

doi:10.3788/gzxb20154401.0113002

基于眼型谐振腔的 Fano 谐振曲线尖锐度的分析

娄小伟^{1,2,3}, 崔锦江¹, 董宁宁¹, 徐建根¹, 檀慧明¹, 王帆¹

(1 中科院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163)

(2 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:为了获得较大的尖锐度,提升微环传感器的灵敏度,提出利用眼型谐振腔结构在下路端输出的非对称 Fano 谐振光谱,眼型谐振腔由一个外环和内环构成,外环与总线波导耦合,内环与外环耦合.利用传输矩阵法对下路端输出光谱进行了数值计算,在不同剩余电场比例系数下,发现非对称 Fano 谐振峰的尖锐度随电场剩余比例系数的增大而增大;改变外环与总线波导间的场强耦合系数和内环与外环之间的场强耦合系数,其尖锐度的最大值随外环和内环场强耦合系数变化缓慢增大,尖锐度最大值处谐振点传输系数值在不同电场剩余比例系数和内外环场强耦合系数下稳定在 -6 dB 附近.因此利用眼型谐振腔结构下路端的 Fano 谐振峰,可获得对耦合系数不敏感的尖锐度和谐振点传输系数,降低器件对耦合区加工准确度的要求.

关键词:光波导;传感器;眼型谐振腔;Fano 谐振;尖锐度

中图分类号:O43

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)01-0113002-6

Analysis of Sharpness Fano Resonance Line Based on Eye-like Resonator

LOU Xiao-wei^{1,2,3}, CUI Jin-jiang², DONG Ning-ning², XU Jian-gen²,
TAN Hui-ming², WANG Fan²

(1 Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology (SIBET),
Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China)

(2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics (CIOMP), Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The asymmetric Fano-resonance spectra was proposed to obtain a larger sharpness and elevate the sensitivity of ring resonator, the Eye-like resonator is utilized to generate the asymmetric Fano-resonance spectra, the Eye-like resonator consists two rings resonators with the outer loop coupled to two bus waveguides and the inner loop couple to the outer loop. Numerical calculation of spectra on the drop port was utilized by the transfer matrix method, as the round trip loss varies, the value of sharpness increases with the round trip loss; by changing the outer loop coupling coefficients and inner loop coupling coefficients, the maximum value of sharpness of Fano-resonance change slowly; as the round trip loss varies and a lager range of the outer loop and inner loop coupling coefficients, the corresponding transmission at the resonant point remains almost unchanged, about -6 dB. The sharpness of Fano resonant peak is insensitive for the coupling coefficients, which can reduce the requirements of manufacture of coupling region.

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No. 61007063)、江苏省自然科学基金(No. BK2012188)、江苏省产学研联合创新项目(No. BY2013034)和苏州市医疗器械与新医药专项(No. ZXY2013005)资助

第一作者:娄小伟(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为集成光波导传感器. Email:977347982@qq.com

导 师:檀慧明(1954-),男,研究员,博导,主要研究方向为全固态激光与光学频率变换技术、医用激光技术与仪器. Email:tanhm@ciomp.ac.cn

通讯作者:王帆(1982-),男,副研究员,博士,主要研究方向为集成光波导传感器、激光治疗仪. Email:wangf@sibet.ac.cn

收稿日期:2014-05-19; **录用日期:**2014-07-24

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Optical waveguide; Sensor; Eye-like resonator; Fano resonance; Sharpness

OCIS Codes: 130.2755;130.6010;070.5753;230.4555

0 引言

平面光波导微环谐振腔工艺加工成熟、尺寸小、便于集成,被应用在光通信^[1-3]和光传感^[4-18]等领域. Fano 谐振线形一般由一路谐振光和另一路与其相干的背景光之间相互干涉形成^[5],眼型谐振腔结构的 Fano 谐振谱线是由外环和内环共同作用产生的. 相较于洛伦兹线形,非对称 Fano 谐振线形更加陡峭,谐振峰、谷更加尖锐. 对于在平面光波导上制作的微环谐振腔,利用 Fano 线型谱线获得的探测极限是 10^{-8} RIU (Refractive Index Unit, RIU)^[6-7],而对称的洛伦兹线型谱线能够获得的探测极限是 10^{-7} RIU^[8],显然利用 Fano 线型谱线能够获得更高的灵敏度. Fano 线型谱线不仅在平面光波导微环谐振腔上获得了高灵敏度,而且利用 Fano 线型谱线在其它微纳结构传感上也获得了高灵敏度^[9],郑州大学材料物理教育部重点实验室就曾利用平面的金属等离子体微纳结构产生的 Fano 线型谱线获得了高达 1380nm/RIU 的超高灵敏度^[10]. 目前已经报道的利用微环谐振腔在输出光谱中产生 Fano 谐振的结构有沟道型波导^[7]、同心微环^[11]、环加强型马赫曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 结构^[12]、眼型嵌套微环结构^[13]、双总线环形谐振腔双光路干涉结构^[14-15]、嵌套环型 MZI 结构^[16]和反馈式跑道型光学微环结构^[17]等.

