

基于微环准相位匹配技术的波长转换效率研究

姜文婷, 王葵如

(北京邮电大学信息光子学与光通信研究院, 北京 100876)

摘要: 波长变换是通信光网络中的研究热点, 也是全光信号处理的重要组成部分。微环谐振腔具有尺寸小、非线性效应强、易于集成等优点, 可以充分满足全光信号处理对集成性和低功耗的要求, 因此在全光信号处理应用中具有良好的应用前景。本文研究了利用微环谐振器中的四波混频效应和自动准相位匹配技术实现的波长变换作用。我们选择硅、GaAs 和氮化硅作为波导微环的材料, 仿真分析了它们的波长转换效率以及泵浦功率、耦合系数、线性损耗等的影响。

关键词: 光纤通信; 波长转换; 准相位匹配; 微环谐振腔; 波长转换效率

中图分类号: TN913.7

Wavelength Conversion Efficiency with Quasi-phase-matching technique in the Microring

JIANG Wenting, WANG Kuiru

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: Wavelength conversion is a hot spot in the research of optical communication network, and it is also an important part of all-optical signal processing. The micro ring resonator with small size and strong nonlinear effects, easy integration, etc., can fully meet the needs of integrated optical signal processing and low power requirements, so it has good application prospect in the application of all-optical signal processing. In this paper, the effect of wavelength conversion based on four wave mixing effect and automatic quasi phase matching technique is studied. Silicon, GaAs and silicon nitride were chosen as the materials of the waveguide microring. The effects of wavelength conversion efficiency, pump power, coupling coefficient and linear loss were analyzed.

Key words: Optical fiber communication; Wavelength conversion; Quasi-phase-matching; Microring resonator; Four wave mixing

0 引言

基于波长变换是近几年光通信领域研究热点之一。在光学领域, 实现波长变换的有效手段之一就是利用微环谐振腔及光纤非线性中的四波混频效应(FWM)。微环谐振腔具有体积小、响应速度快、功耗低等优点, 是芯片级硅基光子器件的基本结构。FWM 是一个对相位敏感的参量过程, 相位匹配是影响 FWM 中信号光到闲频光转换效率的关键因素, 在波长变换的应用中, 需要足够小的相位失配才能保证波长转换的效率。减小相位失配有很多种方法, 调整波导色散特性, 减小波导损耗, 提高泵浦光强, 利用慢光效应, 及利用准相位匹配技术等。准相位匹配技术是指沿光波的传输路径、周期性地调整光波间的相对相位关系, 通过减弱或抑制参量衰减过程, 提高波长转换效率。在传统的准相位匹配技术中, 需要周期性

作者简介: 姜文婷(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 全光信号处理

通信联系人: 王葵如(1962-), 女, 教授、博导, 主要研究方向: 全光信号处理. E-mail: krwang@bupt.edu.cn

的改变相关传播区域的 Kerr 特性，使闲频光强度不至于降到零，实现这一过程通常需要采用一些异质介质。

微环在全光波长转换中有着良好的应用前景。2007 年，康奈尔大学的 Lipson 课题组利用 Si3N4 微环，实现了几 mW 超低输入功率下的高效率参量振荡^[1]。A. Pasquazi 等利用微环四波混频效应，有效地实现了 2.5Gbit/s 波长转换^[2]。

目前可用于制作微环谐振腔结构的材料主要有硅基光波导材料、III-V 族化合物半导体材料、有机聚合物，和掺杂金属氧化物的二氧化硅混合材料等。硅基材料具有很高的非线性折射率系数，和很强的光场束缚能力，因此硅基微环得到了广泛的关注。III-V 组直接带隙材料在半导体工业领域，比如半导体激光器、半导体光放大器等已有很成熟的发展，而利用 III-V 材料来实现微环近年来引起了人们极大的兴趣。聚合物材料具有低成本、加工工艺简单、方便掺杂等优点，因而聚合物微环也被人们所关注。

