

引用格式: WEN Jin, HE Chenyao, QIN Weijun, et al. Numerical Study of Broadband Wavelength Conversion Based on InP/ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ Strip-loaded Waveguide[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):1019003

文进,何晨瑶,秦韦俊,等. 基于 InP/ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 加载条状波导的宽带波长转换数值研究[J]. 光子学报, 2022, 51(10): 1019003

基于 InP/ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 加载条状波导的 宽带波长转换数值研究

文进^{1,2},何晨瑶¹,秦韦俊¹,孙伟¹,梁伯植¹,熊科宇¹,张辉¹,武政委¹,
于慧敏¹,王倩¹

(1 西安石油大学 理学院,西安 710065)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,西安 710119)

摘 要: III-V 族半导体波导平台在实现主动和被动器件单片集成上有自身的优势,同时基于 III-V 族材料的波长转换器可以通过非线性效应扩展波长范围。设计了一种基于 InP/ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 半导体波导平台的加载条状波导,并研究了基于该波导的有效波长转换。通过完美匹配层边界条件下的频域有限元仿真法分析了该波导最佳结构的 TE 模有效模式面积、非线性系数、有效模式折射率、波导损耗和波导色散。优化 InP/ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 加载条状波导的色散,使其满足零相位失配条件,实现了 3 dB 带宽为 35 nm 的波长转换,最高转换效率为 -26.7 dB。同时,还分析了掺杂系数 y 、泵浦功率、泵浦波长、波导长度等因素对波长转换中转换带宽和转换效率的影响。InP/ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 加载条状波导展现了优良的波长转换性能,可为全光波长转换的实现提供设计参考。

关键词: 非线性光学;集成光学;InP/ $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$;波长转换;四波混频

中图分类号:O437.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225110.1019003

0 引言

近年来非线性集成光学器件在全光信号处理方面展现出了巨大的潜力,人们对其进行了大量的研究工作^[1-3]。非线性集成光学器件一般采用硅^[4]、III-V 族^[5]、硫系玻璃^[6]等材料平台。硅有非常成熟的低成本制造平台,但其是间接带隙半导体材料,发光效率非常低^[7],需要与其他材料混合集成,如:在硅衬底上集成 III-V 激光器和放大器实现集成光路^[8-9]。 As_2Se_3 硫系玻璃材料的线性和非线性损耗较低,在众多材料中脱颖而出^[10-11],但它的折射率无法在一定范围内调整,不利于全光信号处理的灵活性。各种具有不同带隙波长的三元和四元 III-V 族化合物可以形成一组能够覆盖从紫外到红外的整个光谱窗口的非线性光子材料。III-V 族材料可以通过改变不同材料的组分,在一定的范围内改变折射率,提高定制集成光学器件的灵活性^[12-14]。III-V 族半导体平台可以使有源和无源集成光学器件组合在同一材料平台上,这可以通过细致的设计和先进的制造方法来实现,例如;多层外延和垂直锥化^[15]。III-V 族半导体波导具有高非线性系数,通过选择适合的材料组成和工作波长可以实现最小的非线性吸收^[16-18]。最近的研究表明,III-V 族半导体材料的载流子寿命可以降低至 0.42 ps^[19],这可以减少通信波段的非线性损耗,具有进行有效波长转换的潜力。

研究人员对基于 III-V 族半导体平台的非线性效应等进行了深入的研究。2011 年,DOLGALEVA K 等报道了 AlGaAs 波导中的非线性光学作用,证明了非线性相移高达 6π 的宽带自相位调制效应(Self-phase Modulation, SPM),其中信号光/闲频光的转换效率高达 10 dB^[20]。2014 年,APIRATIKUL P 等报道了在非

基金项目: 国家自然科学基金(No.61505160),陕西省创新能力支撑计划青年科技新星(No.2018KJXX-042),陕西省自然科学基金基础研究计划(No.2019JM-084),瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放课题(No.SKLST202108),西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划(No.YCS20211075)

第一作者(通讯作者): 文进(1984—),男,副教授,博士,主要研究方向为超快非线性光学。Email:wenjinf@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2022-08-15; **录用日期:** 2022-10-20

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

线性 AlGaAs 波导中提升连续光四波混频转换效率的结果,通过等离子体辅助光致抗蚀剂回流的应用来减少亚平方微米模态面积波导的侧壁粗糙度,进而提高连续光四波混频转换效率和带宽^[21]。AlGaAs 波导在波长转换中,转换效率值比较高,但转换带宽小。2017年,SAEID S 等提出了基于 InGaAsP 和 AlGaAsSb 等 III-V 族半导体材料非线性波导的设计,III-V 族半导体波导的非线性光学性质为片上非线性光子学带来了希望^[22]。2018年,SAEID S 等报道了 InP/InGaAsP 波导中三阶非线性光学效应的相关研究结果,主要进行了自相位调制、四波混频和非线性损耗测量研究^[23]。2020年,WEN Jin 等报道了在脊型 InP/InGaAsP 波导实现了中转换带宽超过 40 nm,最高转换效率为 -26.3 dB 的波长转换^[24]。上述研究结果表明:只要工作波长选择在双光子吸收窗口之外,InGaAsP 波导作为一种非线性光子器件平台具有很大的潜力。