由于微环谐振腔的微环波导与总线波导之间的场强耦合系数对耦合间隙非常敏感,而目前的加工工艺还不能做到非常精确而且稳定不变的间隙,即便制作的是同一批结构其间隙都会不同,这极其不利于器件的加工和稳定性. 本文分析发现利用眼型谐振腔结构下路端获得的 Fano 线型谱线在其获得最大尖锐度时,对耦合系数是不敏感的,可以大大降低加工制作时对耦合间隙的加工准确度要求,有利于器件的加工和制作.

本文利用眼型谐振腔结构输出 Fano 线形谱线,在不同的电场剩余比例系数下,改变外环和内环的场强耦合系数,微调眼型谐振腔结构的内环与外环的相位比例,得到不同位置的下路端 Fano 谐振峰的最大尖锐度和对应的传输系数,在与单环比较的情况下,分析了 Fano 谐振峰的最大尖锐度和传输系数与电场剩余比例系数以及外环和内环的场强耦合系数的变化关系.

1 理论背景

1.1 眼型谐振腔结构分析

眼型谐振腔结构如图 1,从输入端输入的导波光经耦合区域 I (在不考虑其它损耗等因素下,根据能量

守恒定律,耦合区的直通系数和耦合系数平方和为 1) 进入外环. 在没有内环的情况下,只会耦合区域 I 发生一次谐振光与导波光之间的干涉,输出对称的洛伦兹线形曲线. 当加入内环时,耦合进内环的导波光与外环中的导波光在耦合区域 II 和 IV 发生干涉,在满足整数倍相位关系时,外环与内环谐振点会出现重合,在重合处产生对称分立的 Fano 谱线;不满足整数倍相位关系时,产生非对称的 Fano 线形谱线^[13,21]. 外环与总线波导间的场强耦合系数用 k_1 表示,内环与外环之间的场强耦合系数用 k_2 来表示,外环总相位 $\varphi_o = (2\pi/\lambda) \cdot N_{\text{eff}} \cdot l_o$ (l_o 为外环周长),内环总相位 $\varphi_i = (2\pi/\lambda) \cdot N_{\text{eff}} \cdot l_i$ (l_i 为内环周长),相位比 $\delta = \varphi_o / \varphi_i$. 假设制作的外环与内环具有相同的有效折射率,那么相位比即为长度比,因此内环的电场剩余比例系数可由外环电场剩余比例系数和相位比推导得出. 利用传输矩阵法^[20]获得下路端的传输谱线图. 计算中取 $k_1 = 0.35$, $k_2 = 0.2$, $\gamma = 0.985$,取相位比 $\delta = 3$ 至 $\delta = 3.025$,得到在外环 2π 范围内的传输谱线图如图 2.

