

doi:10.3788/gzxb20134206.0631

基于绝缘硅超小微环谐振器的微波光子 相移器设计

王巍, 杨丽君, 武透, 冯其, 白晨旭, 冯世娟, 王振

(重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘要:设计了一种基于绝缘硅材料的超小微环相移器,能够在自由频谱范围内实现 2π 相移的同时相移达到最佳线性化.根据全通微环谐振器的相移特性可知,在临界耦合点时微环谐振器达到 π 的相移,在过耦合领域达到 2π 相移.分析了直波导宽度及间距两个参量,用精细度 F 表征间距,讨论了由于这两个参量变化对微环谐振器相移的影响,并且给出了设计的相移范围和相应的功率变化.实验结果表明:若采用 40 GHz 的射频信号,设计的微环相移器射频相移范围为 $0\sim 4$ rad,功率变化不到 6 dB.

关键词:绝缘硅;微环相移器;射频相移;射频功率

中图分类号:TN216

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)06-0631-6

Design of Silicon-on-insulator Ultra-small Micro-ring Resonator Microwave Photonics Phase Shifter

WANG Wei, YANG Li-jun, WU Wei, FENG Qi, BAI Chen-xu, FENG Shi-juan, WANG Zhen
(College of Electronics Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,
Chongqing 400065, China)

Abstract: A ultra-small micro-ring phase shifter based on the silicon-on-insulator (SOI) material is designed. 2π phase shift in the free spectral range and optimal linearization is achieved. According to the phase shift characteristics of the micro-ring resonator all-pass phase structure, phase shift of the micro-ring is π at the critical coupling area and 2π in the over coupling area. Two parameters (straight waveguide width and spacing) of the micro-ring are investigated which affect the phase shift. Finesse F also is used as a parameter for spacing, and micro-ring resonator' phase shift combined with the power of change is discussed. The experimental results show that the designed micro-ring phase shifter can achieve the RF phase shift of $0\sim 4$ rad, and RF power variation is less than 6 dB with a 40 GHz RF signal.

Key words: Silicon-on-insulator; Micro-ring phase shifter; Radio frequency phase shift; Radio frequency power

0 引言

微波光子相移器是微波光子学系统的重要组成部分.它在相控阵列波束形成系统,智能天线系统以及生物医学检测系统等应用中扮演着越来越重要的角色.传统的射频(Radio Frequency, RF)移相器在工作频率、带宽和相移的可调节范围等方面有着诸

多的限制.近年来,人们对采用光子元件来控制 RF 信号的相位移进行了研究,这主要是考虑到微波光子器件具有调节灵活、带宽大及重量轻等特点.之前已经报道了许多实现 RF 相移的技术,主要包括用分布反馈激光器进行波长转换^[1],采用受激布里渊散射信号处理^[2],同频混合等,但是这些实现相移的技术都非常复杂,准确度不易受控制.而上述系统

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61102075, 51075420)和重庆市电子产业发展基金资助

第一作者:王巍(1967—),教授,博士,主要研究方向为半导体光电、集成电路设计. Email: wangwei@cqupt.edu.cn

通讯作者:杨丽君(1989—),女,硕士研究生,主要研究方向为微波光子学. Email: 80promise@sina.com

收稿日期:2012-11-06;录用日期:2013-03-05

中包含了成千上万的元素,传统相移系统中器件尺寸较大,集成难度较高,实现的相移功能十分受限.微环谐振器尺寸小便于在片上集成,成本较低,日渐引起了人们的关注.

基于微环谐振器的 RF 相移器的研究包括基于连续光调制、激光源调制等.微环相移器 RF 相移范围从最开始的 90° ,到采用热光调节手段可对输入的高功率光实现 $0\sim 260^\circ$ 的相位调节,再到如今实现 360° 的调节.一直以来,在 RF 相移范围增加的同时,其功率的变化也会随之增大.因而需要设计出具有较高 Q 值也即较低 K 值的微环相移器,以期获得更大的相移范围,但高 Q 值的微环相移器会带来其它不可忽略的影响.一个 Q 值约 28 000 的微环谐振器功率变化可高达 11 dB 左右,实际应用中很难接受.近年来,对系统简化以及功率的要求越来越高.低 Q 值的微环谐振器功率变化小,相移更加线性化,在现实中更具实用性,已逐渐成为研究微环相移器的新兴方向^[3-4].