本文基于四波混频效应在 InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 加载条状波导中实现了高效的宽带波长转换,该波导可以直接与 InGaAsP 激光光源单片集成,降低耦合损耗。通过有限元仿真了波导横截面的 TE 模光场分布,优化了色散特性等非线性光学特性,结合优化后的 InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 加载条状波导建立了泵浦简并条件下的四波混频耦合方程,通过龙格库塔法求解耦合方程组,得到波长转换器的转换效率和转换带宽。在 5 mm 长的 InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 加载条状波导上实现了 3 dB 带宽为 35 nm 的宽带波长转换,最高转换效率为 -26.7 dB。同时,还分析了掺杂系数 y 等因素对 InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 加载条状波导波长转换的影响。为 InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 波长转换器提供了更多选择。

1 波导设计与数值模拟

InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 加载条状波导在通信波段具有良好的限制能力,能够将光波限制在导光层内。InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} ($0 \leq y \leq 1, x = 0.466y$) 的理论折射率^[25]如图 1。

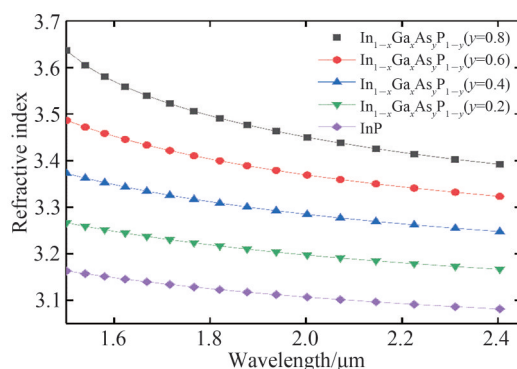


图 1 In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 的理论折射率与波长和掺杂系数 y 的关系曲线

Fig. 1 The theoretical refractive index of In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} as a function of wavelength and doping coefficient y

从图 1 可以看出,随着掺杂系数 y 的增大,In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 的理论折射率随之增大,这是由于 InP 上掺杂的高折射率 GaAs 引起的。InP 在 1 550 nm 的折射率为 3.17,In_{0.91}Ga_{0.09}As_{0.2}P_{0.8} 在 1 550 nm 处的折射率为 3.25,In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2} 在 1 550 nm 处的折射率为 3.58。

加载条状波导的结构示意如图 2,将该波导的结构和材料参数总结为表 1。该加载条状波导总共分为三层,波导的上部为上包层,上包层的材料为 InP,宽度为 4 μm ,厚度 $h_1 = 1 \mu\text{m}$,通过对上包层两侧进行深度 $h_2 = 0.9 \mu\text{m}$ 的刻蚀,形成宽度 $w = 1.7 \mu\text{m}$, $h_2 = 0.9 \mu\text{m}$ 的加载条。波导的中部为导光层,导光层材料为 In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2},导光层的宽度为 4 μm ,厚度 $h = 0.3 \mu\text{m}$ 。波导的下部为掩埋层,掩埋层的材料为 InP,掩埋层的宽度为 4 μm ,掩埋层的高度为 5 μm 。在 $\lambda = 1 550 \text{ nm}$ 时,InP 的折射率为 3.17,In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2} 的折射率为 3.58,因此, $\lambda = 1 550 \text{ nm}$ 时波导的折射率差值为 $\Delta n = 0.41$,使波导具有高限制性。从制作角度来说,这种波导结构简单、刻蚀深度浅、容易实现。

使用标准的光刻和刻蚀工艺制作光波导。首先,通过金属有机化学气相沉积生长晶片,目标刻蚀深度为 0.9 μm InP。因此,需要一个硬掩模,利用等离子体增强化学气相沉积技术在晶片上涂覆二氧化硅。通过电子束蒸发在二氧化硅表面沉积一层铬层,在电子束曝光机上完成带有波导的镀膜晶片的图案化,使用倍

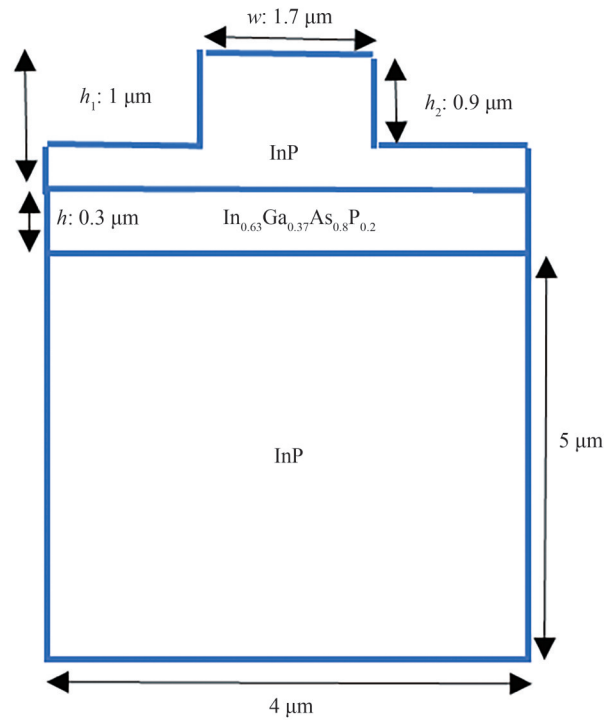


图2 InP/In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2}加载条状波导几何结构示意图
Fig. 2 Geometry schematic of InP/In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2} strip-loaded waveguide