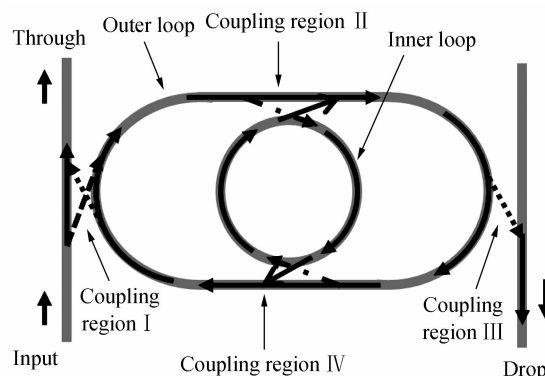


图 1 眼型嵌套微环谐振腔结构示意图
Fig. 1 Schematic of eye-like microring system

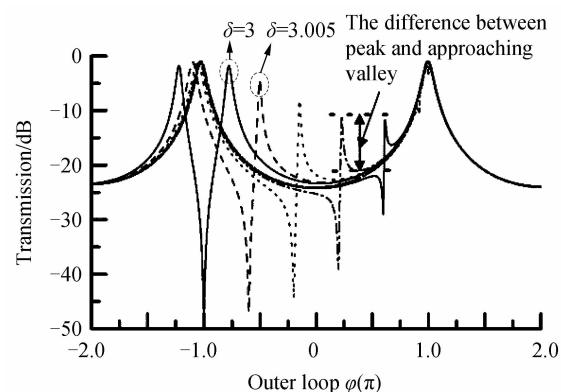


图 2 不同相位比下的传输谱线图,从左至右相位比 $\delta = 3, 3.005, 3.01, 3.015, 3.02, 3.023, 3.025$

Fig. 2 Different phase ratio of transmission, from left to right phase ratio $\delta = 3, 3.005, 3.01, 3.015, 3.02, 3.023, 3.025$

图 2 中相位坐标 φ 在 $-\pi$ 位置处,外环和内环的谐振位置重合,阶数类型相同(均处于奇数阶或者偶数阶),下路端产生对称的 Fano 谐振谱线.外环相位坐标 φ 在 $-\pi \sim \pi$ 范围内,非整数倍相位比,下路端产生非对称的 Fano 谐振谱线.外环相位坐标靠近 φ 在 $-\pi$ 处时,由于内外环谐振阶数类型一致, D_{\max} 的峰值和临近的谷值(如图 2)有较大差值.外环相位坐标靠近 φ 在 π 处时,外环谐振级数改变,而内环谐振级数不变,内外环的谐振级数类型不同, D_{\max} 的峰值和临近的谷值差值(The difference between peak and approaching valley of resonant point transmission)较小.

1.2 尖锐度分析

输出光谱谱线的谐振峰、谷处的尖锐度大小对微环传感器的分辨率具有重要意义,在相同光谱仪器分辨率下,尖锐度大的具有更高的探测限^[13,18-21].微环光谱谐振点的尖锐度为谐振点($dP/d\lambda=0$)处光谱的二阶导数为

$$S_{\max} = \frac{d^2 P}{d\lambda^2} \Big|_{dP/d\lambda=0} \quad (1)$$

式中 P 为归一化功率对波长 λ 的函数,由于引入了波长的关系, S_{\max} 会随着不同波长而改变,为了能够将分析结论应用到不同波长处,本文引入了输出光谱对外环相位的二阶导数来表示尖锐度,即

$$S_{\max,\varphi} = \frac{d^2 P}{d\varphi^2} \Big|_{dP/d\varphi=0} \quad (2)$$

式中 P 为归一化功率对外环相位 φ 的函数.

式(1)和式(2)的关系可表示为

$$S_{\max} = S_{\max,\varphi} \left(\frac{d\varphi}{d\lambda} \right)^2 \Big|_{dP/d\lambda=0} \quad (3)$$

改变外环与内环的相位比,得到不同外环场强耦合系数下的 Fano 谐振峰(Fano Resonance Peak)的尖锐度值,如图 3.

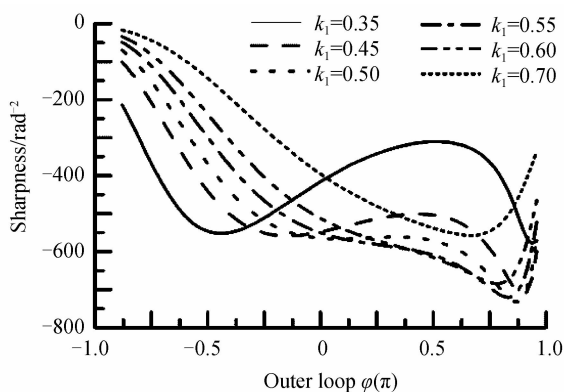


图 3 尖锐度随外环场强耦合系数变化

Fig. 3 The relationship of sharpness and outer loop coupling coefficient

从图 3 中可以看出,在耦合系数较小时,外环相位 φ 在 $-\pi \sim 0$ 范围内尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 具有最大值,在外环相位 φ 在 $0 \sim \pi$ 范围内,尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 的值也有一个最大