本文对基于超小微环谐振器结构的微波光子相移器进行研究,以实现微环最佳线性相移并减小功率变化,与文献^[5]从 RF 相移范围与 RF 功率变化两方面进行对比分析.

1 绝缘硅微环谐振器相移特性的理论分析

1.1 全通微环谐振器结构

全通微环谐振器由一个闭合的环与一根直波导耦合构成,其结构如图 1.

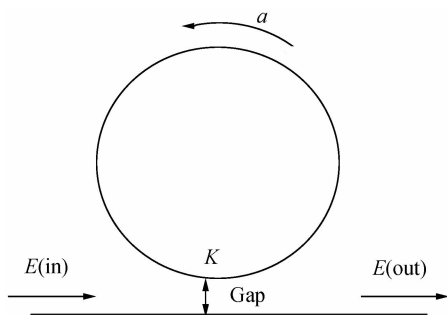


图 1 全通微环谐振器结构原理

Fig.1 Schematic of the all-pass micro-ring resonator

直波导将光耦合进环中,光在环中经历一周以后,又通过耦合领域耦合进入直波导.对单边耦合的微环谐振器,其线性传输函数可以表示为^[6]

$$T(\omega) = \frac{r - a \exp(j\varphi)}{1 - r a \exp(j\varphi)} \quad (1)$$

式中, r 是微环谐振器内耦合领域的传输常量, $a = \exp(-\alpha L/2)$ 代表了微环内的幅度传输, L 和 α 分别为微环谐振器的周长及线性损耗.由相位的定义, $\Phi(\omega) = \arctan\{\text{Im}[H(\omega)]/\text{Re}[H(\omega)]\}$, 可得到传

输光的相移为

$$\Phi = \pi + \varphi + \arctan \frac{r \sin \varphi}{a - r \cos \varphi} + \arctan \frac{a \sin \varphi}{1 - r \cos \varphi} \quad (2)$$

由式(2)可知,传输光的总相移主要受 4 个参量 (a, r, φ, R) 的影响.式中,幅度传输系数 a 可以通过测量得出.在理想无损耗情况下,耦合领域有 $k^2 + r^2 = 1$,耦合领域的系数随间距的变化而变化. $\varphi = kL$ 是微环的线性相移,与光频率有关.在半径 R 一致的情况下微环周长 L 相等. $k = 2\pi n/\lambda$ 为传播常量,可以根据需要改变 φ 使其在不同的频率上移动,且保证相位曲线形状不变.线性相移 φ 主要受有效折射率 n 的影响.

本文所设计的微环谐振器微波光子移相器采用绝缘硅 (Silicon-On-Insulator, SOI) 结构.其中,二氧化硅厚度为 $2 \mu\text{m}$,硅的厚度为 $0.22 \mu\text{m}$,微环半径为 $1.5 \mu\text{m}$.

1.2 幅度传输系数 a 的测量

本文给出了一种较为简洁且精准度较高的测量 a 的方法.图 2(a) 是以半周为单位的测量点,图 2(b) 是以四分之一周为单位的测量点.

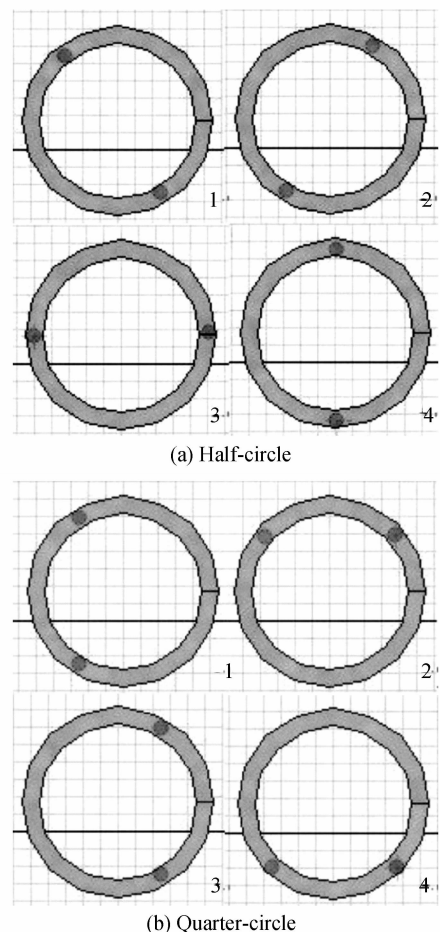


图 2 微环内传输系数 a 的测量

Fig.2 Measurement of transmission coefficient a of micro-ring resonator

通过测量微环谐振器半周以及四分之一周不同测量点的数据,得到了多个幅度系数 a 的测量值. 在实际测量过程中,图 2(a)中第 4 幅图以及图 2(b)第 2 幅图的测量值会其余同类测量值偏大,这是受到光经历最高点时谐振的影响. 通过平均计算后,得到幅度传输系数 a 值约为 0.925.

