

端面反射和超模损耗对波导环形谐振腔输出谱线的影响

费瑶^{1,2}, 何玉铭^{1,2}, 杨富华^{1,2}, 李兆峰^{1,2*}

¹中国科学院半导体研究所半导体集成技术工程研究中心, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 波导环形谐振腔(WRR)是集成光通信以及光学传感器领域的关键器件之一,其谐振曲线的形貌将影响系统的性能。针对谐振腔耦合器一阶超模传输损耗差异、谐振腔外直波导端面反射,利用多光束干涉叠加原理,得到了波导环形谐振腔输出谱线的表达式。利用基于单边带调制的光学矢量网络分析方法,对制备的高横纵比的氮化硅光 WRR 进行了谐振曲线谱的测试,证实了耦合器模式以及直波导端面反射对谐振曲线的影响,实际测试曲线与理论仿真结果拟合较好。

关键词 集成光学; 环形谐振腔; 氮化硅光波导; 耦合器

中图分类号 TN629.1; O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0513001

Effect of Backreflection and Normal Mode Loss on the Transmission of Waveguide Ring Resonator

Fei Yao^{1,2}, He Yuming^{1,2}, Yang Fuhua^{1,2}, Li Zhaofeng^{1,2}

¹Engineering Research Center for Semiconductor Integrated Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The waveguide ring resonator (WRR) is one of the key elements in the fields of integrated optical communications and optical sensors. The performance of these systems will be affected by the shape of the resonant curve. Aiming at the difference of transmission loss between the symmetric and anti-symmetric modes of the cavity coupler, and the reflection at the end face of the straight waveguide outside the resonator, the expression of the output line of the waveguide ring resonator is obtained using the principle of multi-beam interference superposition. The high aspect ratio silicon nitride WRR is tested with an optical vector network analyzer based on single-side band modulation. The results confirm the effect of the coupler mode and the reflection at waveguide end face on the resonance curve. The actual test curves can be well fitted with the theoretical simulation results.

Key words integrated optics; ring resonator; silicon nitride optical waveguide; coupler

OCIS codes 130.3120; 230.7370; 230.3120

收稿日期: 2017-11-12; 收到修改稿日期: 2017-12-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2016YFA02005003)、国家自然科学基金(61274066, 61504138, 61474115)、中科院项目(Y6JA061001)

作者简介: 费瑶(1990—),男,博士研究生,主要从事谐振型集成光学陀螺仪方面的研究。E-mail: yaofei@semi.ac.cn

导师简介: 杨富华(1961—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事微纳米加工技术方面的研究。

E-mail: fhyang@semi.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: lizhaofeng@semi.ac.cn

1 引 言

光波导环形谐振腔(WRR)是集成光通信以及光传感领域的核心器件之一^[1-2],谐振型光学陀螺仪、光学滤波器和波分复用器等应用都对 WRR 的谐振曲线形貌有一定的要求^[3-4]。已有的报道对 WRR 谐振曲线不对称性的研究主要集中在波导中偏振态的影响^[5],并且缺乏结合多种因素进行联合分析的研究。高横纵比氮化硅波导由于具备低损耗($>0.1 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$)、高偏振相关损耗($>75 \text{ dB}$)、易于制备等特点^[6],近年来引起广泛的关注。本文针对高横纵比的氮化硅 WRR,分析了谐振腔耦合器一阶超模传输损耗的差异以及谐振腔外直波导的端面反射,利用多光束干涉叠加原理,对 WRR 的输出谱线进行了理论研究。在此基础上,对测得的氮化硅 WRR 谐振曲线进行了分析,对理论分析结果进行了验证。

2 理论分析

2.1 腔外波导端面反射的影响

在实际应用以及测试中,WRR 通常会与光纤进行耦合^[7]。一个典型的 WRR 与光纤的耦合系统如图 1 所示,其中 t_1 为入射光纤与直波导的耦合效率, t_2 为直波导与出射光纤的耦合效率, r_1 和 r_2 分别为入射端和出射端直波导的端面反射率,C 为耦合器。以 TE 模为分析对象,从光纤耦合进波导的光场可以表示为

$$E_1 = \sqrt{t_1} E_0 \exp [i(\omega t + \varphi_0)], \quad (1)$$

式中 ω 为光波角频率, φ_0 为初始相位值。 E_1 经过

一次耦合器 C 到达直波导出射端时,光波场可以分为两部分,一部分是直通光

$$E_{21} = P \sqrt{t_1} E_0 \exp [i(\omega t + \varphi_0)] \exp (ikL), \quad (2)$$