值.结合图 2 比较分析谐振点传输系数 D_{\max} 发现,外环相位 φ 在 $-\pi \sim 0$ 范围内的尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 最大值对应的谐振点传输系数 D_{\max} 具有较大的峰值且与临近谷值也具有较大的差值,而外环相位 φ 在 $0 \sim \pi$ 范围内的尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 最大值的谐振点功率虽具有极大的峰值,但是与临近谷值的差值很小,容易被噪音等干扰.增大外环场强耦合系数,外环相位 φ 在 $-\pi \sim 0$ 范围内尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 的最大值越过外环相位 0 点位置,在 φ 在 $-\pi \sim 0$ 范围内将没有 $S_{\max,\varphi}$ 的最大值.在较大的外环场强耦合系数下,如 $k_1=0.55$,外环相位为 0 附近也有较大的 $S_{\max,\varphi}$,但是没有最大值,选取这一段时应先考虑合适的 D_{\max} 峰值以及峰值与临近的谷值差值,再来考虑选取 $S_{\max,\varphi}$.在外环场强耦合系数极大时,如图 3 所示 $k_1=0.7$,相比较其它外环场强耦合系数,非对称 Fano 谐振峰的尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 的值整体都有减小.

2 数值分析及讨论

本文选取在外环相位 φ 在 $-\pi \sim 0$ 范围内的尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 进行了分析, φ 在 $-\pi \sim 0$ 范围内的尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 一直有最大值存在,而且对应的谐振点传输系数 D_{\max} 有较大的值且与临近谷值也具有较大的差值,较大的尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 有利于谐振点的分辨,较大的 D_{\max} 峰值和临近谷值差值有利于抵抗噪音的干扰,用作传感器测量,有助于传感器灵敏度的提高.由于增大外环场强耦合系数,导致外环相位 φ 在 $-\pi \sim 0$ 范围内 $S_{\max,\varphi}$ 没有最大值(如图 3 所示, $k_1=0.55$ 时).所以本文在分析时对较大的场强耦合系数未做分析.

2.1 外环场强耦合系数对 $S_{\max,\varphi}$ 和 D_{\max} 的影响

取不同的电场剩余比例系数 γ ,改变单环与总线波导的场强耦合系数 k_1 ,得到不同场强耦合系数 k_1 时下路端谐振峰的尖锐度,如图 4.对于眼型谐振腔结构,取与单环相同的电场剩余比例系数,内环场强耦合系数 k_2 取 0.2,改变外环场强耦合系数 k_1 和相位比 δ ,得到不同外环场强耦合系数 k_1 和尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 的关系图,如图 5.