表1 加载条状波导的几何参数和材料参数

Table1 Geometric and material parameters of strip-loaded waveguides

	Composition	Thickness/ μm	E_g/eV	λ_g/nm	n
Upper layer	InP	1	1.34	925	3.17
Guiding layer	In _{0.63} Ga _{0.37} As _{0.8} P _{0.2}	0.3	0.85	1 459	3.58
Burial layer	InP	5	1.34	925	3.17

半硅氧烷(HSQ)作为电子束抗蚀剂,在图案化和显影后,使用HSQ掩模通过感应耦合等离子体反应离子刻蚀将图案转移到铬层中。接下来,进行二氧化硅层的刻蚀,并将波导图案转移到二氧化硅中。最后,利用二氧化硅掩模将波导图转移到InP层上。

通过COMSOL仿真软件完美匹配边界条件下的有限元仿真法(Finite Element Method,FEM)分析了 $w=1.7\ \mu\text{m}$, $h=0.3\ \mu\text{m}$, $h_2=0.9\ \mu\text{m}$, $h_1=1\ \mu\text{m}$,光波导导光层为In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2}的TE模,光场在1.5~1.7 μm 的TE模演化如图3。模场主要分布在导光层In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2}中,几乎没有泄露到上包层或者掩埋层,该加载条状波导具有良好的束缚性。在1.5~1.7 μm 波段,随着波长的红移,波导的有效模式面积 A_{eff} 逐渐增大。

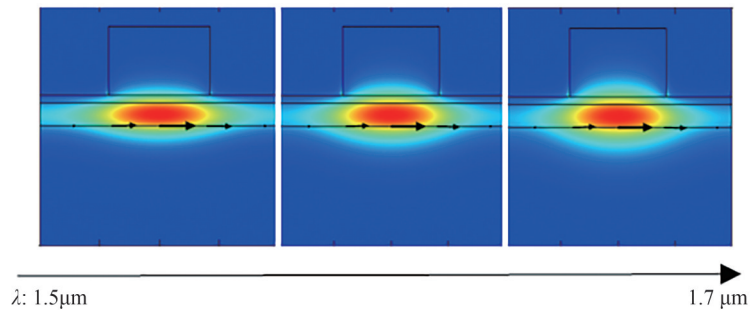


图3 当 $w=1.7\ \mu\text{m}$, $h=0.3\ \mu\text{m}$, $h_2=0.9\ \mu\text{m}$, $h_1=1\ \mu\text{m}$ 时,InP/In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2}加载条状波导在波长1.5~1.7 μm 的TE模强度分布演化
Fig. 3 When $w=1.7\ \mu\text{m}$, $h=0.3\ \mu\text{m}$, $h_2=0.9\ \mu\text{m}$, $h_1=1\ \mu\text{m}$, the TE mode intensity distribution of InP/In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2} strip-loaded waveguide at the wavelength 1.5~1.7 μm

波导的有效折射率是波导中的一个重要参数,波导的有效折射率是光在介质中传播单位长度时相位延迟的量,是一个复数,实部表示模式折射率 n_{eff} ,通过 n_{eff} 可以计算波导的色散,进而进行色散调控。从图4可以看出加载条状波导导光层 $\text{InP}/\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ 厚度 h 从200 nm增加到500 nm,有效模式折射率 n_{eff} 在波长1.5 μm 到1.7 μm 有一定幅度的增加。虚部表示波导结构的理论损耗,波导的导光层厚度 h 在200~500 nm时,波长在1.5 μm 到1.7 μm 内,理论损耗都接近于0。

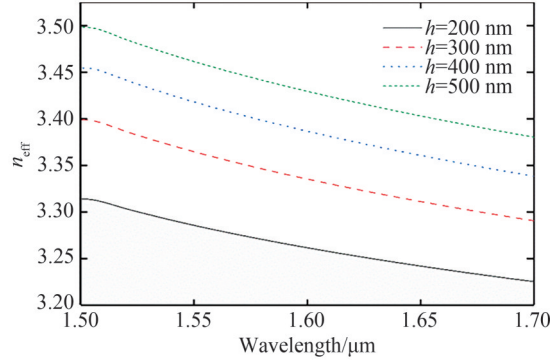


图4 当 $w=1.7 \mu\text{m}$, $h_2=0.9 \mu\text{m}$, $h_1=1 \mu\text{m}$ 时,加载条状波导 $\text{InP}/\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ 导光层厚度 h 从200~500 nm的模式折射率 n_{eff}
Fig. 4 When $w=1.7 \mu\text{m}$, $h_2=0.9 \mu\text{m}$, $h_1=1 \mu\text{m}$, the mode refractive index n_{eff} diagram of the strip-loaded waveguide with guide layers $\text{InP}/\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ thickness h from 200 nm to 500 nm

