基于相位调控的硅基微环谐振器共振线型优化 研究

李宏健,徐亚萌*,宋 岩

长春理工大学物理学院/光波导实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2025年3月26日; 录用日期: 2025年5月12日; 发布日期: 2025年5月21日

摘要

在光子集成电路中,微环谐振器微环谐振器是关键的光学器件,其共振特性对传感、滤波和开关等应用 至关重要。本文研究了基于相位调控的方法来优化硅基微环谐振器微环谐振器的共振线型,实现从洛伦 兹线型向Fano共振的可调转换。采用传输矩阵方法分析了相位单元(圆孔、椭圆孔和T形波导)对微环相 位的影响,并结合FDTD仿真计算不同结构对相位变化的调控能力。研究表明,T形波导相较于传统孔洞 结构在相位调制方面具有更优的性能。同时,对比条波导微环和亚波长光栅微环的相位调控特性,发现 亚波长光栅微环对单个相位单元的敏感性较弱,不易实现有效的相位调控。本研究为优化微环谐振器的 谐振特性提供了理论指导,并为高性能光学器件的设计提供了可行方案。

关键词

硅基微环谐振器,相位调控,Fano共振,亚波长光栅

Research on the Optimization of Resonance Line Shape of Silicon-Based Micro Ring Resonators Based on Phase Control

Hongjian Li, Yameng Xu*, Yan Song

Optical Waveguide Laboratory, School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 26th, 2025; accepted: May 12th, 2025; published: May 21st, 2025

Abstract

In photonic integrated circuits, the micro ring resonator serves as a pivotal optical component, with *通讯作者。

文章引用: 李宏健, 徐亚萌, 宋岩. 基于相位调控的硅基微环谐振器共振线型优化研究[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 406-413. DOI: 10.12677/jsta.2025.133040

its resonant characteristics being crucial for applications such as sensing, filtering, and switching. This paper delves into optimizing the resonant linewidth of silicon-based micro ring resonators through a phase-tuning approach, enabling adjustable transitions from Lorentzian linewidth to Fano resonance. We utilize the transfer matrix method to analyze the impact of phase cells (circular holes, elliptical holes, and T-shaped waveguides) on the phase of the micro ring, complemented by FDTD simulations to assess the phase modulation capabilities of various structures. Our findings reveal that T-shaped waveguides outperform traditional hole structures in terms of phase modulation. Additionally, when comparing the phase control characteristics of strip waveguide micro rings and subwavelength grating micro rings, we observe that subwavelength grating micro rings exhibit weaker sensitivity to individual phase cells, making effective phase modulation more challenging to achieve. This study provides theoretical guidance for optimizing the resonant characteristics of micro ring resonators and offers viable solutions for designing high-performance optical devices.

Keywords

Silicon-Based Micro Ring Resonator, Phase Modulation, Fano Resonance, Subwavelength Grating

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 介绍

在光子集成电路中,微环谐振器是各种光器件的核心结构[1]-[7]。微环谐振器占地面积小,其透射光 谱呈现周期性窄带洛伦兹线型特性,通过监测微环谐振器微环谐振器谐振峰的传输情况,可实现光学传 感[8]、滤波[9]及开关[10] [11]功能。

为了优化微环谐振器的谐振线型,使其从传统的洛伦兹线型转换为其他类型,研究人员进行了广泛的探索[12]-[15]。例如,在特定的耦合条件下,微环谐振器系统的透射光谱可以由对称的洛伦兹线型调整为不对称的Fano型线。微环谐振器的Fano谐振线型最近吸引了人们的极大兴趣。Fano线型与对称洛伦兹谐振线型相反,它们在谐振波长附近具有不对称和陡峭的斜率。由于Fano共振的独特干涉特性,这种线型调控能够显著提高基于微环谐振器的传感器的灵敏性能[16]-[18]。在单通型微环谐振器中引入一个圆形空气孔,可以使波导得到额外相位,从而实现Fano谐振。还有研究者采取将圆孔[19]转变为椭圆孔[20]的形式,这样在不改变整体结构的基础上,使相位得到了进一步增加。近年来人们提出了T型相位单元[21],来给微环引入额外的相位,这使得器件加工更加容易。