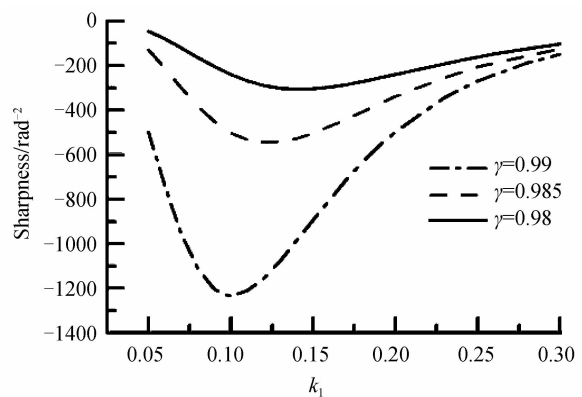


图 4 单环:尖锐度随场强耦合系数 k_1 的变化图

Fig. 4 Single ring: The relationship of sharpness and coupling coefficient k_1

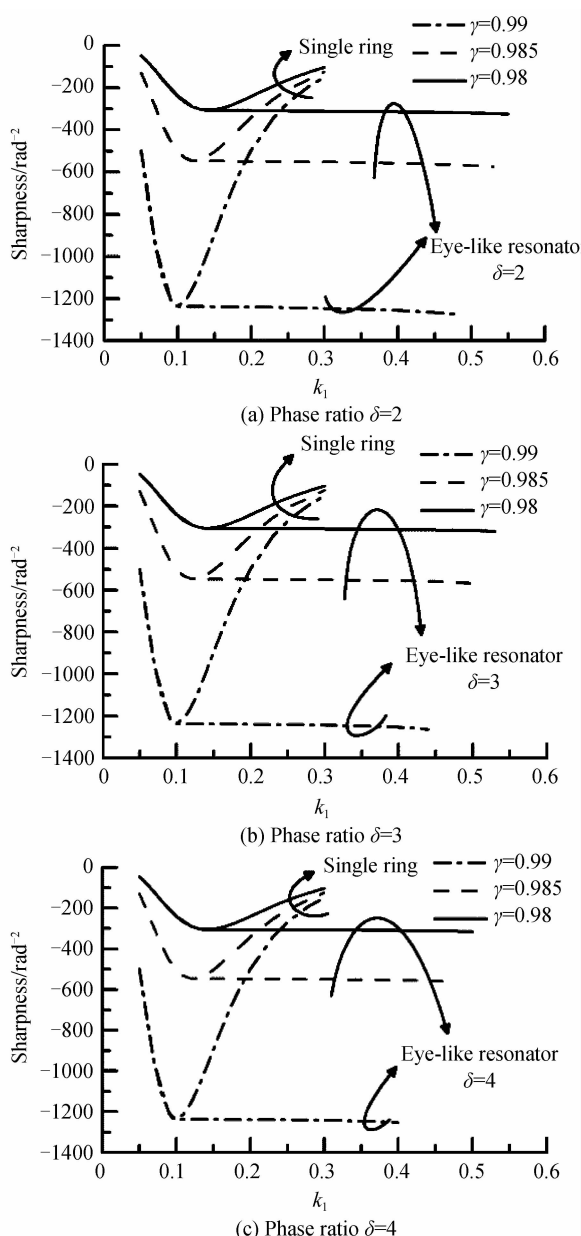


图5 Fano 谐振峰的尖锐度与外环场强耦合系数 k_1 关系图
 Fig. 5 The relationship of sharpness and the outer loop coupling coefficient k_1

从图 4 和 5 中可以看到, $S_{\max, \varphi}$ 的值随电场剩余比例系数增大而增大. 从图 4 中可以看到, 单环的 $S_{\max, \varphi}$ 先随着场强耦合系数 k_1 的增大而增大, 出现最大值, 然后开始随着场强耦合系数 k_1 的增大而减小, $S_{\max, \varphi}$ 随场强耦合系数变化比较明显. 从图 5 中可以看到, 眼型谐振腔结构的尖锐度, 在不同相位比下, 在外环场强耦合系数 k_1 较小时都有一段和单环变化一致的曲线段, 这是因为在外环场强耦合系数 k_1 较小时, 眼型谐振腔结构的最大 $S_{\max, \varphi}$ 出现在外环谱线上, 非对称 Fano 谐振峰的尖锐度并没有外环大. 随着外环场强耦合系数 k_1 的增大, 外环达到最大尖锐度以后, 与单环不再重合, 单环的尖锐度开始随着场强耦合系数的增大而减

小, 而眼型谐振腔结构的最大尖锐度 $S_{\max, \varphi}$ 出现在非对称 Fano 谐振峰上, 随着外环场强耦合系数的增大, 缓慢变化. 从图 5 中可以看出, 非对称 Fano 谐振峰的最大尖锐度 $S_{\max, \varphi}$ 在较大的外环场强耦合系数 k_1 范围内缓慢增大, 变化并不明显, 在不同的电场剩余比例系数下均平缓变化.

通过计算非对称 Fano 谐振峰的 $S_{\max, \varphi}$ 在平缓变化段的两端差值, 来表征非对称 Fano 谐振峰的尖锐度 $S_{\max, \varphi}$ 随外环场强耦合系数变化情况, 变化率为变化值与单环的最大尖锐度, 如表 1.

表 1 $S_{\max, \varphi}$ 变化情况
 Table 1 Sharpness variation

γ	Variation of value/rate($\delta=2$)	Variation of value/rate($\delta=3$)	Variation of value/rate($\delta=4$)
0.99	38(3.07%)	26.7(2.16%)	17(1.37%)
0.985	26.5(4.85%)	19.8(3.62%)	13.3(2.43%)
0.98	18.4(6.01%)	13.6(4.44%)	10(3.27%)

从表 1 中的数据可以看出, 电场剩余比例系数 $\gamma=0.98$ 时, 非对称 Fano 谐振峰 $S_{\max, \varphi}$ 的最大值在平缓变化段的变化率为 6.01%, 对应的外环场强耦合系数 k_1 变化 0.4, 相比较于单环的外环场强耦合系数变化 0.16、变化率(选取图 5(a)中 $\gamma=0.98, k_1=0.16$ 和 $k_1=0.3$ 对应差值分析)高达 66.34% 而言, 非对称 Fano 谐振峰的尖锐度 $S_{\max, \varphi}$ 最大值随外环场强耦合系数 k_1 的变化并不明显.

