

激光与光电子学进展

MEH-PPV Slot 波导实现高带宽波长转换

贺锋涛^{1*}, 靳晨卓¹, 蔡旻辉¹, 李碧丽², 杨伟¹, 张建磊¹¹西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121;²中国船舶重工集团第 705 研究所水下信息与控制重点实验室, 陕西 西安 710077

摘要 基于四波混频效应的全光波长转换技术在解决全光信号处理问题中至关重要。波长转换是通过波长转换器将受阻的数据转换到其它空闲波长上进行输出,可解决资源分配不足、通信质量降低的问题。硅基波导及光子晶体光纤等都可用于波长转换,但对于短距离通信,硅基波导更具优势。构建了一种新型 MEH-PPV 硅基光波导,通过有限元法对其进行了色散调控,分析了该波导在最佳结构下的相位失配特性及非线性系数的变化特性。结合该波导的传输损耗、相位失配特性以及非线性系数,建立了基于泵浦简并条件下的四波混频数学模型,分析了不同信号光功率、泵浦光功率以及波导长度下的波长转换效果。结果表明:采用 MEH-PPV 材料作为夹层的 slot 硅基波导,最大波长转换效率约为 16 dB,其转换带宽为 400 nm 左右,在全光信号处理领域具有广泛的应用前景。

关键词 光学器件; 波长转换; 全光信号处理; 四波混频; slot 硅基波导; MEH-PPV

中图分类号 O437.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1723001

Realization of High-Band Wavelength Conversion Using MEH-PPV Slot Waveguide

He Fengtao^{1*}, Jin Chenzhuo¹, Cai Minhui¹, Li Bili², Yang Yi¹, Zhang Jianlei¹¹School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China;²Underwater Information and Control Key Laboratory, China Shipbuilding Group 705 Institute, Xi'an 710077, Shaanxi, China

Abstract The all-optical wavelength conversion technology based on four-wave mixing is important for all-optical signal processing. Wavelength conversion is the process of converting blocked data to other idle wavelengths for output through a wavelength converter, which can solve the problems of insufficient resource allocation and reduced communication quality. Both silicon-based waveguides and photonic crystal fibers can be used for wavelength conversion; however, for short distance communication, silicon-based waveguides are more advantageous. In this study, a novel MEH-PPV (1-methoxy-4-(2-ethylhexyloxy)-p-phenylenevinylene) silicon-based optical waveguide is constructed, and its dispersion is controlled using the finite element method. The phase mismatch characteristics and nonlinear coefficients of the waveguide under an optimal structure are analyzed. A four-wave mixing mathematical model based on pump degeneracy is established by combining the transmission loss, phase mismatch characteristics, and nonlinear coefficients of the waveguide. The wavelength conversion effects under different signal and pump powers and waveguide lengths are also analyzed. The maximum wavelength conversion efficiency of the slot silicon-based waveguide with the MEH-PPV material as a sandwich is approximately 16 dB, and its conversion bandwidth is approximately 400 nm, revealing its wide scope of application in the field of all-optical signal processing.

Key words optical devices; wavelength conversion; all-optical signal processing; four-wave mixing; slot silicon-based waveguide; MEH-PPV