本文研究以硅、GaAs 和氮化硅作为波导材料的微环谐振腔中基于四波混频效应的波长变换，采用自动准相位匹配技术实现有效波长转换，仿真分析各种因素对转换效率的影响。

1 准相位匹配波长变换原理

首先以硅基波导为例阐述波长变换的原理。

在硅基波导中考虑双光子吸收和自由载流子吸收效应，假设信号光的功率远小于泵浦光，泵浦光没有饱和，且忽略高阶非线性效应。则描述四波混频波长变换的耦合模方程组为^[3]：

$$\begin{aligned} \frac{dA_{p1}}{dz} &= -\frac{1}{2}[\alpha + \alpha_{p1}^{FCA}(z)]A_{p1} + i(\gamma_0 + i\beta_T)(|A_{p1}|^2 + 2|A_{p2}|^2 + 2|A_s|^2)A_{p1} \\ &\quad + i\gamma_0 A_s^2 A_{p2}^* \exp(ikz) \\ \frac{dA_s}{dz} &= -\frac{1}{2}[\alpha + \alpha_s^{FCA}(z)]A_s + i(\gamma_0 + i\beta_T)(|A_s|^2 + 2|A_{p2}|^2 + 2|A_{p1}|^2)A_s \\ &\quad + i2\gamma_0 A_{p1} A_{p2} A_s^* \exp(ikz) \\ \frac{dA_{p2}}{dz} &= -\frac{1}{2}[\alpha + \alpha_{p2}^{FCA}(z)]A_{p2} + i(\gamma_0 + i\beta_T)(|A_{p2}|^2 + 2|A_{p1}|^2 + 2|A_s|^2)A_{p2} \\ &\quad + i\gamma_0 A_s^2 A_{p1}^* \exp(ikz) \end{aligned}$$

其中， β_{p1} 、 β_{p2} 及 β_s 是传输常数， β_T 是 TPA 系数， α 是线性损耗系数， α^{FCA} 是自由载流子浓度， $\alpha^{FCA} = 1.45 \times 10^{-17} (\lambda/1550)^2 N$ ，其中 N 为 TPA 产生的电子-空穴对的密度， λ (μm) 为波长，与泵浦强度有关。对于连续光或者长脉冲泵浦， $N = \beta_T \cdot I_p^2 \cdot \tau_{eff} / (2 \cdot h\nu)$ ，其中 $h\nu$ 为泵浦光子能量， τ_{eff} 是自由载流子寿命。当泵浦光脉冲强度为 I_p ，载流子密度为 $N \approx \beta T_0 I_p^2 / [2(1 - e^{-1/R\tau_{eff}})h\nu]$ 。

在 FWM 中，提高 FWM 效率并最终获得净增益的重要方式是改善相位匹配的性能，在双泵浦条件下，相位匹配条件为 $\kappa = \beta_{2c}(\omega_{sc}^2 - \omega_d^2) + \beta_{4c}(\omega_{sc}^4 - \omega_d^4) + \gamma_0 I_p$ 。可以看出，相位匹配条件与非线性系数、信号光和闲频光的功率、二阶与四阶色散系数及零色散波长有关，其最优值为零。当相位失配量 $\Delta\kappa = 2k_p - k_s - k_i = 0$ 时，信号光到闲频光的转换效率达到最大，称为完美相位匹配 (PPM) 过程。定义一个相干作用长度 (coherence length)， $L_{coh} = \pi / \Delta\kappa$ ，

只有在实际作用长度 $L < L_{coh}$ 时, 才会发生显著的四波混频, 满足这一条件的相位匹配称为准相位匹配 (QPM) 过程。

75 微环中的四波混频过程如图 1 所示, 频率分别为 ω_p 和 ω_s 的泵浦光和信号光从直波导一端输入, 在直波导的某一处通过微环与直波导之间的倏逝波耦合进入微环, 在其中环绕传输一周后又耦合进入直波导, 从另一端输出。输出的光波不仅含有泵浦光和信号光, 而且还存在因四波混频作用而产生的闲频光 ω_i 。为了提高非线性作用强度, 泵浦光和信号光的波长均设置在微环的谐振波长处。耦合区的传输方程为

80
$$\begin{pmatrix} A_2 \\ A_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma & i\kappa \\ i\kappa & \sigma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_3 \exp(i\kappa L) \end{pmatrix}$$