1.3 有效折射率 n

在全通型微环谐振器中,直波导宽度直接决定了有效折射率 n ^[7]. 对 TE 模式的光进行了时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)仿真,光波传输沿 Z 轴传播. 图 3 为不同直波导宽度下,有效折射率 n 的强度特性.

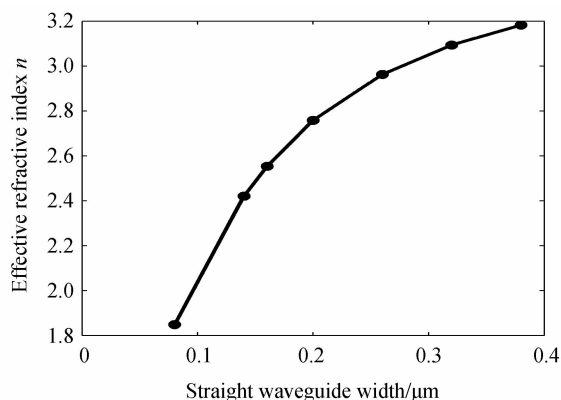


图 3 直波导宽度与有效折射率 n 的关系

Fig. 3 The width of liner waveguide vs effective refractive index

选取直波导宽度采样点的间隔为 $0.06 \mu\text{m}$. 由图 3 可见,随着直波导宽度的增加,有效折射率 n 逐渐增大,但变化曲线的斜率逐渐减小. 当直波导宽度达到 0.3 之后有效折射率 n 的变化逐渐趋于平滑.

1.4 传输系数 r

分析可知,改变微环谐振器的间距值影响耦合领域的传输系数 r . 本文通过 FDTD 仿真,保证其他参量一致的情况下,可以看出不同间距时耦合系数的强度特性,如图 4.

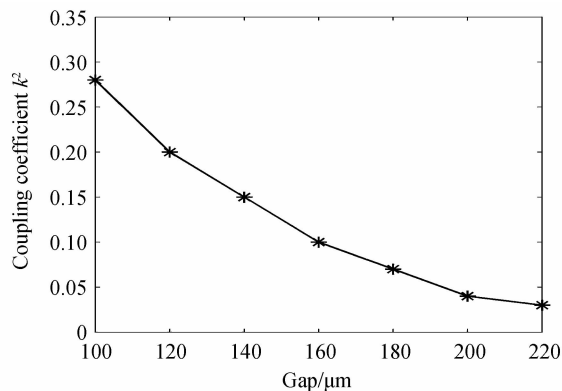


图 4 间距与耦合系数 k 的关系

Fig. 4 The spacing between waveguide vs coupling coefficient k

图 4 中,采样点分别对应间距在 0.1、0.12、0.14、0.16、0.18、0.2 时的间距. 最开始的时候曲线下降较快,后趋于平缓. 如图可知,间距越小,耦合力度越强,通过谐振进入微环内的能量也越大.

2 精细度 F 与临界耦合间距的关系

2.1 精细度 F 的理论分析

用微环谐振器的关键参量——精细度 F 设计间距. 微环的精细度 F 等于自由频谱范围(Free Spectral Range, FSR)与半高全宽的比值为

$$F = \frac{\Delta V_{\text{FSR}}}{\Delta V_{\text{FWHD}}} = \pi \frac{\sqrt{ar}}{1-ar} \xrightarrow{ra \approx 1} \frac{\pi}{1-ra} \quad (3)$$

自由光谱范围 FSR 即 $1/T$ (T 是光在中的传输时间). 半径越小,环路的周长越短,光在环里传输的时间也越少. 所以想要增加器件的 FSR 需要减小半径. 半高全宽定义为下载端谱线下降到最大值一半的频率宽度.