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-18; 录用日期: 2021-12-28

通信作者: hefengtao@xupt.edu.cn

1 引言

随着科技的进步及全球化趋势的发展,社会的交互愈频繁,为了满足不断增长的信息交互需求,科研人员展开了大量的研究。目前,基于电信波段通信系统的信道容量正逐渐接近其理论极限,新技术的发展将是满足日益增长的高速数据传输需求的关键^[1]。激光的出现使全光信号处理领域迅速发展起来,并在推动通信领域的发展中扮演着至关重要的角色。近年来,全光信号处理已应用于参量放大、低噪声或无噪声放大、信号再生、格式转换、二维图像放大、相位敏感参量放大、光参量振荡、波长转换^[2-9]等多个研究领域。其中,全光波长转换技术是全光信号处理中重要的一环,对于传统 O-E-O 波长转换技术来说,需将光信号进行光-电-光两次转换,这样一来,原光信号的部分相位、幅度信息会丢失,无法实现光信号透明传输,而全光波长转换技术无需进行光信号到电信号的转换,避免了信息的丢失,且该技术可避免网络阻塞,提高通信速率^[10],提高网络配置的灵活性。目前,在光通信领域中,短距离波长转换主要依赖于光波导实现^[11],且随着硅光子学^[12-14]的飞速发展,人们对光波导中非线性效应的研究愈发深入^[15],大量硅基波导陆续问世,受到了研究者的广泛关注^[16]。氮化硅(Si_3N_4)^[17-18]、对甲苯磺酸及氢化非晶硅等材料具有很强的非线性,都可用于全光波长转换,但限制波长转换效率及转换带宽的因素极多,需要考虑波导的结构、线性传输损耗、光学材料自身所携带的非线性传输损耗(例如双光子吸收效应^[19])以及非线性克尔系数等因素。因此,在硅基波导中掺入合适的非线性材料及其结构设计成为了提高波长转换效率的关键技术之一^[20-22]。

Wang 等^[23]设计了基于 MEH-PPV(1-methoxy-4-(2-ethylhexyloxy)-p-phenylenevinylene)材料的波导,并在此基础上研究了全光逻辑门领域的应用,实现了多模全光 16 进制基本运算,他们提出,MEH-PPV 具有较高的非线性,其克尔系数高达 $2 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{W}$,传输 TE 模式的线性传输损耗为 4 dB/cm,相对较小。这表明 MEH-PPV 材料在制作硅基波导以及在全光信号处理领域具有很好的应用前景。本文基于 MEH-PPV 材料,构建了一种 slot 结构硅基波导,其在通信波段内具有高非线性系数。通过有限元法仿真了波导横截面的光场分布效果,分析了其色散特性、相位失配特性,并在色散特性和相位匹配特性最优的条件下采用添加域探针的方法分析了其非线性光学特性。同时,结合优化后的 slot 结构硅基波导模型建立了泵浦简并条件下的四波混频数学模型,研究了不同信号光功率、泵浦光功率以及波导长度下的波长转换效果。

2 MEH-PPV 波导设计及色散特性

2.1 MEH-PPV 波导结构

MEH-PPV 折射率约为 1.6 左右^[23],与 Si_3N_4 、PTS、Hydex 等同属于低折射率材料,因此,其结构设计可采用 slot 型。图 1 所示为波导横截面结构示意图。该波导采用 SiO_2 作为包层,MEH-PPV 材料作为夹层,基底材料为 Si 和 SiO_2 。其中 W 表示 Si 层和 MEH-PPV 夹层的高度, H 表示 Si 层的宽度, h 表示 MEH-PPV 夹层的宽度。

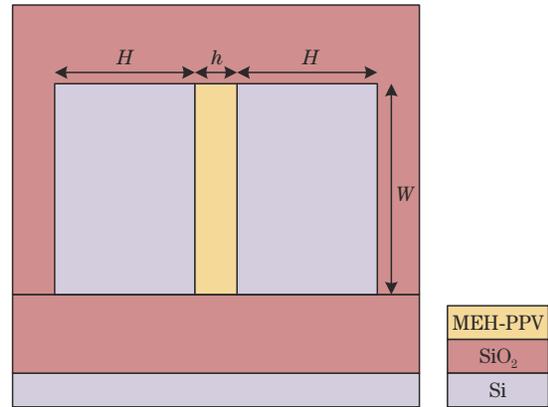


图 1 槽型波导结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of slot waveguide

图 2 为有限元法模拟的 MEH-PPV 波导 TE_0 模式下光场分布示意图,其中入射光波长为 1550 nm。从图中可以看出,光场被很好地限制在 MEH-PPV 材料区域中。