本文对硅基微环的相位进行了计算,并探索了不同结构微环对不同相位单元中相位随波长变化的剧 烈程度。通过分析相位偏移对共振线型的影响,揭示了如何利用相位调控实现从洛伦兹线型到 Fano 共振 的可调转换。这种基于相位调控的方法提供了一种理论可预测且高效的优化手段。能够在保持微环谐振 器结构紧凑性的同时,实现从洛伦兹曲线到 Fano 共振的可调转换,从而显著提升器件的性能。此外,研 究表明,不同结构参数的微环对相位变化的敏感性存在显著差异,这对于优化器件设计、提高谐振器的 可调性以及提升光学器件的性能具有重要意义。

2. 理论模型

基于传输矩阵方法,分析了光场在微环谐振器中的传播过程,以及相位单元的引入对器件整体透射 谱线的影响。如图1所示,单通型微环谐振器由一个环形波导与一个条波导构成。当光从输入端输入, 光沿着波导传播,当到达耦合区时,一部分光由于耦合进入微环。此时,当光的波长满足微环谐振条件 就会在环内谐振,产生较强光场,剩余的光则会从出射端输出。微环需要满足的谐振条件用方程表示为:



 $E_{\text{out}} = tE_0 + ikE_1 + \acute{a}$

Figure 1. Propagation of light in micro ring resonator structure 图 1. 光在微环谐振器结构中的传播

$$2\pi R n_{\rm eff} = m\lambda \tag{1.1}$$

公式中 *R*、*n*_{eff}、*m*和λ分别代表微环的半径、有效折射率、谐振级次和入射光的波长。 光在微环谐振器结构中的传播后,输出的电场可表示为[20]:

$$E_{\text{out}} = tE_0 + ikE_1 + ikE_2 + \cdots$$

$$= tE_0 + ik(ik)ae^{i\delta}E_0 + ik(ik)ta^2e^{i2\delta}E_0 + \cdots$$

$$= tE_0 + (ik)^2 \frac{ae^{i\delta} - t^n a^{n+1}e^{i(n+1)\delta}}{1 - tae^{i\delta}}E_0(t < 1, n \to \infty)$$

$$= \left(t - \frac{k^2 ae^{i\delta}}{1 - tae^{i\delta}}\right)E_0$$
(1.2)

在该模型中, E_0 表示入射到微环谐振器的光场, $\delta = 2\pi n L_R / \lambda$ 为光在微环谐振器内的往返延迟相位, 其中 n 是微环谐振器的有效折射率, L_R 是微环谐振器周长, λ 是工作波长。 $a = \exp(-\alpha L_R)$ 为光在微环谐振器内的往返幅度透射系数, α 是微环谐振器的线性损耗系数。另外,微环谐振器与总线波导的耦合强度由 耦合系数 k 控制,耦合系数 k 与直通系数 t 之间存在关系 $t^2 + k^2 = 1$ 。

耦合系统的最终功率传输谱由下式给出:

$$T(\lambda) = \left|\frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}\right|^2 = \left|\frac{t - ae^{\frac{i2\pi nL_R}{\lambda}}}{1 - tae^{\frac{i2\pi nL_R}{\lambda}}}\right|^2$$
(1.3)

在传统的波导微环结构中,入射光在耦合区分别进入微环和总线波导,二者具有相同的初始相位。 然而,当光场在谐振腔中形成谐振模并循环返回耦合区时,它经历了 2π 的整数倍相位延迟。因此,当离 散的谐振模重新耦合到总线波导时,它们相对于直接在总线波导中传播的连续模具有 2π 的整数倍的相位 差,因此谐振峰为洛伦兹线型。

为了将微环谐振器的洛伦兹共振线型转换为非对称的 Fano 线型,需要将离散态与连续态之间的相位 差从 2π 的整数倍调整为非整数倍。为此,添加额外相位的方式很多。以椭圆孔为例,在波导与微环的耦 合区域的总线波导中添加一个椭圆孔波导结构,长轴和短轴长分别为 h 和 l,如图 2 所示。



Figure 2. Propagation of light in a micro ring resonator structure with added phase elements 图 2. 光在添加相位单元的微环谐振器结构中传播

