بررسی اثر پوشش دهی چندلایه آینه ژیروسکوپ لیزری حلقوی بر افزایش حساسیت دستگاه

مریم سلطانی، علیرضا کشاورز، غلامرضا هنرآسا

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده – در این مقاله ضمن معرفی ژیروسکوپ لیزری حلقوی و نحوه عملکرد آن، تاثیر پوشش دهی یکی از آینه های دستگاه بر روی طرح تداخلی و حساسیت دستگاه با استفاده از روش ماتریس انتشار بررسی و شبیه سازی شده است. در این دستگاه افزایش اختلاف فاز بین دو پرتو مختلف جهت باعث افزایش حساسیت دستگاه می شود. نتایج نشان می دهد که با استفاده از پوشش چندلایه با توان بازتاب بالا بر روی یکی از آینه های دستگاه می توان علاوه بر افزایش دقت دستگاه، اختلاف فاز بین دو پرتو منتشر شده و در نتیجه حساسیت دستگاه را افزایش داد.

کلید واژه- پوشش دهی آینه، حساسیت افزایش یافته، روش ماتریس انتشار، ژیروسکوپ لیزری حلقوی

Sensitivity enhancement of ring laser gyroscope using multilayer coatings on mirror

Maryam Soltani, Alireza Keshavarz, Gholamreza Honarasa

Department Of Physics, Shiraz University Of Technology, Shiraz

Abstract- In this paper, ring laser gyroscope and its performance are introduced. Also, the effect of mirror coatings on the interference pattern and sensitivity of the device are investigated and simulated by using propagation matrix method. In this device, increasing the phase difference between two counter-propagating beams leads to sensitivity enhancement of the device. The results show that by using multilayer coatings with high reflection power on one of the mirrors, in addition to increasing the accuracy of the device, the phase difference between the two beams and thus the sensitivity of the device can be increased.

Keywords: mirror coating, sensitivity enhancement factor, propagation matrix method, ring laser gyroscope

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

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

۱- مقدمه

ژیروسکوپ لیزری حلقوی وسیله ای است که برای اندازه گیری چرخش زاویه ای وسایل نقلیه استفاده می شود و کاربرد گسترده ای در صنایعی شامل هواپیماسازی، موشک، فضاپیماها، خودروسازی، پزشکی و غیره دارد[۱]. در ژیروسکوپ های لیزری دو پرتو در دو جهت مخالف در درون یک مسیر بسته دایروی حرکت می کنند. با اعمال چرخش به سیستم و اثر ساینا‌ک[۱] اختلاف فازی بین دو پرتو منتشر شده ایجاد می شود. به علت اثر قفل شدگی مد که پدیده ای اساسی در محدود کردن حساسیت دستگاه است هر چه اختلاف فاز بین دو پرتو بیشتر باشد دستگاه از محدوده قفل شدگی خارج می شود و در نتیجه حساسیت دستگاه افزایش می یابد[۲]. در این مقاله به بررسی و شبیه سازی تاثیر پوشش دهی چندلایه یکی از آینه های ژیروسکوپ لیزری بر روی اختلاف فاز بین دو پرتو منتشر شده و حساسیت دستگاه با استفاده از روش ماتریس انتشار پرداخته شده است.

۲- مبانی نظری

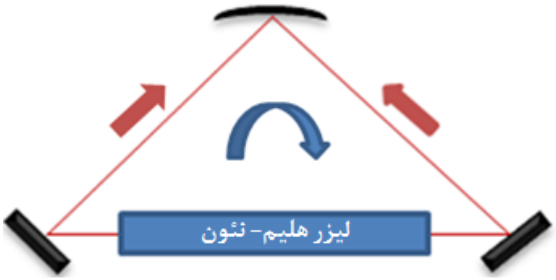
۲-۱- ژیروسکوپ لیزری حلقوی

ژیروسکوپ لیزری حلقوی شامل یک مشدد حلقوی است که در اثر چرخش صفحه شامل این دستگاه حول محور عمود بر دستگاه دوران می یابد. در این مقاله آرایش مثلثی، مطابق شکل ۱، مد نظر قرار گرفته شده است. اساس کار ژیروسکوپ بر پایه اثر ساینا‌ک است. به طور خلاصه اگر دو پرتو در دو جهت مخالف در مشدد حلقوی حرکت کنند و یک دوران به این مشدد اعمال شود، مشاهده می شود که پرتویی که در جهت چرخش حرکت می کند نسبت به پرتوی دیگر، مسیر را در زمان بیشتری طی می کند و باعث ایجاد یک اختلاف فرکانس و درنتیجه جابه جایی فاز بین دو پرتو می شود [۳]. اگر A مساحت محصور شده توسط مشدد، L راه نوری مشدد در یک دور کامل، Ω سرعت زاویه ای چرخش، λ طول موج لیزر هلیم نئون ($\lambda = 632.8$ nm) و c سرعت نور در خلا باشد اختلاف فرکانس و جابه جایی فاز ایجاد شده از روابط زیر محاسبه می شوند[۴]:

$$\Delta\vartheta = \frac{4A\Omega}{\lambda L} \qquad (۱)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta\vartheta}{c}L = \frac{8\pi A\Omega}{c\lambda} \qquad (۲)$$