对加载条状波导进行色散调控,模拟计算得出有效模式折射率 n_{eff} ,代入 $\beta=2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 中,计算得到一阶色散,在通过 $\beta_m=d^m\beta/d\omega^m$ 可以计算出各阶色散。用数值方法计算了加载条状波导 $\text{InP}/\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ 导光层厚度 h 在200 nm到500 nm的二阶色散系数 β_2 和四阶色散系数 β_4 。从图5(a)可以看出二阶色散系数 β_2 在波长1.5 μm 附近和1.7 μm 附近随着导光层厚度 h 的增大,二阶色散曲线斜率随之增大;同时,随着导光层厚度的增加,二阶色散 β_2 的零色散点红移,当导光层厚度 $h=300 \text{ nm}$ 时,零色散波长为1.53 μm 。从图5(b)可以看出四阶色散系数 β_4 在波长1.5 μm 到1.7 μm 随着导光层厚度 h 的增大,四阶色散曲线斜率随之增大,四阶色散的绝对值小于 $0.2 \text{ ps}^4/\text{m}$ 。四阶色散的零色散波长为1.6 μm ,在波长1.6 μm 处,四阶色散值由负值转变为正值。综合考虑波导色散等因素,加载条状波导 $\text{InP}/\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ 的各项参数如表1。

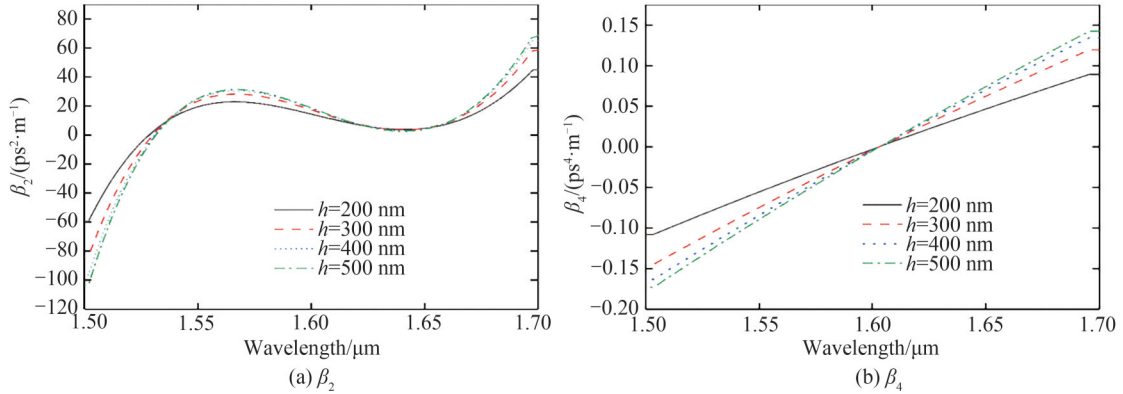


图5 当 $w=1.7 \mu\text{m}$, $h_2=0.9 \mu\text{m}$, $h_1=1 \mu\text{m}$ 时,加载条状波导 $\text{InP}/\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ 导光层厚度 h 从200~500 nm的二阶色散系数 β_2 和四阶色散系数 β_4
Fig. 5 When $w=1.7 \mu\text{m}$, $h_2=0.9 \mu\text{m}$, $h_1=1 \mu\text{m}$, the second-order dispersion coefficient β_2 and fourth-order dispersion coefficient β_4 the strip-loaded waveguide $\text{InP}/\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ with guide layers thickness h from 200 nm to 500 nm

在非线性波长转换中,波导的非线性系数是影响非线性相互作用强度的重要因素,波导的非线性系数 γ 取决于材料的非线性折射率 n_2 和有效模式面积 A_{eff} ,具体表达式为

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{\text{eff}}} \quad (1)$$

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

式中, λ_0 为光波长, $E(x, y)$ 表征模场分布函数。图6为加载条状波导有效模场面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随波长的变化曲线, 从图3和图6可以看出, 模场主要分布在导光层 In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2}, 基本没有泄漏到上包层或掩埋层。在波长 1.5 μm 到 1.7 μm 的范围内随着波长的红移, 加载条状波导的 TE 模的有效模场面积 A_{eff} 随之增大, 在波长 1.5 μm 的 A_{eff} 最小为 1.23 μm^2 , 在波长 1.7 μm 的 A_{eff} 最大为 1.43 μm^2 。非线性系数 γ 的变化趋势与 A_{eff} 相反, 随着波长的红移非线性系数 γ 随之减小, 在波长 1.5 μm 的 γ 最大为 74.9 $\text{m}^{-1}\text{W}^{-1}$, 在波长 1.7 μm 的 γ 最小为 56.78 $\text{m}^{-1}\text{W}^{-1}$ 。