该椭圆孔型波导可以为总线波导中的连续传播模式引入额外的相移 Δφ,而不会改变微环谐振器本身的结构,也不会扰动微环谐振器内部的干涉条件,因此离散谐振模式不会产生额外相移。由于连续模式和离散模式之间的相位差不再是 2π 的整数倍,从而打破了原有的对称性条件,导致 Fano 共振峰产生非 对称的线型特征。由公式(1.3)可知,耦合系统的最终功率传输谱为[21]:

$$T(\lambda) = \left|\frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}\right|^2 = \left|te^{-i\Delta\phi} - \frac{k_1 k_2 a e^{\frac{i2\pi n L_R}{\lambda}}}{1 - ta e^{\frac{i2\pi n L_R}{\lambda}}}\right|$$
(1.4)

由于耦合区域中的两个波导部分不同,因此它们的耦合系数不同,分别表示为 k_1 和 k_2 。其中, k_1 是椭圆孔形波导耦合到跑道型微环谐振器的耦合系数, k_2 是跑道型微环谐振器耦合到椭圆孔形波导的耦合系数,且 $k_1k_2 = k^2 = 1 - t^2$ 。

3. 结果与讨论

如图 3 所示,通过使用 MATLAB 结合上述公式,模拟了 Fano 线型的演化过程。随着相位的逐步增加,原本对称的洛伦兹线型逐渐发生变化,演变为更为尖锐的不对称 Fano 线型。当相位达到 2π 的整数 倍时,线型又恢复至初始的洛伦兹形态。这一现象表明,额外相位在洛伦兹线型向 Fano 线型的转换过程 中起到了决定性作用,精确控制相位能够有效调节共振特性,为光学器件的优化设计提供了重要的调控 手段。



Figure 3. (a) Introduction of different phase transmission spectral lines into micro rings, (b) Enlarged transmission spectral lines 图 3. (a) 微环引入不同相位透射谱线, (b) 透射谱线放大图

在本文的研究中,选取了已知文章中器件相位单元[19]与相位大小关系进行对比。设计了微环半径为 75 μm,波导和总线波导的宽度均为 500 nm,耦合间隙为 160 nm,顶层硅的厚度为 220 nm 的硅基微环谐 振器。为了探究微环结构中相位差随孔径尺寸的变化,利用 FDTD 方法,对不同孔径的椭圆孔进行了仿 真计算,这种相位计算的物理机制源于不同结构对光程差的影响。如图 4 所示,给出了微环谐振器的相 位差随椭圆孔径变化的具体数值关系。由图中可以发现,当总线波导中椭圆形空气孔不断扩大,在工作 波长下整个相位延迟在不断的增大。



Figure 4. Additional phase delay caused by elliptical air holes of different sizes in bus waveguides 图 4. 不同尺寸的椭圆空气孔在总线波导中引起的额外相位延迟

此种方法,可以得到整个监测波长范围内全部的相位延迟变化,如图 5 所示。在微环总线中,不同 孔结构对额外相位延迟的影响主要体现在孔的尺寸变化。在上述结构中整体趋势上,额外相位延迟随波 长增加而减少,说明短波长光对孔结构的调制更敏感。增大孔尺寸会增强相位延迟累积。





Figure 5. Phase variation with wavelength obtained from elliptical air holes of different apertures 图 5. 不同孔径椭圆形空气孔所获相位随波长变化

为了深入研究相同相位单元在不同微环结构对器件相位延迟的影响,我们在硅基条波导微环中引入 了圆孔、椭圆孔和T形波导三种相位单元,并分析其对器件连续态和离散态相位差的调控作用。在半径 为10 µm、波导宽度为500 nm、总线宽度为500 nm、耦合间距为100 nm 的微环谐振器中,分别添加了 不同孔径的圆孔、椭圆孔和T形波导,结果如图6所示,结果表明,随着孔径的增加,相位在不同波长 下呈现非线性变化趋势:在短波长范围内相位延迟逐渐增加,接近1545 nm 时下降,在1550 nm 附近再 次上升。此外,相较于圆孔,椭圆孔的相位延迟调制趋势基本一致,说明仅改变孔洞形状对相位的影响 较为有限。与圆孔和椭圆孔相比,T形波导能够引起更大幅度的相位变化,且整体相位调制量显著提升。 此外,从加工工艺角度来看,T形波导无需额外打孔,仅需在波导上添加T形波导结构即可,既保持了 器件的紧凑性,又提升了加工可行性。因此,相比传统的孔洞结构,T形波导在微环谐振器的相位控制方 面展现出更优的性能,为未来高效相位调制提供了更具实用价值的方案。