单环和非对称 Fano 谐振峰的 $S_{\max, \varphi}$ 最值对应的谐振峰传输系数 D_{\max} 随外环场强耦合系数变化关系如图 6 和 7.

从图 6 中可以看到, 单环的谐振点传输系数随场强耦合系数的增大而增大, 从图 7 中可以看到, 眼型结构的非对称 Fano 谐振峰的光谱传输系数 D_{\max} 基本不变, 随外环场强耦合系数的增大, 始终稳定在 -6 dB 附近变化, 对外环场强耦合系数的变化不敏感.

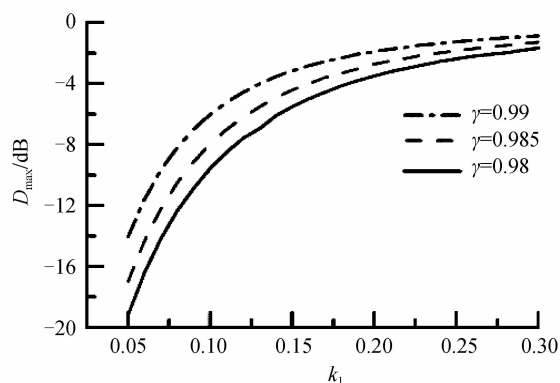


图 6 单环: 谐振点传输系数 D_{\max} 随场强耦合系数 k_1 变化关系图
 Fig. 6 Single ring: The relationship of D_{\max} and k_1

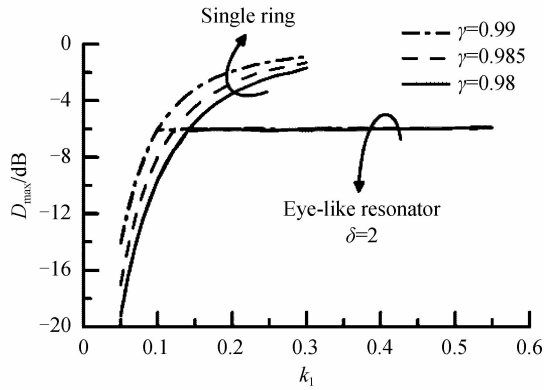
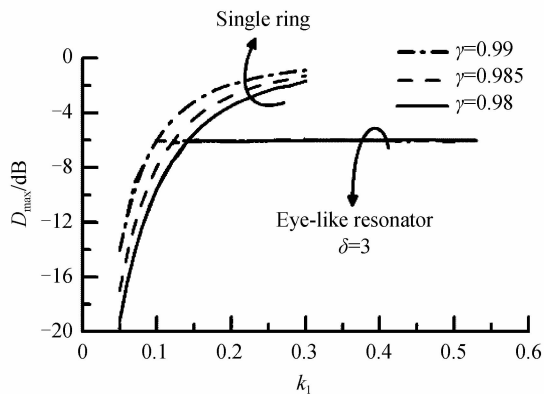
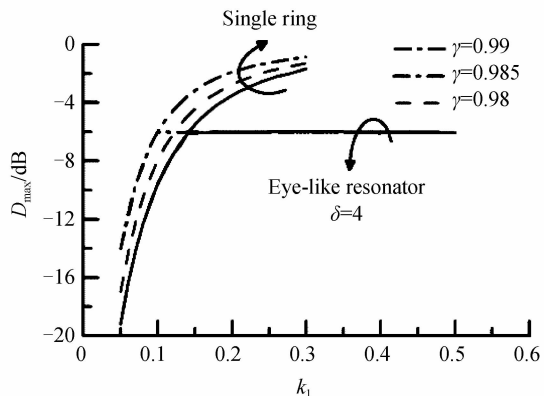

 (a) Phase ratio $\delta=2$

 (b) Phase ratio $\delta=3$

 (c) Phase ratio $\delta=4$

 图 7 眼型谐振腔结构: 谐振点传输系数 D_{\max} 与外环强耦合系数 k_1 变化关系图

 Fig. 7 Eye-like resonator: The relationship of D_{\max} and the outer loop coupling coefficient k_1

2.2 内环强耦合系数对 $S_{\max,\varphi}$ 和 D_{\max} 的影响

从上面的分析可知,非对称 Fano 谐振峰在不同相位比附近和外环电场剩余比例系数下的变化趋势是一致的,所以在分析内环强耦合系数对 $S_{\max,\varphi}$ 和 D_{\max} 的影响时,只选择了相位比 $\delta=3$ 和外环电场剩余比例系数 $\gamma=0.985$ 进行了分析。