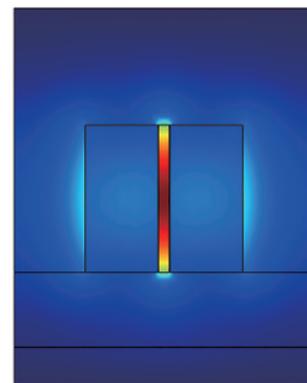


图 2 1550 nm 波长处 TE_0 模式模场分布

Fig. 2 Mode field distribution of TE_0 mode at wavelength of 1550 nm

2.2 色散特性

光信号在硅基波导中传输时,色散特性会导致相位匹配特性降低,影响四波混频效应的发生,进而改变波长转换效率。另一方面,它会引起脉冲展宽且影响光通信的质量。因此,对色散特性的分析尤为重要,它可用波导的模式传播函数 $\beta(\omega)$ 给出,其泰勒级数展开式可表示为^[24]

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots, \quad (1)$$

式中: $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 为波导的第 1, 2, \dots, n 阶色散系数; $n(\omega)$ 为波导的有效模式折射率, 波长一定时, 随波导尺寸变化; β_0 为传播常数, 可以表示为

$$\beta_0 = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda}, \quad (2)$$

式中: λ 为入射光波长; n_{eff} 为给定波长条件下的有效模式折射率。

本文用来表征色散特性的参量包括二阶色散系数 β_2 和色散参量 D , 其特性曲线平坦程度决定了线性相位失配特性, 可由下式表示^[24]:

$$\beta_2 = \frac{d^2 \beta}{d\omega^2}, \quad (3)$$

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2. \quad (4)$$

在不同结构参数影响下, 色散曲线及色散参量会呈现出不同的变化特性。如图 3 所示, 波导结构参数会引起零色散点位置及色散平坦度的改变。

图 3(a) 反映了 Si 层、MEH-PPV 夹层高度 W 与波导二阶色散特性曲线随波长的变化关系。随着 W 逐渐增加, 其色散特性曲线平坦程度随之下降。Si 层宽度 H 对二阶色散变化范围影响极大, 由图 3(c) 可以看出, 当 $H=185 \text{ nm}$ 时, 出现了两个零色散点, 之后随着 H 增加时, 色散曲线平坦程度下降, 且零色散波长逐渐偏离 1550 nm 。当 MEH-PPV 夹层的宽度 h 从 20 nm 增加至 40 nm 时, 其结果如图 3(e) 所示, 零色散波长从 $1.70 \mu\text{m}$ 移至 $1.38 \mu\text{m}$ 。图 3(b)、3(d)、3(f) 反映了色散参量随波导各尺寸参数的变化, 分别与上述图 3(a)、3(c)、3(e) 对应。通过调整各尺寸参数, 最终得到最佳波导尺寸为 $W=390 \text{ nm}, H=195 \text{ nm}, h=30 \text{ nm}$, 此时二阶色散曲线的零色散波长在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近, 且相对平坦。

