معین و با ثابت انتشار β در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم این

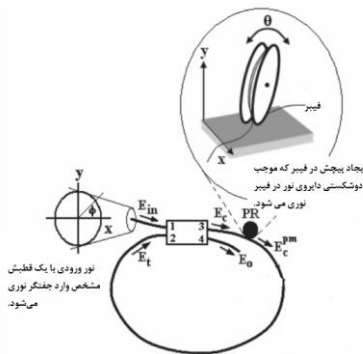
φ_1 اختلاف فازی بود که به دلیل خمش در فیبر نوری مطابق با شکل (۲) بوجود می‌آید، به صورت رابطه (۹) محاسبه می‌شود:



شکل ۲: خمش در فیبر نوری که منجر به دوشکستی خطی می‌شود.

$$\varphi_1 = \frac{\pi n^3}{2\lambda} (1 + \nu) (p_{11} - p_{12}) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (9)$$

در رابطه بالا n ضریب شکست مغزی فیبر، p_{11}, p_{12} مؤلفه‌های تانسوری تنش که به ترتیب برابر 0.27 و 0.164 و ν ثابت پواسون برابر 0.164 می‌باشند. R, r به ترتیب شعاع فیبر و شعاع خمش است.



شکل ۳: تشدیدگر حلقوی فیبرنوری مورد مطالعه [۱].

مؤلفه‌های x و y میدان‌های الکتریکی بهنجار بعد از PR به ترتیب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\frac{E_{tx}}{E_{in}} = \frac{N_x}{D_x} \quad (9)$$

$$\frac{E_{ty}}{E_{in}} = \frac{N_y}{D_y}$$

که در آن به ترتیب برای پارامترهای N_x, D_x, N_y و D_y داریم:

$$N_x = - \left[1 + i\sqrt{\alpha k} e^{-i\omega\tau} \left(\cos \Delta\varphi - i \frac{\varphi_1}{2} \frac{\sin \Delta\varphi}{\Delta\varphi} \right) \right]$$

$$\left(\frac{E_{ty}}{E_{in}} \right) + i\alpha\sqrt{k(1-k)} e^{-2i\omega\tau} \left(\varphi_c \frac{\sin \Delta\varphi}{\Delta\varphi} \right)^2$$

$$D_x = i\sqrt{\alpha k} e^{-i\omega\tau} \varphi_c \frac{\sin \Delta\varphi}{\Delta\varphi}$$

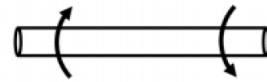
که $\Gamma_{cl}, \Gamma_{co}, n_{cl}, n_{co}$ به ترتیب ضریب‌های وزنی و ضریب شکست‌های غلاف و مغزی، dn_{cl}/dT و dn_{co}/dT ضریب ترمو-اپتیکی مربوطه هستند. T_0 دمای مرجع می‌باشد که در محاسبات ما برابر 20 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه ضریب ترمو-اپتیکی فیبر از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که از این میان تداخل‌سنجی یکی از این روش‌هاست [۳]. اگر فرض کنیم غلاف فیبر فقط از سیلیکای خالص و مغزی فیبر [۳] با 15 مول GeO_2 و SiO_2 ترکیب شده باشد، مقدار ضریب‌های ترمو-اپتیکی مغزی و غلاف فیبر به ترتیب $1/24$ و $1/06$ خواهد شد.

نمودار تشدیدگر حلقوی فیبرنوری در شکل (۳) نشان داده شده که در آن نور ورودی با یک قطبش مشخص وارد جفتگر نوری می‌شود. با پیچاندن فیبر در صفحه XY توسط چرخاننده قطبش^۱ PR موجود در حلقه تشدیدگر، یک دوشکستی دایروی در فیبر ایجاد می‌شود. بنابراین، در حلقه تشدیدگر دو نوع دوشکستی ایجاد می‌شود: یکی دوشکستی خطی ناشی از خمش و دیگری دوشکستی دایروی ناشی از پیچش است. این دوشکستی به ترتیب اختلاف فاز φ_1 و φ_c را در نور ورودی به حلقه تشدیدگر به وجود می‌آورند که اختلاف فاز کل به صورت زیر بیان می‌شود [۴]:

$$\Delta\varphi = \sqrt{\varphi_c^2 + \left(\frac{\varphi_1}{2} \right)^2} \quad (7)$$

φ_c که در اثر پیچش مطابق شکل (۱) در فیبر، موجب دوشکستی دایروی می‌شود، به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود:

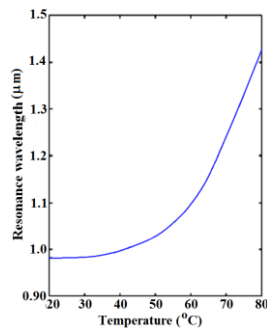


شکل ۱: پیچش در فیبر که موجب دوشکستی دایروی در فیبر می‌شود.

$$\varphi_c = \frac{n^2}{2(p_{11} - p_{12})} \delta \quad (8)$$

که در رابطه بالا n ضریب شکست مغزی فیبر، p_{11}, p_{12} مؤلفه‌های تانسوری تنش و δ نرخ پیچش می‌باشد.