为了对比不同波导结构对相位单元的响应,选取了亚波波长光栅波导微环谐振器,微环半径为10μm, 周期为300,占空比为0.533,耦合间距为450nm,总线选取亚波长周期数和宽度与微环相同。通过采取 和条波导中一样的数据进行探索相位的影响,在微环谐振器总线中分别添加了半径为0.05μm、0.06μm、 0.07 μm 的圆孔。结果如图 7(a)所示,整体相位变化不明显。当将 0.08 × 0.1、0.08 × 0.15、0.08 × 0.2 μm 的椭圆孔添加在总线上时,如图 7(b)所示,整体变化趋势和圆孔时基本一致,在检测的波长范围内几乎 没有变化。当添加不同长度 T 形相位单元,如图 7(c),虽然整个器件获得了较大的额外相位但是整体趋势依然和圆孔和椭圆孔一致,同条波导微环比相位差并没有产生剧烈变化,而是更趋近于一条直线。由 此可见,与条波导微环相比,亚波长光栅微环对于单个相位单元所引入的相位并不敏感,因此,亚波长 光栅微环难以实现 Fano 线型。



Figure 7. The influence of phase elements on phase difference in sub wavelength grating micro rings. (a) Circular hole; (b) Elliptical hole; (c) T-shaped waveguide

图 7. 亚波长光栅微环中相位单元对相位差影响。(a) 圆孔; (b) 椭圆孔; (c) T 形波导

4. 结论

研究了不同相位单元对条波导微环与亚波长光栅微环谐振器的相位调控效果。研究结果表明,圆孔、 椭圆孔还有T形波导均可对条波导微环的连续态和离散态的相位差进行调控,但是,相位单元在亚波长 光栅微环中的引入均未导致明显的相位变化,整体变化趋势趋于平缓,难以实现有效的相位调控。这主 要归因于亚波长光栅结构本身就是不连续的,单个局部扰动对相位差的影响较小。相比之下,条波导微 环结构能够更有效地放大单个相位单元的作用,尤其是T形波导,展现出更强的相位调控能力。因此, 对于实现高效的相位调控功能以实现线型调控方面,条波导微环谐振器相较于亚波长光栅微环具有更大 的应用潜力。

参考文献

- Zhang, M., Buscaino, B., Wang, C., Shams-Ansari, A., Reimer, C., Zhu, R., *et al.* (2019) Broadband Electro-Optic Frequency Comb Generation in a Lithium Niobate Microring Resonator. *Nature*, 568, 373-377. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1008-7
- [2] Stern, B., Ji, X., Okawachi, Y., Gaeta, A.L. and Lipson, M. (2018) Battery-Operated Integrated Frequency Comb Generator. *Nature*, 562, 401-405. <u>https://doi.org/10.1038/s41586-018-0598-9</u>
- [3] Jang, J.K., Klenner, A., Ji, X., Okawachi, Y., Lipson, M. and Gaeta, A.L. (2018) Synchronization of Coupled Optical Microresonators. *Nature Photonics*, 12, 688-693. <u>https://doi.org/10.1038/s41566-018-0261-x</u>
- [4] Sun, C., Wade, M.T., Lee, Y., Orcutt, J.S., Alloatti, L., Georgas, M.S., *et al.* (2015) Single-Chip Microprocessor That Communicates Directly Using Light. *Nature*, **528**, 534-538. <u>https://doi.org/10.1038/nature16454</u>
- [5] Kippenberg, T.J., Holzwarth, R. and Diddams, S.A. (2011) Microresonator-Based Optical Frequency Combs. *Science*, 332, 555-559. <u>https://doi.org/10.1126/science.1193968</u>
- [6] Ferdous, F., Miao, H., Leaird, D.E., Srinivasan, K., Wang, J., Chen, L., et al. (2011) Spectral Line-By-Line Pulse Shaping of On-Chip Microresonator Frequency Combs. Nature Photonics, 5, 770-776. <u>https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.255</u>
- [7] Zhang, W., Serna, S., Le Roux, X., Vivien, L. and Cassan, E. (2016) Highly Sensitive Refractive Index Sensing by Fast Detuning the Critical Coupling Condition of Slot Waveguide Ring Resonators. *Optics Letters*, 41, 532-535.