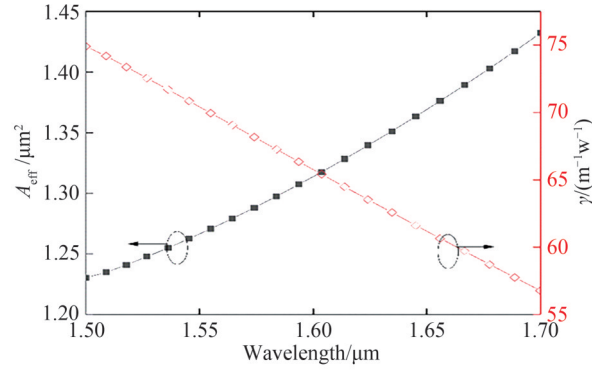


图6 当 $w=1.7 \mu\text{m}$, $h=0.3 \mu\text{m}$, $h_2=0.9 \mu\text{m}$, $h_1=1 \mu\text{m}$ 时, InP/In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2} 加载条状波导有效模场面积 A_{eff} 和非线性系数 γ 随波长的变化
Fig. 6 When $w=1.7 \mu\text{m}$, $h=0.3 \mu\text{m}$, $h_2=0.9 \mu\text{m}$, $h_1=1 \mu\text{m}$, the effective mode field area A_{eff} and nonlinear coefficient γ of strip-loaded waveguides InP/In_{0.63}Ga_{0.37}As_{0.8}P_{0.2} vary with wavelength

当满足相位匹配条件时, 泵浦光 λ_p 和信号光 λ_s 一起注入 InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 加载条状波导时, 可以产生有效的简并四波混频效应, 低频边带的斯托克斯带为信号带, 高频边带的反斯托克斯带为闲频带。图7为泵浦波长对应的输入信号波长转换为对应闲频波长的关系曲线。

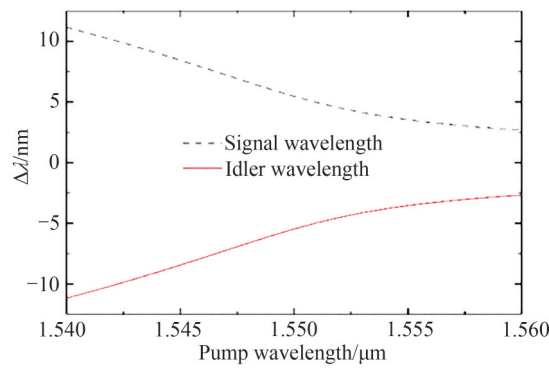


图7 泵浦波长对应的输入信号波长转换为对应闲频波长的关系曲线
Fig. 7 The input signal wavelength corresponding to the pump wavelength is converted into the relation curve corresponding to the idler frequency wavelength

考虑简并四波混频条件, 基于 InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} ($0 \leq y \leq 1, x=0.466y$) 光波导平台的波长转换数值模型可表示为^[24]

$$\frac{dA_p}{dz} = -\frac{1}{2} \left[\alpha + \frac{\beta_{\text{TPA}}}{A_{\text{eff}}} (|A_p|^2 + 2|A_s|^2 + 2|A_i|^2) \right] A_p + i\gamma_p (|A_p|^2 + 2|A_s|^2 + 2|A_i|^2) A_p + 2i\gamma_p A_s A_i A_p^* \exp(i\Delta kz) \quad (3)$$

$$\frac{dA_s}{dz} = -\frac{1}{2} \left[\alpha + \frac{\beta_{\text{TPA}}}{A_{\text{eff}}} (|A_s|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_i|^2) \right] A_s + i\gamma_s (|A_s|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_i|^2) A_s + 2i\gamma_s A_p^2 A_i^* \exp(-i\Delta k z) \quad (4)$$

$$\frac{dA_i}{dz} = -\frac{1}{2} \left[\alpha + \frac{\beta_{\text{TPA}}}{A_{\text{eff}}} (|A_i|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_s|^2) \right] A_i + i\gamma_i (|A_i|^2 + 2|A_p|^2 + 2|A_s|^2) A_i + 2i\gamma_i A_p^2 A_s^* \exp(-i\Delta k z) \quad (5)$$

式中, α 是线性传播损耗, A_p, A_s, A_i 分别是泵浦光、信号光、闲频光的振幅, z 是沿波导的传播距离, β_{TPA} 是双光子吸收系数。重点研究了基于 $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 波导的波长转换的转换效率和带宽, 数值模拟中使用的泵浦是连续波, 考虑自相位调制和交叉相位调制的影响, 给出了简并泵浦条件下的相位失配, 可表示为

$$\Delta k = 2\gamma_p P - \Delta k_{\text{linear}} \quad (6)$$

式中, P 是泵浦功率, γ_p 参考式(1), $\Delta k_{\text{linear}} = 2k_p - k_s - k_i$, 其中 k_p, k_s, k_i 分别为泵浦光、信号光、闲频光的传播常数。考虑到四阶色散效应, 给出线性相位失配

$$\Delta k_{\text{linear}} = -\beta_2 \Omega^2 - \frac{1}{12} \beta_4 \Omega^4 \quad (7)$$

式中, β_2 和 β_4 是二阶色散系数和四阶色散系数, Ω 是泵浦光和信号光之间的频率差。通过求解非线性耦合方程, 可以获得转换效率和带宽。这里, 主要关注波长转换的转换带宽和效率, 转换效率 CE 可以定义为

$$\text{CE}_0 = \frac{P_i^{\text{out}}}{P_s^{\text{in}}} \quad (8)$$

$$\text{CE} = 10 \log_{10}(\text{CE}_0) \quad (9)$$

式中, P_i^{out} 是输出闲频功率, P_s^{in} 是输入信号功率。

2 结果与讨论

加载条状波导波长转换的数值结果, 通过用龙格库塔法解式(3)~(5)耦合振幅方程得到波长转换主要数值结果转换效率和转换带宽。在数值模拟时取泵浦功率为 100 mW, 加载条状波导的长度取 5 mm 线性损耗 $\alpha = 0.5 \text{ dB/cm}$, 双光子吸收系数 $\beta_{\text{TPA}} = 1 \times 10^{-12} \text{ m/W}$, 克尔系数 $n_2 = 2.2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ 。