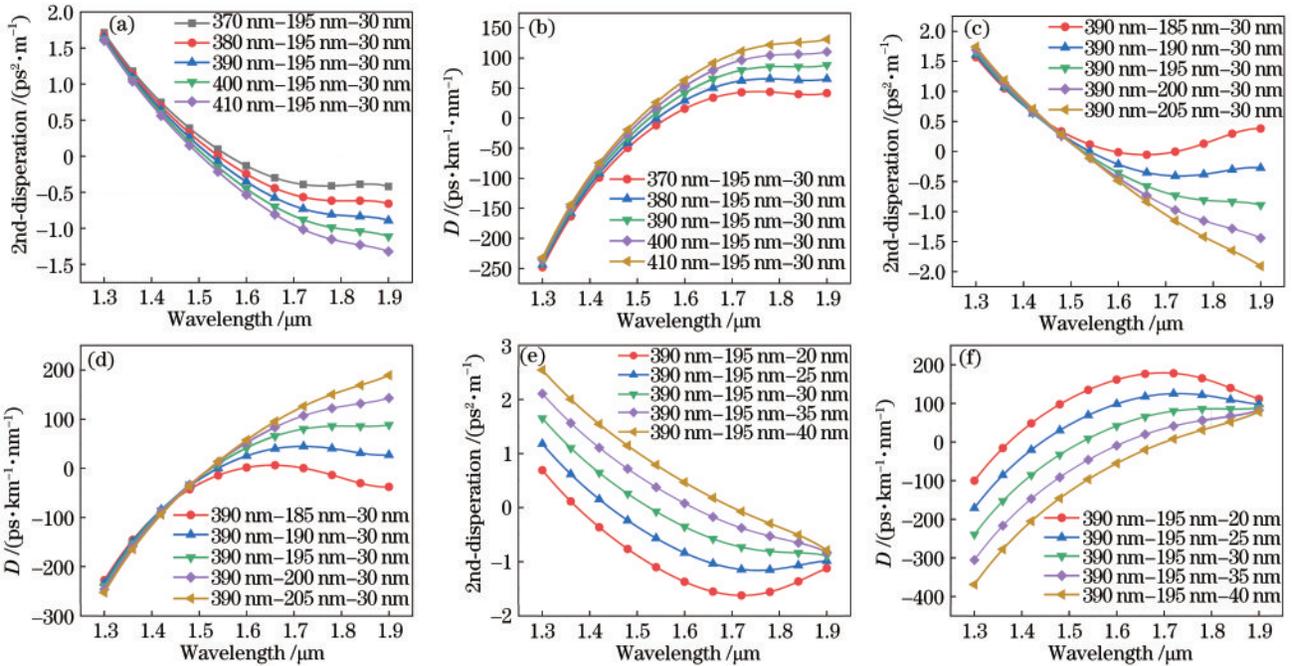


图 3 不同结构参数下的二阶色散及色散参量随波长的变化。不同夹层高度下的 (a) 二阶色散和 (b) 色散参量; 不同 Si 层宽度下的 (c) 二阶色散和 (d) 色散参量; 不同 MEH-PPV 夹层宽度下的 (e) 二阶色散和 (f) 色散参量

Fig. 3 Variation of second-order dispersion and dispersion parameters under different structural parameters with wavelength. (a) Second-order dispersion and (b) dispersion parameters at different interlayer heights; (c) second-order dispersion and (d) dispersion parameters under different silicon layer widths; (e) second-order dispersion and (f) dispersion parameters at different MEH-PPV interlayer widths

2.3 相位失配特性

仅考虑泵浦简并的条件下, 线性相位失配量满足^[25]:

$$\Delta k = 2k_p - k_s - k_i, \quad (5)$$

式中, k_s, k_p 和 k_i 分别为信号光、泵浦光和闲频光的波矢。当相位失配 $\Delta k = 0$ 时, 波长转换效率最大。在泵浦简并条件下各光波频率间的关系为^[25]

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (6)$$

式中, ω_s, ω_p 和 ω_i 分别为信号光、泵浦光和闲频光的角频率。相位失配主要由色散和克尔效应共同作用引起, 故当相位失配等于 0 时, 才会发生显著的四波混频效应。实际上, 相位失配只能无限趋近于 0。总相位失配由下式决定^[26]:

$$k = \Delta k + 2\gamma_p p_{\text{pump}}, \quad (7)$$

式中: γ_p 为泵浦光的非线性系数; p_{pump} 为泵浦光的功率。总相位失配, 即在线性相位失配中叠加非线性相位

失配的影响。对其进行研究时,由于泵浦光功率数值大于某范围时,会使总相位失配过大,进而降低四波混频波长转换效率,故将泵浦光功率控制在 100~400 mW,其变化如图 4 所示,线性相位失配和总相位失配随着信号光变化,平坦的线性相位失配曲线可以使得波长转换效率更高。随着泵浦光功率的增加,总相位失配也随之增大。取泵浦光功率为 300 mW,此时总相位失配在一个合适的范围内。