https://doi.org/10.1364/ol.41.000532

- [8] Xu, D.X., Densmore, A., Delâge, A., Waldron, P., McKinnon, R., Janz, S., et al. (2008) Folded Cavity SOI Microring Sensors for High Sensitivity and Real Time Measurement of Biomolecular Binding. Optics Express, 16, 15137-15148. <u>https://doi.org/10.1364/oe.16.015137</u>
- Zhou, L. and Poon, A.W. (2007) Electrically Reconfigurable Silicon Microring Resonator-Based Filter with Waveguide-Coupled Feedback. Optics Express, 15, 9194-9204. <u>https://doi.org/10.1364/oe.15.009194</u>
- [10] Cheng, Q., Dai, L.Y., Abrams, N.C., Hung, Y., Morrissey, P.E., Glick, M., et al. (2019) Ultralow-Crosstalk, Strictly Non-Blocking Microring-Based Optical Switch. *Photonics Research*, 7, 155-161. <u>https://doi.org/10.1364/prj.7.000155</u>
- [11] Wu, J., Cao, P., Pan, T., Yang, Y., Qiu, C., Tremblay, C., et al. (2014) Compact On-Chip 1 × 2 Wavelength Selective Switch Based on Silicon Microring Resonator with Nested Pairs of Subrings. *Photonics Research*, 3, 9-14. https://doi.org/10.1364/prj.3.000009
- Fan, S. (2002) Sharp Asymmetric Line Shapes in Side-Coupled Waveguide-Cavity Systems. *Applied Physics Letters*, 80, 908-910. <u>https://doi.org/10.1063/1.1448174</u>
- [13] Darmawan, S., Landobasa, Y.M., Dumon, P., Baets, R. and Chin, M.K. (2008) Resonance Enhancement in Silicon-On-Insulator-Based Two-Ring Mach-Zehnder Interferometer. *IEEE Photonics Technology Letters*, 20, 1560-1562. https://doi.org/10.1109/lpt.2008.928843
- [14] Smith, D.D., Chang, H., Fuller, K.A., Rosenberger, A.T. and Boyd, R.W. (2004) Coupled-Resonator-Induced Transparency. *Physical Review A*, 69, Article ID: 063804. <u>https://doi.org/10.1103/physreva.69.063804</u>
- [15] Gu, L., Fang, H., Li, J., Fang, L., Chua, S.J., Zhao, J., et al. (2019) A Compact Structure for Realizing Lorentzian, Fano, and Electromagnetically Induced Transparency Resonance Lineshapes in a Microring Resonator. Nanophotonics, 8, 841-848. <u>https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0229</u>
- [16] Chao, C. and Guo, L.J. (2003) Biochemical Sensors Based on Polymer Microrings with Sharp Asymmetrical Resonance. *Applied Physics Letters*, 83, 1527-1529. <u>https://doi.org/10.1063/1.1605261</u>
- [17] Zhou, X.Y., Zhang, L., Armani, A.M., Liu, J., Duan, X.X., Zhang, D.H., et al. (2015) An Integrated Photonic Gas Sensor Enhanced by Optimized Fano Effects in Coupled Microring Resonators with an Athermal Waveguide. Journal of Lightwave Technology, 33, 4521-4530. <u>https://doi.org/10.1109/jlt.2015.2478137</u>
- [18] Yi, H., Citrin, D.S. and Zhou, Z. (2010) Highly Sensitive Silicon Microring Sensor with Sharp Asymmetrical Resonance. Optics Express, 18, 2967-2972. <u>https://doi.org/10.1364/oe.18.002967</u>
- [19] Gu, L., Fang, L., Fang, H., Li, J., Zheng, J., Zhao, J., et al. (2020) Fano Resonance Lineshapes in a Waveguide-Microring Structure Enabled by an Air-Hole. APL Photonics, 5, Article ID: 016108. <u>https://doi.org/10.1063/1.5124092</u>
- [20] Fang, L., Gu, L., Zheng, J., Zhao, Q., Gan, X. and Zhao, J. (2020) Controlling Resonance Lineshapes of a Side-Coupled Waveguide-Microring Resonator. *Journal of Lightwave Technology*, 38, 4429-4434. https://doi.org/10.1109/jlt.2020.2991648
- [21] Xu, Y., Lu, L., Chen, G., Liao, J., Xu, X., Ou, J., et al. (2022) T-Shaped Silicon Waveguide Coupled with a Micro-Ring Resonator-Based Fano Resonance Modulator. Applied Optics, 61, 9217-9224. <u>https://doi.org/10.1364/ao.466288</u>