$$P = \sqrt{1 - k_c} \sqrt{1 - \alpha_c}, \quad (3)$$

另一部分是在环形谐振腔中传输 m 圈后耦合进直波导的光

$$E_{22} = \sqrt{t_1} R E_0 \exp [i(\omega t + \pi + \varphi_0)] \sum_{m=1}^{\infty} Q^{m-1} \exp (-i\omega m\tau), \quad (4)$$

$$R = k_c(1 - \alpha_c) \sqrt{1 - \alpha_L}, \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{1 - \alpha_L} \sqrt{1 - k_c} \sqrt{1 - \alpha_c}, \quad (6)$$

式中 k_c 为耦合器 C 的耦合比, α_c 为耦合器 C 的插入损耗, α_L 为光波在谐振环中传输一周的损耗, $k = \omega n/c$, n 为有效折射率, c 为真空中光速, L 为直波导长度, $\tau = n\pi D/c$ 为光在环中传输一周需要的时间。结合(1)、(2)和(4)式计算得到 E_1 经过一次耦合器 C 到达直波导出射端时的光为

$$E_3 = E_1 \left[P \exp(ikL) + \frac{R \exp(i\pi)}{\exp(i\omega\tau) - Q} \right]. \quad (7)$$

从(7)式可以看出,光每次从直波导一端反射到另一端只要乘以右边括号项,而从图 1 中可以发现耦合进接收光纤的光可以表示成在直波导中反射 $m - 1$, ($m = 1, 2, 3 \dots$) 次的光波相加再耦合,即

$$E_{\text{out}} = \sqrt{t_1 t_2} E_0 \exp(i\omega t + i\varphi_0) \sum_{m=1}^{\infty} \sqrt{r_1 r_2}^{m-1} \times \left[P \exp(ikL) + \frac{R \exp(ikL + i2\pi)}{\exp(i\omega\tau) - Q} \right]^{2m-1}. \quad (8)$$

通过推导化简之后,输出谱线可以表示为

$$T_s = \frac{|E_{\text{out}}|^2}{|E_0|^2} = \left| \frac{[\exp(i\omega\tau) - Q][\exp(i\omega\tau)P - PQ - R] \sqrt{t_1 t_2}}{-[\exp(i\omega\tau) - Q]^2 + [\exp(i\omega\tau)P - (PQ + R)]^2 \sqrt{r_1 r_2} \exp(2ikL)} \right|^2. \quad (9)$$

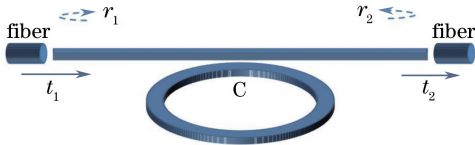


图 1 WRR 与光纤耦合系统框图

Fig. 1 Diagram of coupling system between fibers and WRR

2.2 耦合器模式的影响

以上在未考虑耦合器超模的情况下分析了腔外波导端面反射对 WRR 输出谱线的影响,并推导出了准确的输出谱线公式。然而在实际中,WRR 输出谱线还受耦合器超模的影响,在本节中将利

用已有的对耦合器超模的研究结论^[8],推导有端面反射影响和无端面反射影响时的 WRR 输出谱线公式。在 WRR 中,通常由两个光波导靠在一起构成定向耦合器。在渐逝场定向耦合器中,对于每个偏振态都存在两个一阶超模,分别为对称模与反对称模。以实验中测试用的氮化硅 WRR 为例,耦合区域的横截面如图 2(a) 所示。其中氮化硅波导的宽度为 $5 \mu\text{m}$,高度为 60 nm ,耦合区域间隔为 $1.5 \mu\text{m}$,折射率为 1.97。上包层二氧化硅厚度 $h = 3 \mu\text{m}$,并且通过掺杂硼和磷调整其折射率使之与衬底相同,折射率为 1.457。激光光源工作波

长为 1550 nm。利用 Lumerical Mode Solution 仿真计算该耦合区域的模式,得到 TE 场的对称模与反对称模分别如图 2(b)和图 2(c)所示。其中对称模的有效折射率为 1.46835,反对称模的有效折射率为 1.46738。