式中 κ, σ 为耦合因子, 满足 $\kappa^2 + \sigma^2 = 1$ 。

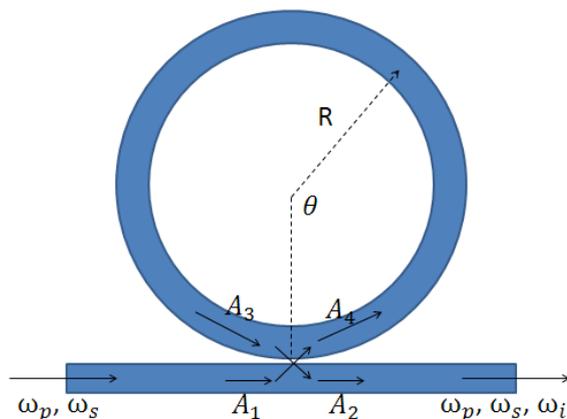


图 1 微环中的四波混频示意图

Fig.1 Schematic diagram of four-wave-mixing in Micro-Ring

85 在上述微环结构中, 非线性系数

$$\gamma = \rho_{\kappa}(\theta) \xi_{\kappa} \frac{n_2 \omega_p}{c}$$

其中 $\rho_{\kappa}(\theta) = (0.88 + 0.12 \cos^2(2\theta))$, θ 如图 1 所示。非线性系数 γ 会随着传播位置的变化而变化, 每个非线性系数从最大到最小的区域长度为

$$L_a \frac{2\pi R}{8} = \pi R / 4$$

90 其中 R 为微环半径。为了实现准相位匹配, 这个区域长度应该等于相干作用长度 L_{coh} , 经过以上公式推导得出

$$2k_p - k_s - k_i = \frac{4}{R}$$

微环半径如果满足上式, 即可达到准相位匹配的条件。这个过程不需要额外改变波导的非线性特性, 也不需要进行色散控制, 因此可称为自动准相位匹配过程。

95

2 仿真分析

微环中光场为 $E_r(t) = -j\kappa E_i(t) + rae^{j\phi} E_r(t - \tau)$, 其中 κ 和 r 表示直波导和环形波导之间的耦合及传输系数, 满足 $r^2 + \kappa^2 = 1$ 。 $a = e^{-\alpha_0 L/2}$ 是光场在微环中传输一周的损耗, α_0 是微环中的传输损耗, τ 为场在微环中传输一周的时间。 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda} nL$ 表示微环中场传输一周的相

100 位变化。直波导的输出光场满足 $E_t(t) = rE_i(t) - j\kappa a e^{j\phi} E_r(t - \tau)$ 。稳定状态下，微环传输转换方程为 $\frac{E_t}{E_r} = \frac{r - a e^{j\phi}}{1 - r a e^{j\phi}}$ 。

105 我们选择 SOI、GaAs、Si3N4 三种波导材料设计微环谐振腔以实现准相位匹配的波长变换，下面分别对其影响信号-闲频光转换效率的因素进行仿真分析。波导参数来自文献^[4-6]。硅波导的非线性折射率 $n_2 = 8 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ ，色散为 $1200 \text{ ps}/\text{nm} \cdot \text{km}$ ，有效模场面积为 $0.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ，有效模折射率为 3.37，双光子吸收系数为 $0.45 \times 10^{-11} \text{ m}/\text{W}$ 。GaAs 的非线性折射率为 $13 \times 10^{-18} \text{ cm}^2/\text{W}$ ，双光子吸收系数为 $\beta = 24.0 \text{ cm}/\text{GW}$ ，有效模场面积为 $0.5 \mu\text{m}^2$ ，有效模折射率为 3.374，自由载流子寿命为 20ps。氮化硅的有效折射率为 $n_{eff} = 1.98$ ，非线性折射率系数为 $n_2 = 2.4 \times 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{W}$ ，波导有效模场面积为 $A_{eff} = 1.15 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 。氮化硅材料具有较大的禁带宽度为 5eV，因此当入射波长较大时，
110 它的双光子效应和自由载流子效应可以忽略。

设泵浦光波长为 1540nm，泵浦功率为 40mW，信号光波长在 1490nm 到 1540nm 之间，信号功率为 1mW。转换效率的仿真结果由图 2-图 5 给出。