图 8 是加载条状波导导光层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 的掺杂系数 y 从 0.2 到 0.8 的相位失配曲线和转换效率图。图 8(a) 相位匹配曲线变化显著, 在波长 1.53 μm 到 1.59 μm 都满足零相位失配条件, 这意味着在这个波段可以进行波长转换。波长转换的数值结果如图 8(b), 在此数值模拟中泵浦波长为 1 550 nm, 泵浦功率为 100 mW, 输入信号功率为 10 mW, 闲频光功率为 0, 信号波长范围为 1.5~1.65 μm , 从图中可以看出掺杂系数从 0.2 到 0.8 转换效率的峰值为 -26.7 dB, 在掺杂系数 $y=0.2$ 时 3 dB 带宽最大为 35 nm, $y=0.4$ 时 3 dB 带宽为 33 nm, $y=0.6$ 时 3 dB 带宽为 21 nm, $y=0.8$ 时 3 dB 带宽为 15 nm。当在 InP 中掺杂 GaAs 时, 随着掺杂

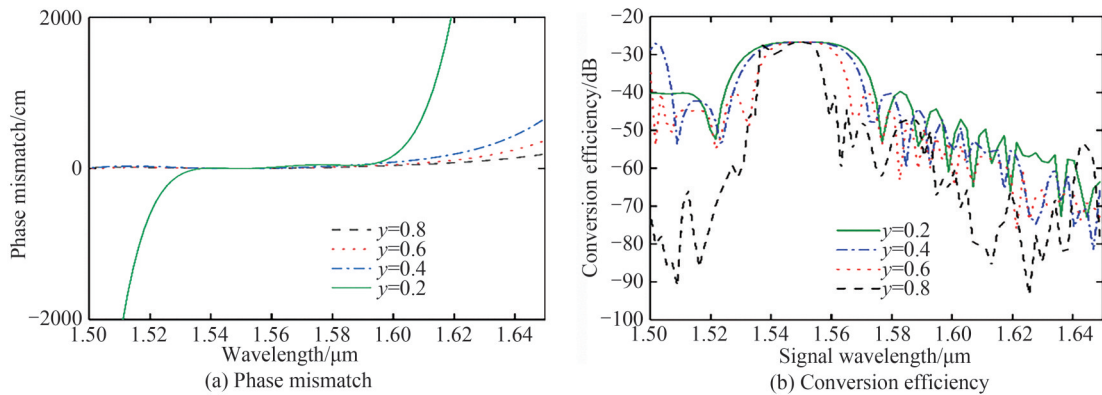


图 8 泵浦波长为 1 550 nm, 泵浦功率为 100 mW 时, 加载条状波导导光层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 掺杂系数 y 从 0.2 到 0.8 的相位失配曲线和转换效率

Fig. 8 The phase mismatch curve and conversion efficiency diagram of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ with doping coefficients y from 0.2 to 0.8 in a strip-loaded waveguide layer at 1 550 nm and 100 mW pumping power

系数 y 的减小, In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} 材料的折射率减小、禁带宽度增大, 与 InP 晶格相匹配时, 禁带宽度为 0.75 eV 到 1.35 eV。因此, 波导的转换带宽逐渐增大, 所以在 $y=0.2$ 模拟计算得到了最大的转换带宽 35 nm。

为了探索泵浦功率和泵浦波长对加载条状波导波长转换效率的影响, 图 9 展示了导光层 In_{0.91}Ga_{0.09}As_{0.2}P_{0.8} 的泵浦功率和泵浦波长对转换效率和带宽的影响。输入信号功率为 10 mW, 闲频光功率为 0, 图 9(a) 是在泵浦波长为 1 550 nm 时的转换效率, 信号波长范围为 1.5~1.6 μm , 从图中可以看出随着泵浦功率的增大, 转换带宽保持 35 nm 不变, 转换效率有小幅度的提高; 在泵浦功率为 80 mW 时, 转换效率的峰值为 -28.44 dB; 在泵浦功率为 120 mW 时, 转换效率的峰值为 -23.98 dB。只有泵浦功率达到一定数值, 才能更好地产生四波混频效应, 继而实现波长转换。转换效率对泵浦光功率较为敏感, 但泵浦功率过大时, 相位失配会随之增大, 从而影响四波混频效应的产生。因此, 想要获得高转换效率和带宽, 可在一定范围内提高泵浦功率。图 9(b) 是在泵浦功率为 120 mW 时, 信号波长范围为 1.5~1.65 μm , 不同泵浦波长的转换效率图。从图中可以看出, 泵浦波长红移, 转换带宽和转换效率的峰值保持不变, 满足零相位失配的信号波范围红移, 闲频波的范围红移。