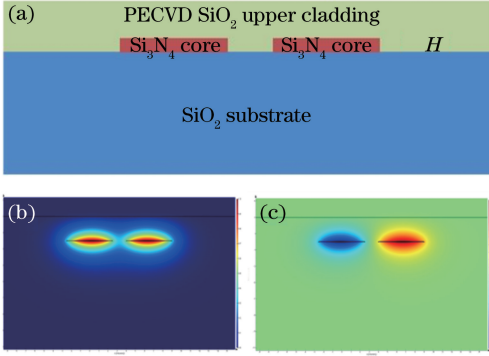


图 2 (a)氮化硅 WRR 耦合区域截面图;(b)对称模的 E_x ;
(c)反对称模的 E_x

Fig. 2 (a) Sectional view of silicon nitride WRR coupling section; (b) E_x of the symmetric mode; (c) E_x of the antisymmetric mode

对称模和反对称模在经过耦合器时会有不一样的损耗,导致一个波导中的光可以耦合到另一个波

导中的能量小于 100%,同时导致两个波导中的光相位变化小于 $\pi/2$,从而影响了导波的干涉。考虑对称与反对称模在耦合器传输时的损耗差异,耦合器 C 的耦合比和直通比可以表示为^[8]

$$k'_C = \left(\frac{\rho_+ - \rho_-}{2} \right)^2 + \rho_+ \rho_- \sin^2 \varphi, \quad (10)$$

$$T_C = \left(\frac{\rho_+ + \rho_-}{2} \right)^2 - \rho_+ \rho_- \sin^2 \varphi, \quad (11)$$

$$\varphi = \pi L_C \Delta n / \lambda, \quad (12)$$

两个波导中的光相位差为^[8]

$$\gamma = \arctan \left(\frac{2\rho_+ \rho_- \sin^2 \varphi}{\rho_+^2 - \rho_-^2} \right), \quad (13)$$

式中 ρ_+ 、 ρ_- 分别为对称模和反对称模经过耦合器后的幅度传输比, Δn 为两个模式的有效折射率差, λ 为光波长, L_C 为耦合区域长度。则(3)式、(5)式和(6)式分别改为

$$P' = \sqrt{T_C} \sqrt{1 - \alpha_C}, \quad (14)$$

$$R' = k'_C (1 - \alpha_C) \sqrt{1 - \alpha_L}, \quad (15)$$

$$Q' = \sqrt{1 - \alpha_L} \sqrt{T_C} \sqrt{1 - \alpha_C}. \quad (16)$$

因此,若将耦合器模式的影响和直波导端面反射的影响结合起来考虑,接收光纤接收到的光为

$$E'_{out} = \sqrt{t_1 t_2} E_0 \exp(i\omega t + i\varphi_0) \sum_{m=1}^{\infty} (\sqrt{r_1 r_2})^{m-1} \times \left[P' \exp(ikL) + R' \exp(ikL + 2i\gamma) \frac{1}{\exp(i\omega\tau) - Q'} \right]^{2m-1}, \quad (17)$$

输出谱线可以表示为

$$T'_s = \frac{|E'_{out}|^2}{|E_0|^2} =$$

$$\left| \frac{[\exp(i\omega\tau) - Q'] [\exp(i\omega\tau) P' - P' Q' - R' \exp(2i\gamma)] \sqrt{t_1 t_2}}{-[\exp(i\omega\tau) - Q']^2 + \{[\exp(i\omega\tau) P' - P' Q']^2 + (2e^{i\omega\tau} P' - 2P' Q' + e^{2i\gamma} R') R' e^{2i\gamma}\} \sqrt{r_1 r_2} \exp(2ikL)} \right|^2. \quad (18)$$

特别地,当直波导两端没有反射时,

$$T'_s = t_1 t_2 \left| P' + \frac{\exp(2i\gamma) R'}{\exp(i\omega\tau) - Q'} \right|^2. \quad (19)$$

2.3 数值计算

根据数值计算结果分析反射率、耦合器模式传输损耗差、腔外直波导长度对谐振曲线形貌的影响。计算中纵坐标采用对数表示,即 $20 \lg T'_s$ 。

图 3(a)和图 3(b)所示为不考虑耦合器超模影响时的谐振曲线示意图。其中,图 3(a)所示为腔外导引波导端面反射对谐振曲线形貌的影响机理,直波导与两个端面反射构成法布里-珀罗腔,其谐振曲线会与环形