取外环电场剩余比例系数 $\gamma=0.985$ 、外环强耦合系数 $k_1=0.3$ 为定值,改变不同内环强耦合系数 k_2 得到图 8,在内环强耦合系数 k_2 较大时出现如图 3 中较大外环强耦合系数 k_1 的情况,在外环相位 φ 在 $-\pi\sim 0$ 范围内 $S_{\max,\varphi}$ 没有最大值。

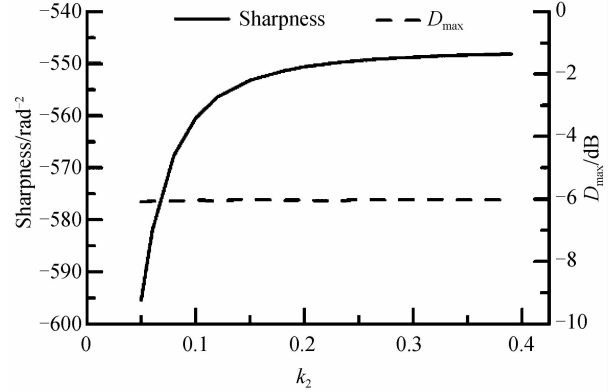

 图 8 尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 最大值和对应谐振点传输系数 D_{\max} 内环强耦合系数 k_2 与变化图

 Fig. 8 The maximum value of sharpness and corresponding resonant point Transmission with inner loop coupling coefficient k_2 changing

从图 8 中可以看到,在外环强耦合系数一定的情况下,非对称 Fano 谐振峰的 $S_{\max,\varphi}$ 的最大值随内环强耦合系数的增大呈减小趋势,但是在内环强耦合系数达到 0.2 以后变化开始不明显,有一个较大的平缓变化范围.对应的谐振点功率 D_{\max} 在内环强耦合系数变化时,仍然在 -6 dB 附近变化,表明 D_{\max} 对内环强耦合系数并不敏感。

2.3 谐振点传输系数 D_{\max} 峰值与临近谷值差值分析

由于噪音等干扰因素的存在,选择的 Fano 谐振峰还应考虑 D_{\max} 峰值和临近谷值(如图 2 中所示)的差值,如果差值较小,容易被干扰.从上面的分析可知不同剩余电场比例系数下的尖锐度 $S_{\max,\varphi}$ 和 谐振点传输系数 D_{\max} 的变化情况是一致的,所以在分析谐振点功率 D_{\max} 峰值和临近谷值的差值时只选取外环电场剩余比例系数 $\gamma=0.985$ 来分析,如图 9。

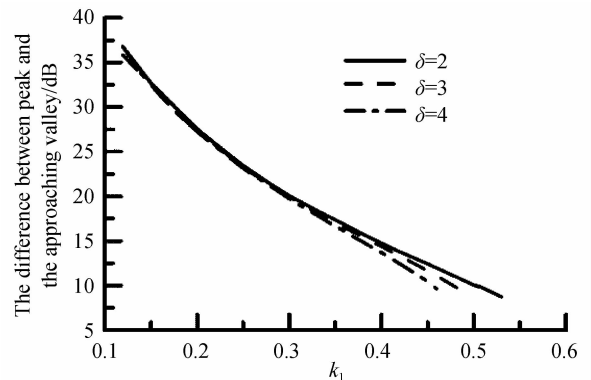

 图 9 谐振点 D_{\max} 峰值和临近谷值的差值随外环强耦合系数 k_1 变化图

 Fig. 9 The difference between the peak and the approaching valley of resonant Transmission with the outer loop coupling coefficient k_1 changing

从图 9 中可以看到,外环强耦合系数增大时,非对称 Fano 谐振谱对应的 D_{\max} 峰值和临近谷值的差值呈减小趋势.最大差值高于 35 dB,最小差值处约为

10 dB, 高于 10 dB 的差值, 不易被噪音等因素干扰到谐振点, 对噪音有较强的抗干扰能力.