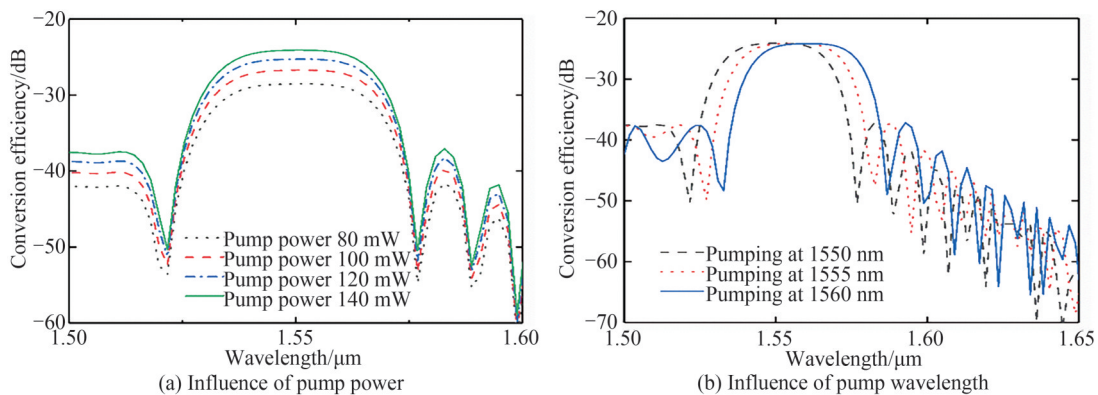


图 9 加载条状波导 InP/In_{0.91}Ga_{0.09}As_{0.2}P_{0.8} 泵浦功率从 80 mW 到 140 mW 的转换效率和泵浦波长从 1 550 nm 到 1 560 nm 的转换效率

Fig. 9 Strip-loaded waveguide InP/In_{0.91}Ga_{0.09}As_{0.2}P_{0.8} conversion efficiency plot of pump power from 80 mW to 140 mW and conversion efficiency plot of pump wavelength from 1 550 nm to 1 560 nm

图 10 为加载条状波导 InP/In_{0.91}Ga_{0.09}As_{0.2}P_{0.8} 在泵浦波长为 1 550 nm、泵浦功率为 120 mW 时, 信号波长为 1.5~1.6 μm , 不同波导长度的转换效率图。波导的长度从 5 mm 增加到 20 mm 时, 随着波导长度的增加, 转换效率峰值增大, 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。在波导长度为 15 mm 时达到了四波混频及其逆效应的临界点, 转换效率的峰值为 -19.8 dB, 与此同时转换带宽在减小, 波导长度为 5 mm 时的 3 dB 带宽为 35 nm, 波导长度为 20 mm 时的 3 dB 带宽为 12 nm。综上分析, 在波长转换的过程中该加载条状波导的最佳长度为 5 mm。

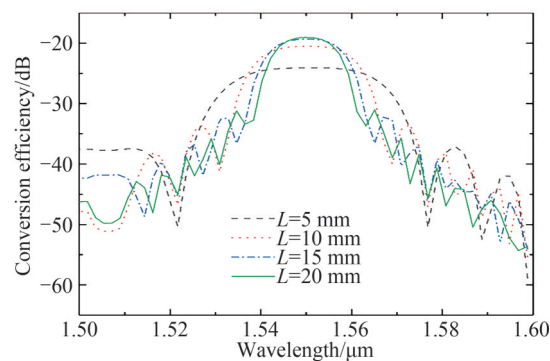


图 10 泵浦功率 120 mW, 泵浦波长 1 550 nm 时, 加载条状波导 InP/In_{0.91}Ga_{0.09}As_{0.2}P_{0.8} 波导长度从 5 mm 到 20 mm 的转换效率

Fig. 10 When the pump power is 120 mW and the pump wavelength is 1 550 nm, the conversion efficiency of the strip-loaded waveguide InP/In_{0.91}Ga_{0.09}As_{0.2}P_{0.8} is from 5 mm to 20 mm

3 结论

本文优化设计了一种 $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 加载条状波导, 利用波导在 $1.53\ \mu\text{m}$ 到 $1.59\ \mu\text{m}$ 的零相位失配, 实现了高效率的宽带波长转换。该波导具有良好的非线性光学特性, 克尔系数高达 $2.2 \times 10^{-17}\ \text{m}^2/\text{W}$ 。在优化的波导结构下实现了 $3\ \text{dB}$ 带宽为 $35\ \text{nm}$, 峰值转换效率为 $-26.7\ \text{dB}$ 的波长转换。讨论了导光层材料 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 的掺杂系数 y 等因素对波长转换结果的影响, 数值结果表明: 在泵浦功率和泵浦波长一定的情况下, 随着掺杂系数 y 的减小, 转换带宽会增大。此外, 保持泵浦波长不变, 通过增大泵浦光功率, 该波导的峰值转换效率增大; 保持泵浦功率不变, 随着泵浦光波长的红移闲频光的波段随之红移。同时, 经过分析与数值模拟 $5\ \text{mm}$ 是 $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 条状加载波导的最佳长度。基于 $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 波导平台的波长转换器在光通信、光传感等领域有重要的应用价值。