谐振腔谐振曲线叠加从而影响谐振曲线形貌。图 3(b)所示为端面反射率和直波导长度对谐振曲线形貌的影响。其中环形谐振腔环长 $L_r = \pi D$,环形谐振腔直径 $D = 1.6 \text{ cm}$,波导有效折射率为 1.468。从图中可以看出,直波导端面反射率和长度分别影响法布里-珀罗谐振腔的谐振深度和谐振频率,与环形谐振腔的谐振曲线叠加后可能导致谐振曲线不对称。由图 3(b)可知,当直波导长度 $L = L_r/2$ 时,谐振曲线依然对称。

图 3(c)和图 3(d)所示为考虑耦合器超模影响时的谐振曲线示意图。其中图 3(c)所示为在忽略腔外直波导端面反射的情况下,不同的耦合器一阶

超模损耗差值对谐振曲线形貌的影响。从图中可以看出, ρ_+ 和 ρ_- 差值越大, 谐振曲线的不对称度越大。特别地, 当 $\rho_+ = \rho_-$ 时, $\gamma = \pi/2$, 谐振曲线保持对称。图 3(d) 所示为同时考虑耦合器超模和腔外直波导端面反射的 WRR 输出谱线, 其中 $\rho_+ = 1$,

$\rho_- = 0.9$ 。对比图 3(b) 和图 3(d) 可以发现, 由于耦合器一阶超模损耗差值的影响, 使得谐振谷两臂倾向于往一侧偏斜, 这也与图 3(c) 的结果相符。当直波导长度 $L = L_r/2$ 时, 谐振曲线虽然不对称, 但是周期依然与环形谐振腔相同。

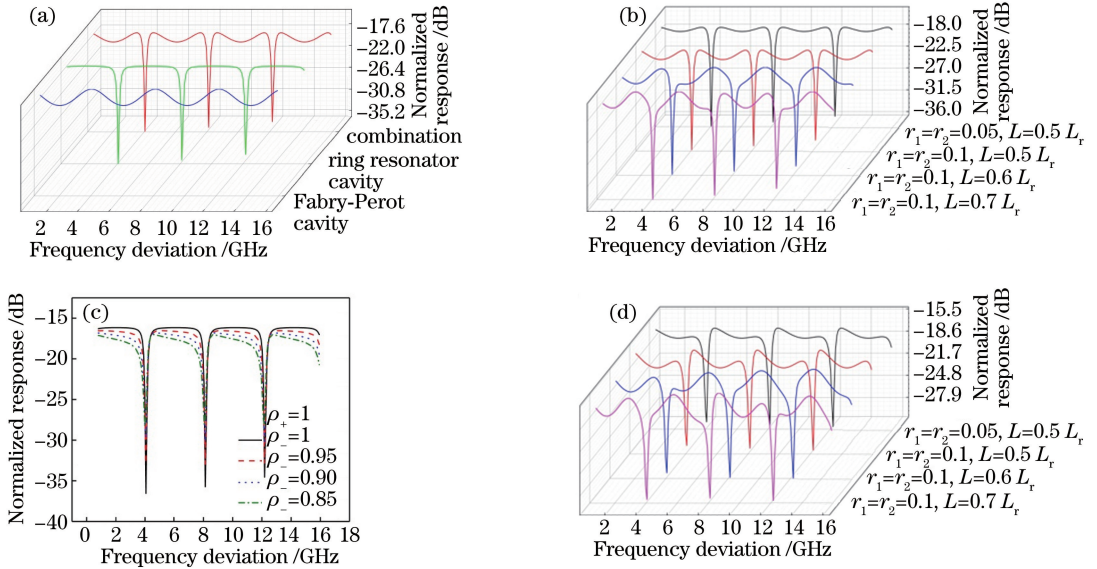


图 3 (a) 法布里-珀罗腔与环形谐振腔谐振叠加示意图; (b) 端面反射对谐振曲线的影响; (c) 耦合器模式对谐振曲线的影响; (d) 结合端面反射和耦合器模式对谐振曲线的影响

Fig. 3 (a) Schematic of the superposition of the resonances of the Fabry-Perot cavity and the ring resonator; (b) effect of the end-face reflection on the resonance curve; (c) influence of the normal mode on the resonance curve; (d) influence of the combination of end-face reflection and coupler mode on resonance curves