众所周知, Q 值与相移成正比. 品质因子 Q 表示在一个光子振动周期内,微环中存储的能量与耦合出微环以及散射损耗掉的总能量之比,谐振波长 λ_0 与 $\Delta\lambda$ 之比可定义为

$$Q = \frac{2\pi^2 R n_{\text{eff}}}{\lambda_0 k^2} \approx \frac{\lambda_m}{\Delta\lambda_{\text{FWHM}}} \approx \frac{\pi n_{\text{eff}} L}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{ar}}{1-ar} \quad (4)$$

联立式(3)、(4),可以得到^[8]

$$Q = nFL/\lambda \quad (5)$$

由式(5)可以看出 Q 值与精细度 F 成正比,则相移与精细度 F 也是成正比的.

微环谐振器幅度传输系数 a 为 1 时视为理想的无损耗器件,本文测量出幅度传输系数 a 值为 0.925,也即将文中微环考虑为有损耗器件,其谱线与延迟(也即相移)变化规律是一致的,也更符合实际应用. 对于单环而言,公式(3)中半高全宽也即延迟 3 dB 带宽,随着耦合系数 k^2 增大,延迟也会随之增大,则 F 值降低. 如图 5 所示,随着 k^2 增加, F 的

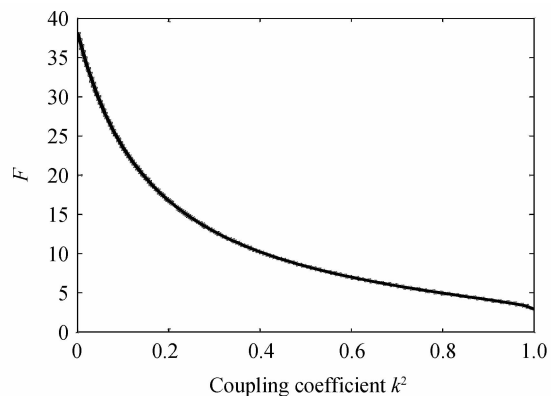


图 5 耦合系数 k^2 与精细度 F 的关系

Fig. 5 The finesse F vs coupling coefficient k^2

值减少.

由式(3)可知,随着环路损耗系数 a 增加,耦合系数 k 减小(r 增加), F 增加, r 与 F 成正比.

2.2 临界耦合间距与 F 的关系

微环谐振器在每个谐振点 $\varphi=0$. 当 $r=a$ 时微环谐振器的幅度传输降为零,这时环内的损耗与耦合损耗相等,可以说此时微环谐振器处于临界耦合. 当 $r>a$ 时,微环谐振器处于欠耦合,而当 $r<a$ 时,微环谐振器处于过耦合. 由 1.2 节可知, a 值为 0.925.

由式(3) $F=\pi/(1-ra)$,可以看出所设计的微环谐振器在临界耦合点时 F 的值约为 21.76;并且由于损耗的限制,精细度 F 的上限为 41.8. 当 F 大于 21.76 时,属于欠耦合领域;当 F 小于 21.76 时,属于过耦合领域. 由前文可知,在刚达到临界耦合点时,相位会经历一个 π 的变化,而进入过耦合领域,相位会经历 2π 的变化.

考虑到按照公式 $F=\pi/(1-ra)$ 计算 F 在临界耦合点时的值稍微偏大,本文结合式(3)没有忽略 \sqrt{ar} ,取 $\sqrt{ar}=a=0.925$. 经严格计算以后, F 在临界耦合点的值为 20.1,取 F 的值为整数 20($F=20$). 当 $F=20$ 时,可以推算出耦合系数 k^2 的值为 0.16. 图 6 展示了不同间距下耦合系数的强度.

可以看到,在间距为 $0.14\ \mu\text{m}$ 和 $0.16\ \mu\text{m}$ 时, k 值都非常接近 0.4. 但是为保证微环谐振器实现 2π 的相移功能,就必须使得设计的微环谐振器稍微超过临界耦合点,即($k<0.4$).

在间距 $0.14\ \mu\text{m}$ 时 k 值为 0.418,间距 $0.16\ \mu\text{m}$ 时 k 值约为 0.38,符合要求. 本文设计的微环谐振器间距为 $0.16\ \mu\text{m}$.