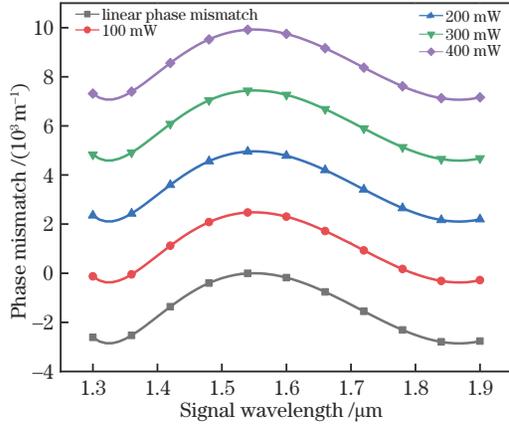


图 4 线性相位失配和总相位失配

Fig. 4 Linear phase mismatch and total phase mismatch

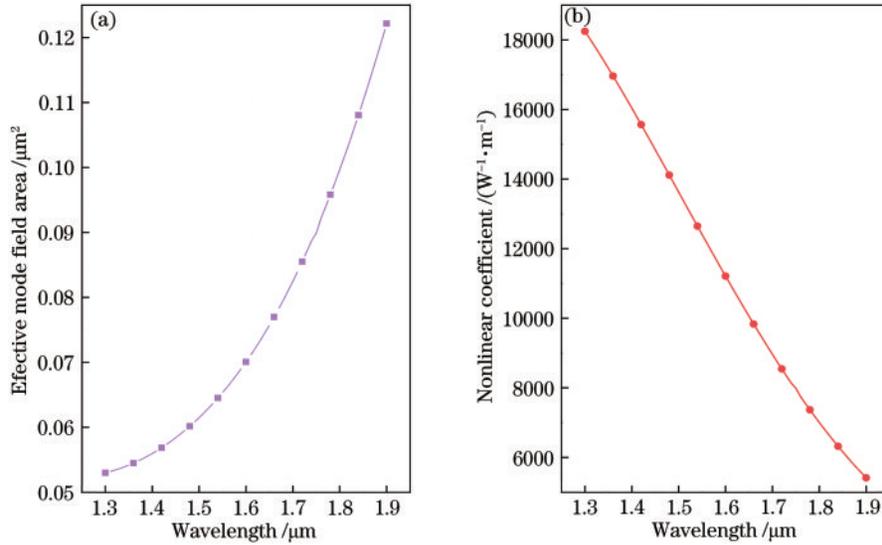


图 5 有效模场面积及非线性系数随波长的变化。(a)有效模场面积;(b)非线性系数

Fig. 5 Variation of effective mode field area and nonlinear coefficient with wavelength. (a) Effective mode field area; (b) nonlinear coefficient

3 分析与讨论

仅考虑泵浦简并条件下基于四波混频效应的数学

模型,主要由线性传输损耗、四波混频、交叉相位调制及自相位调制项组成。信号光、泵浦光和闲频光的光场振幅分别为 A_s 、 A_p 和 A_i 可由下列耦合波方程组表示^[25]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(x, y)|^4 dx dy}, \quad (8)$$

式中, $F(x, y)$ 为模分布函数。在相同的光功率下,有效模场面积较小的波导中,光强会更大,且受到外界的干扰会更小。故在设计波导时,其有效模场面积要尽可能小。而非线性系数是基于有效模场面积、非线性克尔系数 (γ) 及对应波长变化的,如下式所示^[24]:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (9)$$

式中,非线性克尔系数是由波导所使用的夹层材料确定的,上文有提及。有效模场面积及非线性系数皆可通过仿真得出,其结果如图 5 所示。随着入射光波长增加,有效模场面积逐渐增大,根据式(9),非线性系数与其成反比,故非线性系数随入射光波长的增加而降低。当入射信号光波长为 1550 nm 时,有效模场面积 A_{eff} 达到了 $0.06 \mu\text{m}^2$, 同时非线性系数 γ 高达 $12000 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