3 实验结果

实验中采用基于单边带调制的光学矢量网络分析方法对谐振腔进行测试, 这种方法可以在高分辨率的宽带宽内工作^[9]。图 4 为实验测试的系统示意图。激光从可调谐激光器 (TLS) 中发出, 经过相位调制器 (PM) 时被矢量网络分析仪 (VNA) 中发出的

射频信号调制, 其中一个边带被滤波器滤除, 掺铒光纤放大器 (EDFA) 用来补偿光纤和波导耦合的损耗, 由于高横纵比的氮化硅波导对 TM 基模的限制很弱^[10], 一个偏振控制器 (PC) 被用来控制偏振态, 氮化硅 WRR 通过与光纤的耦合最后被光电探测器 (PD) 探测到, 最后通过 VNA 获得 WRR 的响应曲线。

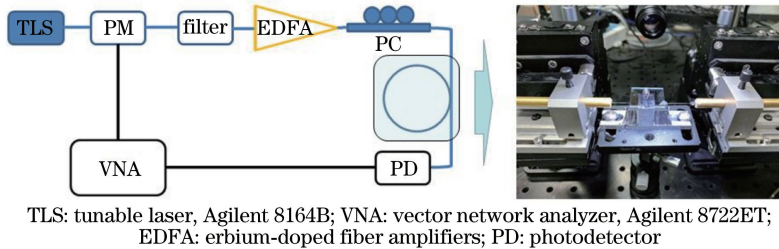


图 4 测试系统示意图

Fig. 4 Schematic of the measurement system

图 5(a) 和图 5(b) 给出了实验中测试的具有代表性的氮化硅 WRR 谐振曲线测试数据和拟合曲线, 以说明 2.1 节和 2.2 节所述的因素确实会影响 WRR 输出谱线。实验中氮化硅 WRR 环长 $L_r =$

5.38 cm, 直波导长度 $L = 2.65$ cm, 耦合区域长度 $L_c = 1786 \mu\text{m}$, 对应的耦合比为 0.12。其他参数如 2.2 节所述。光纤与波导的耦合效率由参考直波导测试参数获得, 将有一定误差。在图 5(a) 中忽略了

耦合器超模的影响,基于(9)式对实验数据进行了拟合,当直波导端面反射率 $r_1=r_2=0.1$ 时,曲线与实验数据拟合较好。由(9)式可知,曲线形貌和 r_1 和 r_2 的乘积有关,因此并不能确定每个端面的反射率。图 5(b)由于实验中测试得到的谐振曲线没有看到明显的端面反射影响,因此基于(19)式对实验数据进行了拟合。当 $\rho_+=1, \rho_-=0.85$ 时,拟合曲线与实验数据吻合较好。对于同样设计参数的氮化硅 WRR,测试曲线的差异可能来自以下几个方面:1) 涡轮划片导

致每个 WRR 芯片端面差异较大,当反射光与传播方向的夹角较大时,由于其无法被原来的模式捕获而消散掉,导致图 5(a)中观测到明显的端面反射效应,而图 5(b)中没有;2) 因为耦合器中对称模和反对称模的模场分布有差异,工艺误差引起的耦合器不同区域波导的扰动将影响耦合器超模传输损耗差值的不同,因此并没有在每一个氮化硅 WRR 中都观测到耦合器超模的影响;3) 工艺中杂质的引入会对每个波导的传输损耗有很大的影响。

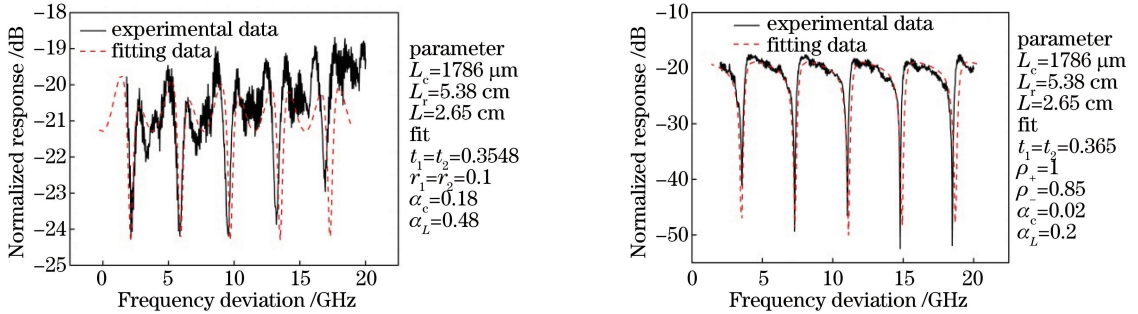


图 5 (a) 1 号氮化硅 WRR 样片实验数据与拟合;(b) 2 号氮化硅 WRR 样片实验数据与拟合

Fig. 5 (a) Experimental data and fitting of the first silicon nitride WRR; (b) experimental data and fitting of the second silicon nitride WRR