یکی از عواملی که کارکرد ژیروسکوپ لیزری حلقوی را محدود می کند اثر قفل شدگی مد است که در نرخ چرخش های کوچک اتفاق می افتد و باعث از بین رفتن اختلاف فرکانس بین دو پرتو می شود. درنتیجه آشکارسازی طرح تداخلی و اندازه گیری نرخ چرخش در خروجی دستگاه امکان پذیر نخواهد بود. برای جلوگیری از ایجاد این اثر باید به دنبال راهی باشیم تا اختلاف فاز ایجاد شده بین دو پرتو بیشتر شود تا دستگاه از محدوده قفل شدگی مد خارج شود. در خروجی دستگاه، اختلاف فاز اضافه شده به سیستم از اختلاف فاز اندازه گیری شده کسر می شود و نرخ چرخش واقعی محاسبه می شود[۵ و۶].



شکل ۱: طرح نمادین یک ژیروسکوپ لیزری حلقوی

۲-۲- اثر پوشش دهی آینه های ژیروسکوپ لیزری حلقوی

در ژیروسکوپ های لیزری به منظور افزایش دقت دستگاه از آینه هایی با بیشترین بازتاب در طرفین کاواک لیزری استفاده می شود. به همین دلیل می توان از پوشش هایی بر روی این آینه ها استفاده کرد که علاوه بر افزایش توان بازتاب آینه منجر به افزایش اختلاف فاز بین دو پرتو در طول موج مورد نظر شود. اگر پوششی بر روی یکی از آینه ها قرار گیرد روابط (۱) و (۲) به صورت زیر تغییر می کنند[۷]:

$$\Delta\vartheta = \frac{4A\Omega}{\lambda L}\cdot\frac{1}{\left(1+\left(\frac{d\varphi}{d\omega}\right)\Big/\left(\frac{L}{c}\right)\right)} \qquad (۳)$$

$$\Delta\phi = \frac{8\pi A\Omega}{c\lambda}\cdot\frac{1}{\left(1+\left(\frac{d\varphi}{d\omega}\right)\Big/\left(\frac{L}{c}\right)\right)} \qquad (۴)$$

که در رابطه فوق φ جابه جایی فاز ناشی از پوشش و ω فرکانس زاویه ای است. بنابراین عامل حساسیت

[۱] Sagnac effect

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

افزایش یافته به صورت زیر می باشد:

$$S_{enh}=\frac{1}{(1+(\frac{d\varphi}{d\omega})\Big/(\frac{L}{c}))} \quad (۵)$$

در این مقاله یک ساختار چند لایه ربع طول موجی به صورت زیر به منظور پوشش دهی بر روی یکی از آینه ها درنظر گرفته شده است[۷]:

$$\text{هوا} / (HL)^{25} H 2L (HL)^{14} / \text{زیرلایه} \quad (۶)$$

که H و L به ترتیب لایه های ربع طول موجی با ضریب شکست زیاد و کم هستند. در اینجا لایه با ضریب شکست زیاد را Ta_2O_5 (n=۲,۱۲۵) و لایه با ضریب شکست کم را SiO_2 (n=۱,۴۶) درنظر گرفته شده است[۷] و با استفاده از روش ماتریس انتشار جابه جایی فاز ناشی از این ساختار محاسبه شده است.

۳-۲- روش ماتریس انتشار

در یک محیط متناوب، لایه ای با ضریب شکست n_l و ارتفاع h_l از طریق رابطه زیر به لایه دیگر با ضریب شکست n_{l+1} و ارتفاع h_{l+1} مربوط می شود[۸]:

$$\begin{bmatrix} A_l \\ B_l \end{bmatrix} = B_{l(l+1)} \begin{bmatrix} A_{l+1} \\ B_{l+1} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که $B_{l(l+1)}$ حاصلضرب ماتریس عبور از فصل مشترک $T_{l(l+1)}$ و ماتریس انتشار $P_{l(l+1)}$ است که به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$T_{l(l+1)} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} (1+m_{l(l+1)}) & (1-m_{l(l+1)}) \\ (1-m_{l(l+1)}) & (1+m_{l(l+1)}) \end{bmatrix} \quad (۸)$$