3 结论

分析可知: 单环谐振点传输系数 D_{\max} 随场强耦合系数增大而增大, 尖锐度 $S_{\max, \varphi}$ 随场强耦合系数增大先增大后减小, 在尖锐度 $S_{\max, \varphi}$ 最大处, 对应的谐振点传输系数 D_{\max} 较小, 选取较大 D_{\max} 就不能获得最大的 $S_{\max, \varphi}$. 眼型谐振腔结构在较大的内环和外环场强耦合系数范围内, 通过微调相位比获得的非对称的 Fano 谐振峰的尖锐度最大值 $S_{\max, \varphi}$ 对内环和外环场强耦合系数的变化不敏感, 其对应的 D_{\max} 对内环与外环场强耦合系数变化也不敏感, 这种不敏感性在耦合区制作时能够降低对加工准确度的要求. 基于特定相位比的眼型谐振腔结构在获得最大 $S_{\max, \varphi}$ 的同时还能获得较大的 D_{\max} , 将其用于传感器, 有助于获得较高的灵敏度.

参考文献

- [1] CHEN Wei-wei, WANG Peng-jun, YANG Jian-yi, *et al.* Silicon-based microring resonator modulator for optical duobinary[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0213003.
陈伟伟, 汪鹏君, 杨建义, 等. 基于硅基微环的光双二进制[J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 0213003.
- [2] HAN Xiu-you, SONG Hong-yan, ZHAO Ming-shan, *et al.* Study on the integrated waveguide optical delay line based on microring resonators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 782-786.
韩秀友, 宋红妍, 赵明山, 等. 微环谐振腔集成光波导光延时线研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 782-786.
- [3] WEI Li-ping, WANG Yong-hua, ZANG Jun-bin, *et al.* Analysis and optimum design of silicon-on-insulator micro-ring resonator electro-optic modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1473-1477.
韦丽萍, 王永华, 臧俊斌, 等. 绝缘体上硅微环谐振腔电光调制器的分析与最优设计[J]. 光子学报, 2013, **42**(12): 1473-1477.
- [4] YI Hua-xiang, CITRIN D S, ZHOU Zhi-ping. Coupling-induced high-sensitivity silicon microring intensity-based sensor [J]. *Journal of Optical Society in America B*, 2011, **28**(7): 1611-1615.
- [5] FAN S. Sharp asymmetric line shapes in side-coupled waveguide-cavity system[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**(6): 908-910.
- [6] CHAO C Y, GUO L J. Biochemical sensors based on polymer microrings with sharp asymmetrical resonance [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(8): 1527-1529.
- [7] YI Hua-xiang, CITRIN D S, ZHOU Zhi-ping. Highly sensitive silicon micro ring sensor with sharp asymmetrical resonance[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(3): 2967-2971.
- [8] LI Xiao-hui, ZHANG Zi-yang, SU Yi-kai, *et al.* Sensitive label-free and compact biosensor based on concentric micro-ring resonators in silicon-on-insulator[J]. *Applied Optics*, 2009, **45**(20): 90-94.
- [9] GREEN W M J, LEE R K, DEROSE G A, *et al.* Hybrid InGaAsP-InP Mach-Zehnder racetrack resonator for thermo-optic switching and coupling control [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(5): 1651-1659.
- [10] QIU Chen, YU Ping, YANG Jian-yi, *et al.* Asymmetric Fano Resonance in eye-like microring system [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**: 021110.
- [11] WANG Fan, WANG Ming-hua, YANG Jian-yi, *et al.* Fano resonance based Mach-Zehnder optical switch employing dual-bus coupled ring resonators two-beam interferometer [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(9): 7708-7716.
- [12] HU Ting, YU Ping, QIU Chen, *et al.* Tunable Fano resonances based on two-beam interference in microring resonator [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**: 011112.
- [13] DAMAWAN S, LANDOBASA Y M, CHIN M K. Nested ring Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(2): 437-448.
- [14] BU Tian-rong, CHEN Yao, HE Peng-cheng, *et al.* Study on the transducer sensitivity of racetrack optical micro-ring resonator with feedback [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0823005.
卜天容, 陈曜, 何鹏程, 等. 反馈式跑道型光学微环的传感灵敏度研究 [J]. 光子学报, 2014, **43**(8): 0823005.
- [15] SUMETSKY M. Optimization of optical ring resonator devices for sensing applications [J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(17): 257-2579.
- [16] SUMETSKY M. Optimization of resonant optical sensors [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(25): 17749-177457.
- [17] HRYNIEWICZ J V, ABSIL P P, LITTLE B E, *et al.* Higher order filter response in coupled microring resonators [J]. *Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(3): 320-22.
- [18] QIU Chen. The study of several applications based on tunable silicon microring resonators [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
邱晨. 基于微环谐振腔可调特性的硅光子应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.