$$\begin{cases} \frac{dA_p}{dz} = -\frac{1}{2} \alpha_p A_p + i\gamma_p (|A_p|^2 + 2|A_s|^2 + 2|A_i|^2) A_p + 2i\gamma_p A_s A_i A_p^* \exp(i\Delta kz) \\ \frac{dA_s}{dz} = -\frac{1}{2} \alpha_s A_s + i\gamma_s (|A_s|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_i|^2) A_s + i\gamma_s A_p^2 A_i^* \exp(-i\Delta kz) \\ \frac{dA_i}{dz} = -\frac{1}{2} \alpha_i A_i + i\gamma_i (|A_i|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_s|^2) A_i + i\gamma_i A_p^2 A_s^* \exp(-i\Delta kz) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: α_p 、 α_s 和 α_i 分别为 3 束光波的线性传输损耗, 均为 4 dB/cm^[23]; γ_p 、 γ_s 和 γ_i 分别为波导中 3 束光波的非线性系数; z 为沿波导长度方向的传输距离。上述数值均可由图 5 给出。某一波长下转换效率可用 η 表示, 如下式所示:

$$\eta = 10 \log \frac{P_{\text{idler}}^{\text{out}}}{P_{\text{signal}}^{\text{in}}}, \quad (11)$$

式中: $P_{\text{signal}}^{\text{in}}$ 为入射信号光功率; $P_{\text{idler}}^{\text{out}}$ 为出射闲频光功率。

当泵浦光波长为 1550 nm 时, 其波长转换效率曲线如图 6 所示。随着波导长度增加, 转换效率呈非线性变化, 上升至峰值后逐渐降低, 如此往复, 且峰值转换效率依次降低。这是由于光波在波导中传输时, 四波混频及其逆效应不断重复发生, 光信号的能量在信号波和闲频波间相互转换并受到线性传输损耗影响的结果, 这与光在波导中传输时的能量守恒定律相吻合。

图 7 为不同信号光功率、泵浦光功率以及波导长度下的波长转换效率。图 7(a) 为泵浦光功率 300 mW, 波导长度 3 mm 下不同信号光功率的波长转换效率, 可以看出信号光功率由 1 mW 增加至 10 mW 时, 转换效率无明显变化趋势, 表明转换效率对信号光功率的变化不敏感。信号光为 5 mW, 波导长度为 3 mm 时, 不同泵浦光功率下波长转换效率的变化特性如图 7(b) 所示, 可以看出泵浦光功率增加至 100 mW 时, 波长转换效率及带宽大幅增加, 表明转换效率对泵浦光功率较为敏感。这是因为只有当泵浦光功率达到一定数值时, 才能更好地产生四波混频效应。但泵浦光功率过大时, 总相位失配会随之变大, 从而影响四波混频效应

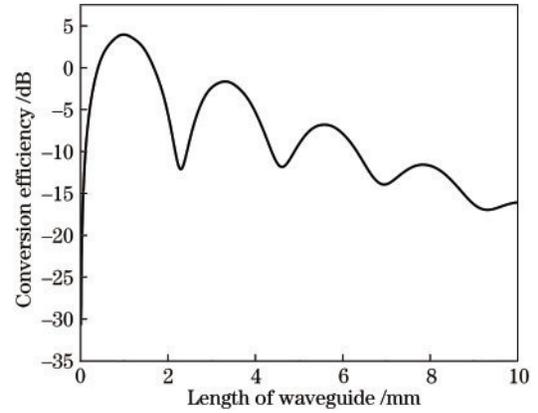


图 6 泵浦光波长为 1550 nm 时的转换效率曲线图

Fig. 6 Conversion efficiency curve when pump wavelength is 1550 nm

的产生。因此, 想要获得高转换效率及带宽, 可在一定范围内提高泵浦光功率。信号光功率为 5 mW, 泵浦光功率为 300 mW, 波导长度范围为 1~5 mm 时, 其转换效率如图 7(c) 所示。随着波导长度增加, 转换效率峰值随之提高。这是因为波导长度较短时, 四波混频效应占主导, 能量从信号光流向闲频光, 但该长度并未达到四波混频及其逆效应的临界点 (即峰值转换效率)。然而, 当波导长度达到 5 mm 时, 转换效率明显下降, 表明在该长度时已过临界点, 四波混频效应减弱, 其逆效应增强。因此, 可通过选择合适的波导长度达到最优转换效率。