¹ Polarisation rotator (PR)



شکل (۵): اثر دما بر طول موج تشدید.

۳- نتیجه گیری

در این مقاله رفتار فیلتر نوری با تأثیر پذیری تغییرات دما با استفاده از نرم افزار MATLAB مورد تحلیل قرار گرفته است. در مخابرات نوری افزایش دما از دو جهت مورد توجه قرار گرفته است. مورد اول این است که از این گزینه می-توان برای کوک کردن فیلتر نوری مورد استفاده قرار داد. از سوی دیگر وقتی هدف کوک کردن نباشد، مشاهده می-شود که خروجی فیلتر با دمای محیط تغییر پیدا می-کند که در عمل این امر مطلوب نیست. در تحلیل نشان داده شده که به ازای هر ۱۰ درجه سانتی-گراد تغییر دمای فیلتر، در حدود ۰/۱ میکرومتر طول موج تشدید افزایش می-یابد.

مراجع

- [1] F. E. Seraji, F. Asghari and A. Yekranghi Sendi, "Tunability of optical filter based on fiber-optic ring resonator using polarization and birefringence effect in the resonator loop", Ukr. J. Phys. Opt., Vol. 11, pp. 185-192, 2010.
- [2] M. Popovic, "Theory and Design of High-Index-Contrast Microphotonic Circuit, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technol., Cambridge, 2008.
- [3] Y. J. Kim, U. C. Paek, B. H. Lee, "Measurement of refractive-index variation with temperature by use of long-period fiber grating". Opt. Lett., Vol. 27, pp. 1297-1299, 2002.
- [4] Alan Roger, *Polarisation in optical fiber*, Artech House, 2008.
- [5] Y. Okada and Y. Tokumaru, "Precise determination of lattice parameter and thermal expansion coefficient of silicon between 300 and 1500 K", J. Appl. Phys., Vol. 56, pp. 314-320, 1984.

$$N_y = \left[\frac{\phi_1 \phi_c}{2} \left(\frac{\sin \Delta \phi}{\Delta \phi} \right)^2 \right] \times$$

$$\left[e^{-i\omega\tau} \sqrt{\alpha} \left(\sqrt{k} + \sqrt{1-k} \left(\frac{\phi_c \sin \Delta \phi}{\Delta \phi} \right) \right) - \alpha \sqrt{k(1-k)} e^{-2i\omega\tau} \right]$$

$$D_y = 1 + 2i\sqrt{\alpha k} e^{-i\omega\tau} \cos \Delta \phi$$

$$- \alpha k e^{-2i\omega\tau} \left[\cos^2 \Delta \phi + \frac{\phi_1^2}{4} \frac{\sin^2 \Delta \phi}{\Delta \phi^2} \right]$$

در رابطه‌های بالا k و α به ترتیب ضریب جفت شدگی جفتگر نوری و ضریب انتقال فیبرنوری در حلقه هستند. این دو میدان الکتریکی پس از عبور از حلقه در خروجی بهنجار فیلتر به صورت زیر دریافت می‌شوند:

$$\frac{E_{ox}}{E_{in}} = -i\sqrt{k} + \sqrt{1-k} \frac{E_{tx}}{E_{in}} \quad (10)$$

$$\frac{E_{oy}}{E_{in}} = \sqrt{1-k} \frac{E_{ty}}{E_{in}} \quad (11)$$

که در آن $\tau = (\Delta n_{eff} / c)L$ زمان تأخیر حلقه تشدیدگر با طول L و Δn_{eff} اختلاف بین ضریب شکست مؤثر مغزی و غلاف است. طول فیبر نیز در اثر گرما افزایش می‌یابد.

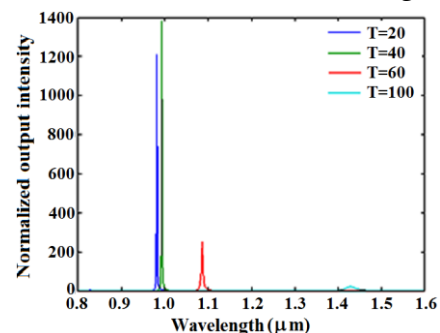
$$\frac{1}{L} \frac{dL}{dT} = 2 \times 10^{-6} / ^\circ C$$

است که به صورت تجربی اندازه‌گیری شده است [۵].

حال تأثیر گرما را با توجه به رابطه‌های (۴)، (۵) و (۶) در خروجی فیلتر مطابق با رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) وارد می-کنیم.

در محاسبات شعاع حلقه تشدیدگر را ۱۵ میکرومتر انتخاب می‌کنیم و فرض می‌کنیم که فیبر به اندازه ۴۵ درجه پیچانده شده باشد.

همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، با افزایش دما طول موج تشدید فیلتر به سمت طول موج‌های بلندتر جابه‌جا می‌شود. در شکل (۵) جابه‌جایی طول موج تشدید در دماهای مختلف ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتی-گراد با گام ۱۰ درجه نشان داده شده است.



شکل ۴: نمودار بهنجار خروجی فیلتر برای دماهای مختلف از ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی-گراد.