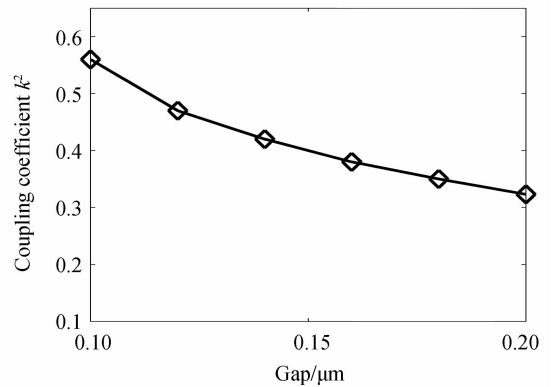


图 6 不同间距下的耦合系数
Fig. 6 The spacing vs coupling coefficient

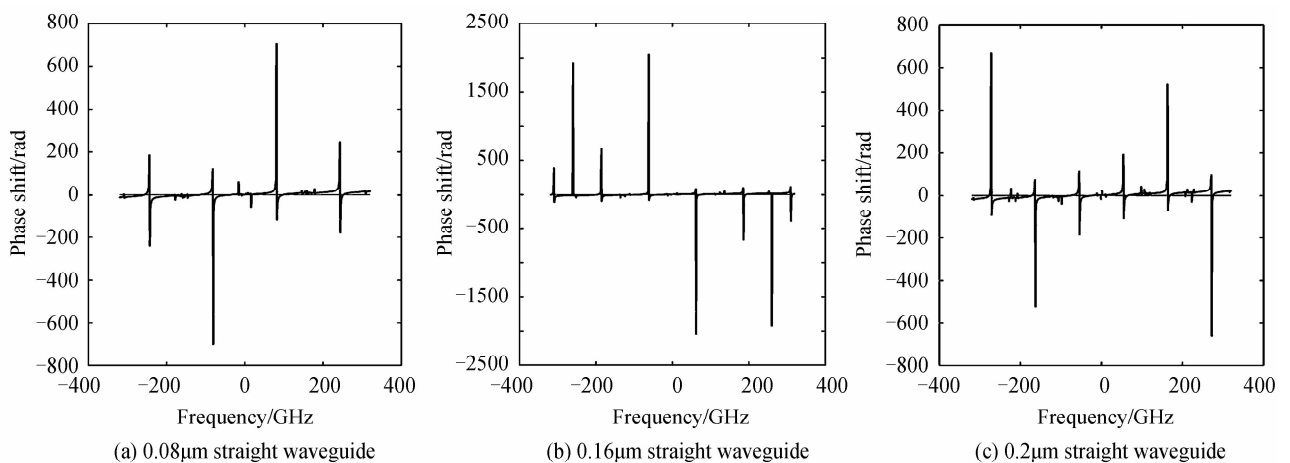
3 实验结果分析与讨论

3.1 有效折射率 n 对相移的影响

由理论分析可知,直波导宽度与有效折射率 n 成正比,并且从 $\varphi=kL$ 与 $k=2\pi n/\lambda$ 可推出, n 与相移也成正比. 所以在半径一致的情况下,以临界耦合点的相移为界,微环谐振器在欠耦合与过耦合领域,直波导宽度越大,相移变化幅度越大.

本文选取频谱范围从负的 400 GHz 到正的 400 GHz. 图 7 展示了不同直波导宽度的相移理论仿真. 本文设计的微环谐振器直波导宽度为 $0.16\ \mu\text{m}$,本文与对应的文献[5]有效折射率 n 分别为 2.553 692 16 以及 3.094.

选取较大的频谱来观察,可以看出随着直波导宽度的增加,微环谐振器的自由频谱范围变窄,相同频率范围内产生的相移数增多. 图 7(b)为本文设计的微环谐振器,因为最接近临界耦合点,所以在所有的直波导相移图中,相移最为线性化,幅度波动最小,而文献[5]的设计相位幅度波动最大.