实验结果表明,端面反射和超模损耗差异这两个因素对谐振曲线形貌影响都很大,在一些应用中这些效应可能会带来严重影响。例如在谐振型光学陀螺中谐振曲线不对称直接影响陀螺输出偏差^[11],在滤波器的应用中阻带不平整将导致阻带的抑制比较差。在以后的工作中,应考虑对 WRR 样片进行端面斜抛光处理,减小端面反射率。同时在芯片划片过程中应尽量保证导引波导长度等于环形谐振腔环长的一半,从而使得谐振曲线对称。并且应考虑通过设计新的波导结构或者谐振环结构减小耦合器超模损耗差异。

4 结 论

针对谐振腔耦合器超模损耗差异以及谐振腔外直波导的端面反射,利用多光束干涉叠加原理,对 WRR 的输出谱线进行了理论研究并且给出了考虑这些因素影响的谐振曲线计算公式。通过理论分析以及实验结果可以发现,腔外导引波导的端面反射和耦合器超模损耗差异是影响氮化硅 WRR 谐振特性的潜在重要因素。该分析可为今后实验中 WRR 应用提供理论参考。

参 考 文 献

[1] Ma H L, Jin Z H, Ding C, *et al.* Optimal design of

ring resonator in silica optical waveguide[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(10): 1330-1332.

马慧莲, 金仲和, 丁纯, 等. 二氧化硅光波导环形谐振腔[J]. 中国激光, 2005, 32(10): 1330-1332.

[2] Wu D N, Wu Y D, Wang Y, *et al.* Research on tunable filter based on micro-ring resonators [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0123002.

吴丹宁, 吴远大, 王玥, 等. 基于微环谐振腔的可调谐滤波器的研究[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0123002.

[3] Ma H L, Jin Z H, Ding C, *et al.* Influence of spectral linewidth of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(8): 731-734.

马慧莲, 金仲和, 丁纯, 等. 激光器线宽对光纤环形谐振腔谐振特性的影响[J]. 中国激光, 2003, 30(8): 731-734.

[4] Lu Y, Lu H W, Pu H L, *et al.* Novel Mach-Zehnder interferometric interleaver based on fiber ring resonators[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1106003.

鲁彦, 鲁怀伟, 蒲会兰, 等. 基于光纤谐振腔的新型马赫-曾德尔干涉型波长交错滤波器[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1106003.

[5] Ma H L, Bao H Q, Wang S J, *et al.* Temperature characteristic of ring resonator in polarization maintaining silica optical waveguide [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(8): 1029-1032.

- 马慧莲, 鲍慧强, 王世军, 等. 保偏 SiO₂ 光波导环形谐振腔温度特性研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(8): 1029-1032.
- [6] Bauters J F, Heck M J, John D, *et al.* Ultra-low-loss high-aspect-ratio Si₃N₄ waveguides [J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3163-3174.
- [7] Sha H J, Chen B X, Chen L, *et al.* Research of fiber-waveguide automatic alignment system [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1773-1777.
沙慧军, 陈抱雪, 陈林, 等. 光波导-光纤耦合对接自动化系统的研究[J]. 光子学报, 2005, 34(12): 1773-1777.
- [8] Youngquist R, Stokes L, Shaw H. Effects of normal mode loss in dielectric waveguide directional couplers and interferometers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983, 19(12): 1888-1896.
- [9] Li W, Wang W T, Wang L X, *et al.* Optical vector network analyzer based on single-sideband modulation and segmental measurement [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(2): 1-8.
- [10] Dai D, Wang Z, Bauters J F, *et al.* Polarization characteristics of low-loss nano-core buried optical waveguides and directional couplers [C] // 7th IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2010: 260-262.
- [11] Chen Y, Ma H, Jin Z. Resonance asymmetry induced bias errors in waveguide type optical passive resonator gyro [J]. Applied Optics, 2012, 51(13): 2373-2378.