综上所述, 当信号光功率为 5 mW, 泵浦光功率为 300 mW, 波导长度为 3 mm 时, 具有最佳的波长转换效率及带宽。

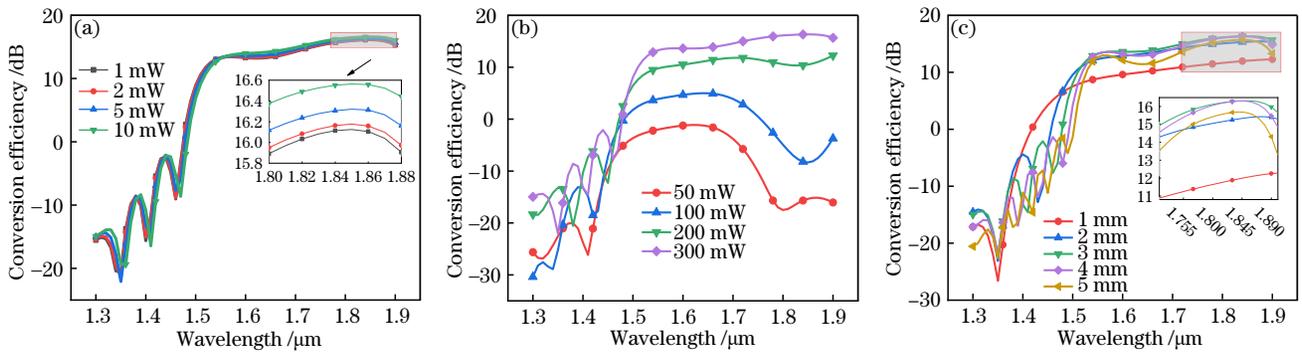


图 7 在最佳波导尺寸下, 不同 (a) 信号光功率、(b) 泵浦光功率以及 (c) 波导长度下波长转换效率变化曲线

Fig. 7 Variation curves of wavelength conversion efficiency under different (a) signal optical powers, (b) pump optical powers, and (c) waveguide lengths under optimal waveguide size

4 结 论

基于 MEH-PPV 非线性材料构建了 slot 硅基波导, 并通过优化其结构参数使波导尺寸达到最佳, 得到相对平坦的色散曲线。MEH-PPV 材料具有良好的非线性光学特性, 其克尔系数高达 $2 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$, 且线性传输损耗相对较小。结合该材料, 构建了 slot 结

构硅基波导, 其中包层为 SiO_2 , 基底为 SiO_2 和 Si, 夹层为 MEH-PPV。通过采用有限元法优化波导结构参数进行色散调控可使其达到最佳尺寸, 即使用 Matlab 软件仿真得到相对平坦的色散曲线。在最佳尺寸下, 该波导在 1300~1900 nm 波段内, 可达到 400 nm 色散平坦度, 且具有良好的相位匹配特性, 非线性系数在该波段内最高可达 $18000 \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。最后, 建立了泵浦简