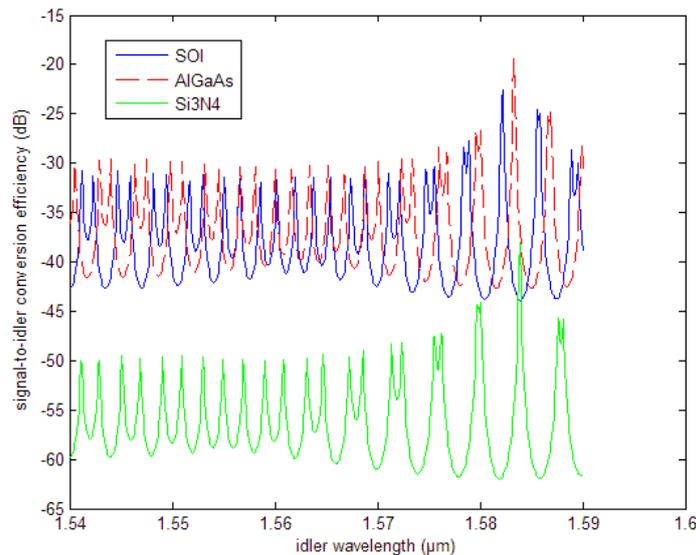


图 2 三种材料的微环中信号-闲频光的转换效率

115 Fig.2 Conversion efficiency of signal-idler frequency

图 2 为三种材料的微环中闲频光的转换效率曲线。从图中可以看到，氮化硅的转换效率要比另外两种材料低 20dB 左右，而 GaAs 要比硅基波导的转换效率高 3dB 左右。

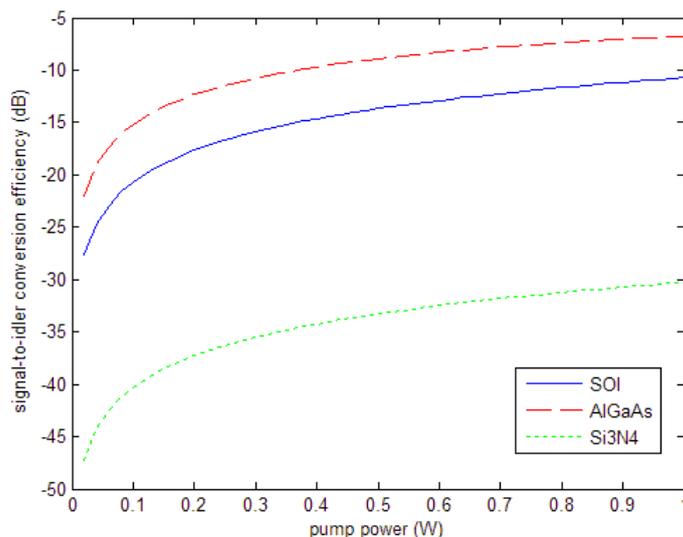


图3 转换效率随泵浦功率的变化

Fig.3 Variation of conversion efficiency with pump power

120

图3给出的是三种材料波导微环波长变换转换效率随泵浦功率的变化。泵浦功率变化范围在0-1W之间。由图3可看出，三种材料的转换效率均随泵浦功率增加而增加，增长幅度一致。将三种材料的效果作对比，GaAs的转换效率最大，比硅大3dB左右，比氮化硅大20dB左右。这个结果与图2是一致的。