(a) $0.08\ \mu\text{m}$ straight waveguide

(b) $0.16\ \mu\text{m}$ straight waveguide

(c) $0.2\ \mu\text{m}$ straight waveguide

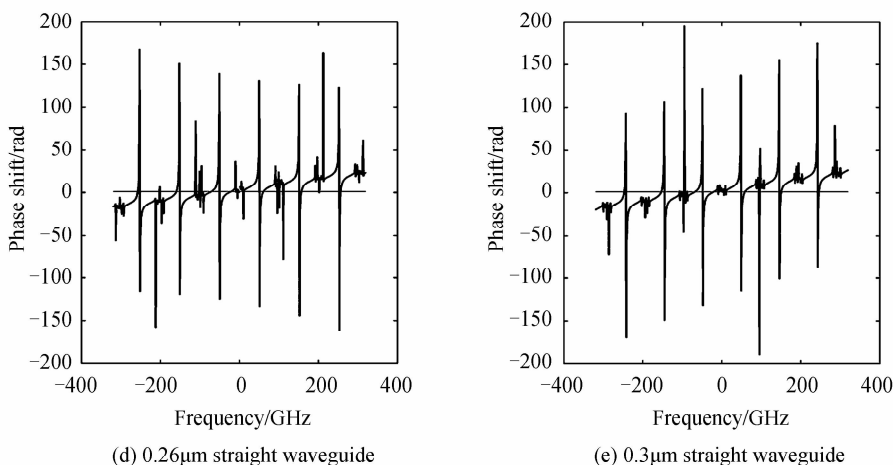


图7 不同直波导宽度的微环相移

Fig.7 The width of liner waveguide vs phase shift

3.2 传输系数 r 对相移的影响

讨论可知,间距越小耦合力度越强,传输系数 r 的值越小,即间距与 r 呈反比.在其他参量一致的情况下,由图6中不同间距值对应的不同耦合系数,由 $F = \pi / (1 - ra)$ 可计算出 0.1、0.12、0.14、0.16、0.18、0.2 时对应的精细度 F 分别为 5.3、8.9、13.2、27.8、37.7.图8以 F 为参量给出不同间距值对应的相位特性.

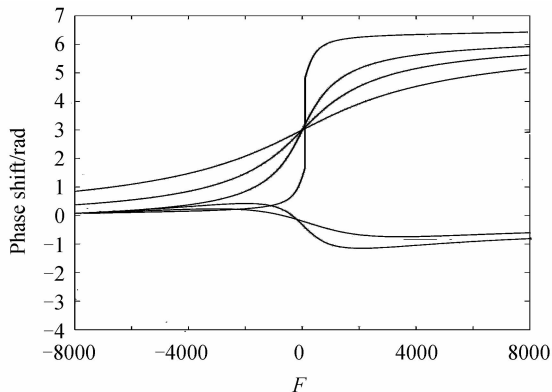


图8 不同 F 值时(不同耦合领域)相位特性

Fig.8 The finesse F vs phase shift

从图8可以看出,在欠耦合领域($F > 20$),相位在正负值之间变化,并且幅度非常小.而在过耦合领域($F < 20$),越接近临近耦合,相移曲线在谐振点附近越陡峭.这一特性在微波光子滤波器中都有很广泛的应用^[9],本文所设计的微环谐振器相移(在 $F = 20$ 时)达到了完整的 2π .仿真结果表明:本文用精细度 F 推导出的理论间距值是较为准确的,使设计的微环相移器达到了临界耦合.

3.3 RF 相移和 RF 功率的分析

RF 相移系统发展初期,受条件限制大量采用 20 GHz 的 RF 信号.现今 40 GHz 的 RF 信号使得 RF 相移范围更广,能满足一般对相位的要求而被普遍采用.

本文采用 40 GHz 的 RF 信号,用 matlab 仿真得到的 RF 相移结果如图9(a)以及相应的 RF 功率变化如图9(b).

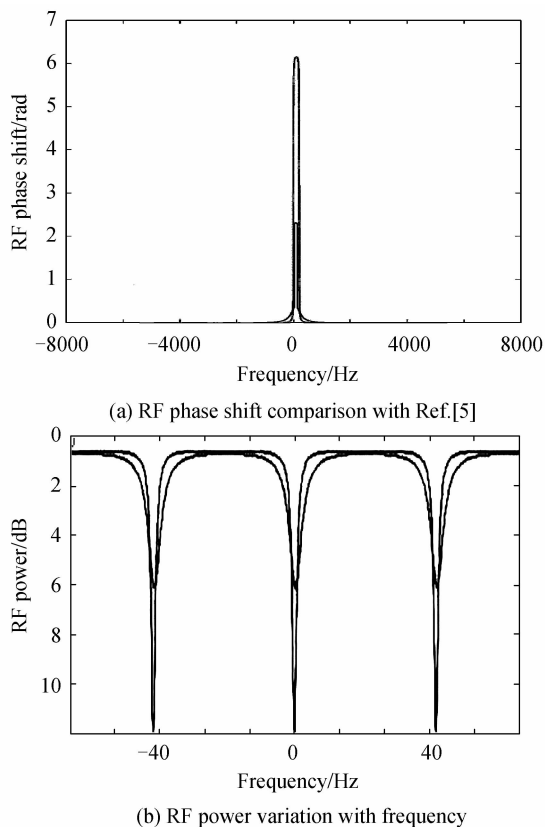


图9 RF 频率为 40GHz 时,RF 信号相位与功率的变化
Fig.9 The phase and power variation for 40GHz RF signal