并条件下的四波混频数学模型,求解并调节波导长度以及信号光、泵浦光的输入功率,实现了约 16 dB 的转换效率和 400 nm 左右的转换带宽,在全光信号处理领域具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Ma H, Yang H T, Tang B, et al. Passive devices at 2 μm wavelength on 200 nm CMOS-compatible silicon photonics platform[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(7): 071301.
- [2] 钱俊宇, 彭宇杰, 李妍妍, 等. 中红外超强超短激光研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(8): 20210456.
Qian J Y, Peng Y J, Li Y Y, et al. Research progress of mid-infrared ultra-intense and ultrashort laser(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20210456.
- [3] Tong Z, Radic S. Low-noise optical amplification and signal processing in parametric devices[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(3): 318.
- [4] Li L, Patki P G, Kwon Y B, et al. All-optical regenerator of multi-channel signals[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 884.
- [5] Cui J B, Ji Y F, Lu G W, et al. Phase-sensitive amplifier-based optical conversion for direct detection of complex modulation format to bridge long-haul transmissions and short-reach interconnects[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2349-2365.
- [6] Corzo N V, Marino A M, Jones K M, et al. Noiseless optical amplifier operating on hundreds of spatial modes [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(4): 043602.
- [7] Zhao P, Kakarla R, Karlsson M, et al. Enhanced analog-optical link performance with noiseless phase-sensitive fiber optical parametric amplifiers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23534-23544.
- [8] 尉鹏飞, 张永昶, 张静, 等. 三镜直腔结构 MgO:PPLN 高效连续光参量振荡器[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 45-50.
Yu P F, Zhang Y C, Zhang J, et al. Efficient continuous-wave MgO:PPLN optical parametric oscillator with three-mirror linear cavity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 45-50.
- [9] Guo K, Lin L, Christensen J B, et al. Broadband wavelength conversion in a silicon vertical-dual-slot waveguide[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32964-32971.
- [10] Yoo S J B. Wavelength conversion technologies for WDM network applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(6): 955-966.
- [11] 陈鸿基. 基于石墨烯-硅基有机混合波导的相位敏感放大器的特性研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
Chen H J. Characteristics of phase sensitive amplifier based on graphene-silicon-based organic hybrid waveguide [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.
- [12] 邹艳慧, 王艺蒙, 张小雪, 等. 硅-有机复合集成电光调制器的优化与制备[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2138-2150.
Zou Y H, Wang Y M, Zhang X X, et al. Optimal design and preparation of silicon-organic hybrid integrated electro-optic modulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2138-2150.
- [13] Rahim A, Hermans A, Wohlfeil B, et al. Taking silicon photonics modulators to a higher performance level: state-of-the-art and a review of new technologies[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(2): 024003.
- [14] Soref R. The past, present, and future of silicon photonics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics and Quantum Electronics*, 2006, 12(6): 1678-1687.
- [15] 王莹. 基于硅基波导的全光波长转换研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
Wang Y. Study on all-optical wavelength conversion based on silicon waveguide[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [16] Jalali B, Raghunathan V, Dimitropoulos D, et al. Raman-based silicon photonics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(3): 412-421.
- [17] 范智斌, 陈泽茗, 周鑫, 等. 氮化硅光子器件与应用研究进展[J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 998-1018.
Fan Z B, Chen Z M, Zhou X, et al. Recent advances in silicon nitride-based photonic devices and applications[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 998-1018.
- [18] Hu X, Wu D Y, Zhang H G, et al. High-speed and high-power germanium photodetector with a lateral silicon nitride waveguide[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 749-756.
- [19] 顾兵, 胡月球, 闻博. 矢量光场激发三阶非线性光学效应的研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(12): 3788/IRLA20201050.
Gu B, Hu Y Q, Wen B. Research progress of third-order nonlinear optical effects excited by vectorial light fields (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 3788/IRLA20201050.
- [20] Zhang L, Lin Q, Yue Y, et al. Silicon waveguide with four zero-dispersion wavelengths and its application in on-chip octave-spanning supercontinuum generation[J]. *Optics Express*, 2012, 20(2): 1685-1690.
- [21] Apiratikul P, Rossi A M, Murphy T E. Nonlinearities in porous silicon optical waveguides at 1550 nm[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3396-3406.
- [22] Narayanan K, Preble S F. Optical nonlinearities in hydrogenated-amorphous silicon waveguides[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 8998-9005.
- [23] Wang Y H, Yang H F, Dong W C, et al. Highly nonlinear organic-silicon slot waveguide for ultrafast multimode all-optical logic operations[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(6): 20164076.
- [24] Chen Z H, Liu H J, Wang Z L, et al. Phase-sensitive amplification of a QPSK signal using a dispersion engineered silicon-graphene oxide hybrid waveguide[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(7): 1801-1807.
- [25] Hui Z Q, Zhang L X, Wang L R, et al. Dispersion engineering of a As_2Se_3 -based strip/slot hybrid waveguide for mid-infrared broadband wavelength conversion[J]. *Modern Physics Letters B*, 2016, 30(28): 1650336.
- [26] Wu D, Shen L, Ren H N, et al. Four-wave mixing-based wavelength conversion and parametric amplification in submicron silicon core fibers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(2): 20018557.