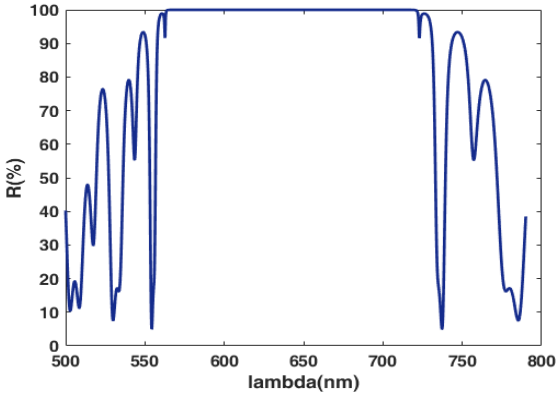
$$P_{l(l+1)} = \begin{bmatrix} \exp(-ik_{l+1}h_{l+1}) & 0 \\ 0 & \exp(ik_{l+1}h_{l+1}) \end{bmatrix} \quad (۹)$$

که $m_{l(l+1)} = \frac{n_{l+1}}{n_l}$ است. با محاسبه ماتریس انتشار کل برای ساختار رابطه (۶) و روابط مربوط به میدان باریکه گاوسی[۹] می توان تاثیر این پوشش دهی را بر روی طرح تداخلی و حساسیت دستگاه بررسی کرد.

۳- شبیه سازی

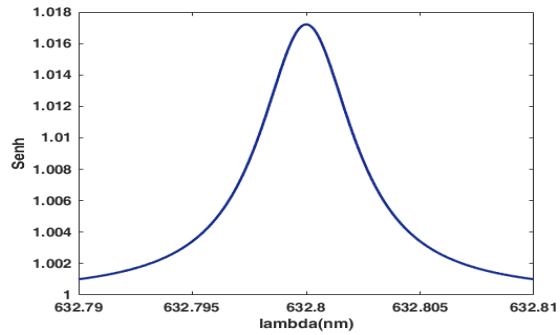
در این قسمت ابتدا مناسب بودن ساختار ارائه شده بررسی و در ادامه به شبیه سازی و بررسی اثر این پوشش دهی چندلایه بر روی طرح تداخلی و حساسیت ژیروسکوپ لیزری حلقوی پرداخته شده است.

شکل ۲ توان بازتاب ساختار ارائه شده را برحسب طول موج در محدود ۵۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در این ساختار در طول موج لیزر هلیم- نئون ($\lambda=۶۳۲/۸$ nm) توان بازتاب بیشینه است. بنابراین انتخاب مناسبی برای افزایش توان بازتاب آینه ژیروسکوپ لیزری حلقوی و درنتیجه افزایش دقت دستگاه می باشد. نرخ چرخش و طول بازوی دستگاه در شکل های ۳ و ۴ به ترتیب برابر ۴۵ درجه بر ثانیه و ۰/۵m درنظر گرفته شده است.



شکل ۲: توان بازتاب ساختار معرفی شده برحسب طول موج

شکل ۳ عامل حساسیت افزایش یافته S_{enh} ساختار را برحسب طول موج نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود این ساختار در طول موج $\lambda=۶۳۲/۸$nm دارای بیشترین مقدار حساسیت افزایش یافته می باشد و می تواند با افزایش اختلاف فاز بین دو پرتو منتشر شده در دو جهت مخالف، حساسیت دستگاه را افزایش دهد. مطابق رابطه ۵، S_{enh} رابطه عکس با طول بازوی دستگاه دارد و هرچه طول بازوی ژیروسکوپ کوچک تر باشد قله S_{enh} افزایش می یابد و امکان ساخت دستگاه در ابعاد کوپکتر را فراهم می کند.