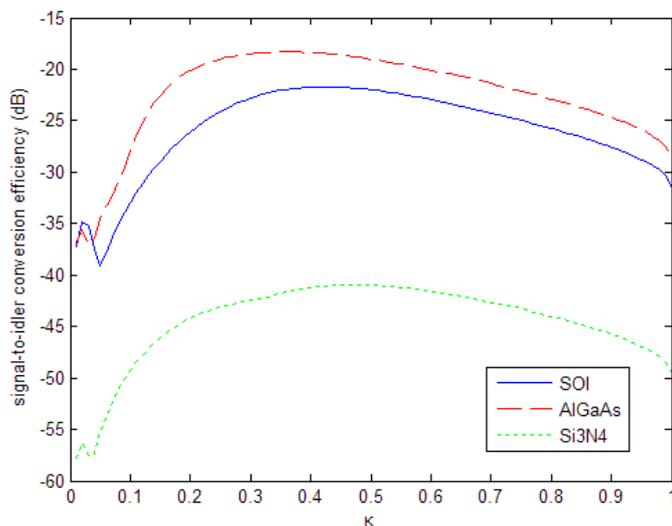


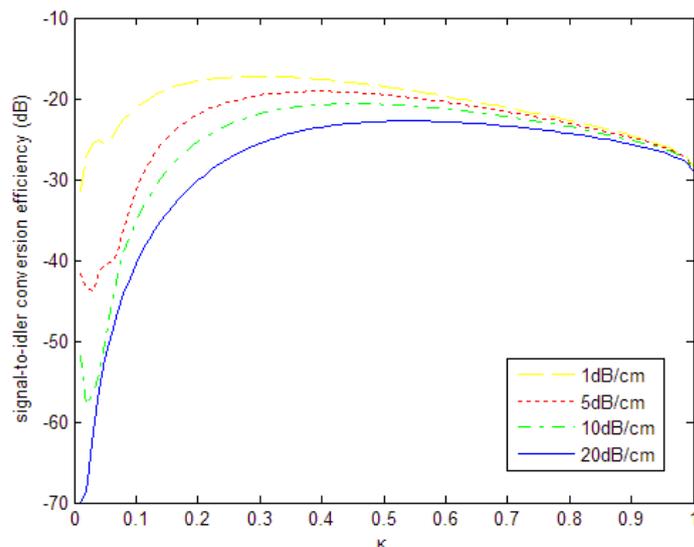
图4 转换效率随耦合系数κ值变化

Fig.4 Variation of conversion efficiency with coupling coefficient

125

图4是在相同线性损耗下三种材料的微环转换效率随耦合系数κ值的变化，取线性损耗系数 $\alpha=3\text{dB/cm}$ 。可以发现，对三种材料来说，随着耦合系数增加，信号-闲频光转换效率都是先增大后减小。对于不同的材料，当线性损耗相同时，转换效率的最高点对应的耦合系数不同，在线性损耗为 3dB/cm 时，GaAs、硅和 Si3N4 微环分别在耦合系数 $\kappa=0.3$ 、 $\kappa=0.4$ 和 $\kappa=0.5$ 附近取得最大转换效率，也就是说，当泵浦光功率达到足够大时，GaAs波导微环准相位匹配波长转换效率对耦合系数的要求更低一些。

130



135

图 5 不同线性损耗下信号-闲频光转换效率随耦合系数 κ 值变化

Fig.5 Variation of signal-idler conversion efficiency with coupling coefficients under different linear loss

140

图 5 为在同一波导材料 GaAs 中, 不同线性损耗系数下, 信号到闲频光转换效率随耦合系数的变化。取线性损耗系数为 1dB/cm、5 dB/cm、10 dB/cm 和 20 dB/cm。可以看到当损耗系数增大时, 转换效率曲线向下移动, 转换效率降低。对于不同线性损耗系数, 转换效率的最高点对应的耦合系数也不同, 随着线性损耗系数的增大, 转换效率最高点对应的耦合系数也增大, 意味着当线性损耗变大, 系统对耦合系数的要求也越来越高。

根据以上的仿真结果, 我们可以得出结论: 用 GaAs 材料的微环做准相位匹配的波长变换, 相比硅和氮化硅来说, 转换效率较高, 即更为有效。

3 结论

145

通信光网络及其相关技术在飞速发展, 给全光信号处理技术带来了生机与挑战, 波长变换技术在全光信号处理中有重要的作用, 基于微环结构和半导体材料的非线性效应实现自动准相位匹配技术为提高波长转换效率提供了新的对策和思路。本文针对微环自动准相位匹配技术, 选取了三种可制作波导微环的材料(硅、GaAs、氮化硅)进行研究, 仿真分析、比较了它们的波长转换效率, 以及影响转换效率的几种因素, 得出了 GaAs 材料具有较高转换效率的结果, 对利用自动准相位匹配技术实现波长转换有很好的指导意义。

150

[参考文献] (References)

155

- [1] A. C. Turner, M. A. Foster, A. L. Gaeta, et al. Ultra-low power parametric frequency conversion in a silicon microring resonator [J]. Opt. Express, 2008, 16:4881-4887.
- [2] Pasquazil A., Ahmad R., Rochette M., et al. All-optical wavelength conversion in an integrated ring resonator[J]. Optics Express, 2010, 18(4):3858-3863.
- [3] 李温静. 硅基参量放大及射频宽带接入网光源技术的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [4] S. Mikroulis, A. Bogris, E. Roditi, D. Syvridis. Investigation of an All-Optical Wavelength Converter With Reshaping Properties Based on Four-Wave Mixing in Passive Microring Resonators [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004: 2743-2748.
- [5] P. P. Absil, J. V. Hryniewicz, B. E. Little, P. S. Cho, R. A. Wilson, L. G. Joneckis, P. T. Ho. Wavelength conversion in GaAs micro-ring resonators [J]. Optics Letters, 2000: 554-556.
- [6] A. Godbole, P. P. Dali, V. Janyani, T. Tanabe, G. Singh. All Optical Scalable Logic Gates Using Si3N4

160

Microring Resonators [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016: 5900308.