本文与文献[5]中微环设计的材料,厚度都相同.文献[5]中微环环形波导宽度为 $0.46 \mu\text{m}$,直波导宽度采用 $0.32 \mu\text{m}$,间距 $0.31 \mu\text{m}$.

图9(a)中虚线和实线分别代表文献[5]以及本文设计的 RF 相移.如图可见,本文设计的微环谐振器 RF 相移范围为 $0 \sim 4 \text{ rad}$,比文献[5]中的 RF 相移范围小近 2 rad ; RF 相移占频谱宽度较大,文献[5]RF 相移最大值较本文更大,但本文相移设计明

显更加线性化. 图 9(b)中为其相应的功率变化: 文献[5]中微环谐振器的功率变化高达 12 dB, 而本文设计的微环谐振器的功率变化不到 6 dB, 不及文献[5]中的一半.

4 结论

设计了基于 SOI 超小半径的微环相移器. 环形波导宽度为 $0.3 \mu\text{m}$, 直波导宽度与波导间距都为 $0.16 \mu\text{m}$. 实验结果表明: 在半径一致的情况下, 全通结构的微环谐振器的相移主要与直波导宽度以及间距有关; 减少直波导宽度则有效折射率 n 也减小, 相应的器件所需功率降低. 通过设计微环谐振器的间距, 微环谐振器符合临界耦合条件, 在自由频谱范围内达到了 2π 相移, 自由频谱范围为 72 nm , 在相同的自由频谱范围中, 相移达到最佳线性化, RF 相移范围为 $0 \sim 4 \text{ rad}$, 同时 RF 功率变化更低.

参考文献

- [1] FISHER M R, CHUANG S L. A microwave photonic phase-shifter based on wavelength conversion in a DFB laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(6): 1714-1716.
- [2] LOAYSSA A, LAHOZ F J. Broad-band RF photonic phase shifter based on stimulated Brillouin scattering and single-sideband modulation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(1): 208-210.
- [3] CHANG Qing-jiang, LI Qiang, ZHANG Zi-yang, *et al.* A tunable broad-band photonic RF phase shifter based on a silicon microring resonator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(1): 60-62.
- [4] PU M, LIU L, XUE W, *et al.* Tunable microwave phase shifter based on silicon on insulator microring resonator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(12): 869-871.
- [5] XU Qian-fan, FATTAL D, BEAUSOLEIL R G, *et al.* $1.5 \mu\text{m}$ -radius high-Q silicon microring resonators [C]. 2008 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2008 Conference on Quantum Electronics and Laser Science (CLEO/QELS 2008), 2008, San Jose, CA, USA, 1-2.
- [6] PU M, LIU L, XUE W, *et al.* Widely tunable microwave phase shifter based on silicon-on-insulator dual-microring resonator[C]. *Optics Express*, 2010, **18**(6): 6172-6182.
- [7] CHAO C Y, GUO L J. Design and optimization of microring resonators in biochemical sensing applications [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(3): 1395-1402.
- [8] HEEBNER J E, WONG V, SCHWEINSBERG A, *et al.* Optical transmission characteristics of fiber ring resonators [J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 2004, **40**(6): 726-730.
- [9] LLORET J, SANCHO J, PU M, *et al.* Complex-coefficient microwave photonic tunable filter using slow light silicon-on-insulator-based microring resonator [C]. Microwave Photonics, 2011 International Topical Meeting on & Microwave Photonics Conference, 2011 Asia-Pacific, MWP/APMP, 2011, 421-424.
- [10] LI Qiang, CHANG Qing-jiang, LIU Fang-fei, *et al.* Optically tunable microwave-photonic phase shifter based on silicon microring resonator[C]. 34th European Conference on Optical Communication, 2008, 1-2.