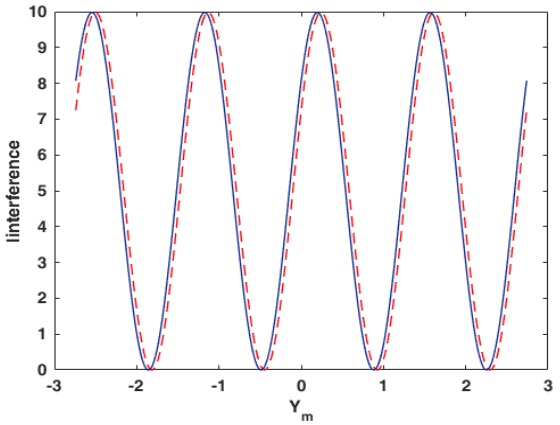


شکل ۳: فاکتور حساسیت افزایش یافته ساختار برحسب طول موج

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

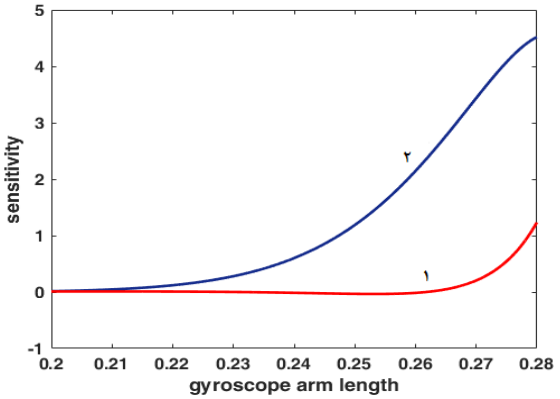
در شکل ۴ شدت تداخلی دو پرتو $(I_{\text{int erference}})$ برحسب فاصله تا فرانژ مرکزی بر روی پرده (Y_m) رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود وجود این پوشش دهی چندلایه بر روی آینه باعث افزایش اختلاف فاز بین دو پرتو و در نتیجه افزایش حساسیت دستگاه می شود.



شکل ۴: شدت تداخلی دو پرتو برحسب فاصله تا فرانژ مرکزی. نمودار خط چین مربوط به حالت بدون پوشش دهی و نمودار بعدی مربوط به حالتی است که پوشش دهی چندلایه بر روی آینه انجام شده است (واحد اختیاری).

با کسر اختلاف فاز ناشی از این پوشش دهی از اختلاف فاز اندازه گیری شده در خروجی دستگاه، نرخ چرخش واقعی محاسبه می شود.

در شکل ۵ حساسیت دستگاه برحسب طول بازوهای ژیروسکوپ لیزری حلقوی برای دو حالت با پوشش دهی و بدون پوشش دهی آینه رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود زمانی که پوشش چندلایه بر روی آینه قرار گیرد حساسیت دستگاه بالا می رود و می توان ژیروسکوپی با ابعاد کوچکتر ساخت.



شکل ۵: حساسیت دستگاه برحسب طول بازوی ژیروسکوپ. نمودار ۱ مربوط به حالتی است که پوشش دهی بر روی آینه انجام نشده است و نمودار ۲ مربوط به حالتی است که پوشش دهی چندلایه انجام شده است.

۴- نتیجه‌گیری

امروزه با گسترش روزافزون علم و فناوری در زمینه ساخت وسایل نقلیه و نقش ژیروسکوپ در برقراری تعادل این وسایل، به خصوص در کاربردهای نظامی، بهبود عملکرد این دستگاه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله ابتدا به توصیف نحوه عملکرد ژیروسکوپ لیزری حلقوی پرداخته شده است و در ادامه با معرفی یک ساختار چندلایه به بررسی و شبیه سازی تاثیر پوشش دهی این ساختار بر روی یکی از آینه های ژیروسکوپ لیزری حلقوی پرداخته شده است. نتایج نشان می دهد که ساختار معرفی شده دارای توان صد درصد در طول موج لیزر هلیم نئون است و می تواند با افزایش اختلاف فاز بین دو پرتو منتشر شده در درون ژیروسکوپ لیزری حلقوی حساسیت دستگاه را افزایش دهد. علاوه براین این ساختار امکان ساخت دستگاه در ابعاد کوچکتر را فراهم می کند که به نوبه خود می تواند در کاربردهایی که ابعاد دستگاه از اهمیت بالایی برخوردار است مفید باشد.

مراجع

[1] M. N. Armenise, C. Ciminelli, F. Dell'Olio, V. M. N. Passaro, *Advances in Gyroscope Technologies*, *Springer*, 2010.

[2] A. Tartaglia, M.L. Ruggiero, "Sagnac effect and pure geometry", American Journal of Physics.,Vol. 83, No. 5, pp. 427-432, 2015.

[3] P. R. Ayswarya, S. S. Pournami, and R. Nambiar, "A survey on ring laser gyroscope technology", Int. J. Comput. Appl., vol. 116, No. 2, pp. 25-27, 2015.

[4] M. Pizzocaro, "Development of a ring laser gyro: active stabilization and sensitivity analysis", tesis, 92p, 2009.

[5] K. Wang and Q. Gu, "Key problems of mechanically dithered system of RLG", Tsinghua science and technology, Vol. 6, No. 4, pp. 304-309, 2001.

[6] Z. Wang, X. Long and F. Wang, "Bias characteristics of a multioscillator ring laser gyro with consideration of differential losses", Optics & Laser Technology, Vol. 48, pp. 285-293, 2013.

[7] T. Qu, K. Yang, X. Han, S. Wu, Y. Huang, and H. Luo, "Design of a superluminal ring laser gyroscope using multilayer optical coatings with huge group delay", Sci. Rep., vol. 4, pp. 7098-1-7098-5, 2014.

[8] S. L. Chuang, *Physics of photonic devices*; p. 202, John Wiley & Sons, 2012.

[9] J. T. Verdeyen, *Laser Electronics*, p.77, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1995.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]