参考文献

- [1] MA Ming, CHEN L R. Harnessing mode-selective nonlinear optics for on-chip multi-channel all-optical signal processing [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(8): 086104.
- [2] GUAN Lei, WANG Zhouan, YUAN Guohui, et al. Characteristics of all-optical wavelength conversion based on quantum-dot semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(11): 1113002.
管磊, 王卓然, 袁国慧, 等. 基于量子点半导体光放大器全光波长变换特性 [J]. *光子学报*, 2016, 45(11): 1113002.
- [3] HENDRICKSON S M, FOSTER A C, CAMACHO R M, et al. Integrated nonlinear photonics: emerging applications and ongoing challenges [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, 31(12): 3193-3203.
- [4] ZHOU Zhiping, YIN Bing, MICHEL J. On-chip light sources for silicon photonics [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(11): e358.
- [5] PU M, OTTAVIANO L, SEMENOVA E, et al. Efficient frequency comb generation in AlGaAs-on-insulator [J]. *Optica*, 2016, 3(8): 823-826.
- [6] LAMONT M R E, LUTHER-DAVIES B, CHOI D Y, et al. Supercontinuum generation in dispersion engineered highly nonlinear ($\gamma=10\ \text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$) As_2S_3 chalcogenide planar waveguide [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14938-14944.
- [7] TATEBAYASHI J, KAKO S, HO J, et al. Room-temperature lasing in a single nanowire with quantum dots [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(8): 501-505.
- [8] LIANG Di, BOWERS J E. Recent progress in lasers on silicon [J]. *Nature photonics*, 2010, 4(8): 511-517.
- [9] CHEN R, TRAN T T D, NG K W, et al. Nanolasers grown on silicon [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 170-175.
- [10] LUAN F, PELUSI M D, LAMONT M R E, et al. Dispersion engineered As_2S_3 planar waveguides for broadband four-wave mixing based wavelength conversion of 40 Gb/s signals [J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3514-3520.
- [11] GALILI M, XU Jing, MULVAD H C H, et al. Breakthrough switching speed with an all-optical chalcogenide glass chip: 640 Gbit/s demultiplexing [J]. *Optics Express*, 2009, 17(4): 2182-2187.
- [12] SIVILOGLOU G A, SUNTSOV S, EI-GANAINY R, et al. Enhanced third-order nonlinear effects in optical AlGaAs nanowires [J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9377-9384.
- [13] DUCHESNE D, MORANDOTTI R, SIVILOGLOU G A, et al. Nonlinear photonics in AlGaAs photonics nanowires: self phase and cross phase modulation [C]. 2007 International Symposium on Signals, Systems and Electronics, IEEE, 2007.
- [14] 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.
- [15] TOLSTIKHIN V I. Single-mode vertical integration of active devices within passive waveguides of InP-based planar WDM components [C]. *Integrated Photonics Research*, 2002.
- [16] TOLSTIKHIN V I, DENSMORE A, PIMENOV K, et al. Monolithically integrated optical channel monitor for DWDM transmission systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 146.
- [17] DOLGALEVA K, NG W C, QIAN Li, et al. Compact highly-nonlinear AlGaAs waveguides for efficient wavelength conversion [J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12440-12455.
- [18] DOLGALEVA K, NG W C, QIAN Li, et al. Broadband self-phase modulation, cross-phase modulation, and four-wave mixing in 9-mm-long AlGaAs waveguides [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4093-4095.
- [19] CUI Delong, HUBBARD S M, PAVLIDIS D, et al. Impact of doping and MOCVD conditions on minority carrier lifetime of zinc- and carbon-doped InGaAs and its applications to zinc- and carbon-doped InP/InGaAs heterostructure bipolar transistors [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2002, 17(6): 503.
- [20] DOLGALEVA K, NG W C, QIAN Li, et al. Compact highly-nonlinear AlGaAs waveguides for efficient wavelength conversion [J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12440-12455.
- [21] APIRATIKUL P, WATHEN J J, PORKOLAB G A, et al. Enhanced continuous-wave four-wave mixing efficiency in

- nonlinear AlGaAs waveguides[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26814–26824.
- [22] SAEIDI S, AWAN K M, SIRBU L, et al. Nonlinear photonics on-a-chip in III – V semiconductors: quest for promising material candidates[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(19): 5532–5541.
- [23] SAEIDI S, RASEKH P, AWAN K M, et al. Demonstration of optical nonlinearity in InGaAsP/InP passive waveguides [J]. *Optical Materials*, 2018, 84: 524–530.
- [24] WEN Jin, LI Kang, GONG Yongkang, et al. Numerical investigation of on-chip wavelength conversion based on InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} semiconductor waveguide platforms[J]. *Optics Communications*, 2020, 473: 125921.
- [25] JENSEN B, TORABI A. Refractive index of quaternary In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} lattice matched to InP [J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(6): 3623–3625.

Numerical Study of Broadband Wavelength Conversion Based on InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} Strip-loaded Waveguide

WEN Jin^{1,2}, HE Chenyao¹, QIN Weijun¹, SUN Wei¹, LIANG Bozhi¹, XIONG Keyu¹, ZHANG Hui¹, WU Zhengwei¹, YU Huimin¹, WANG Qian¹

(1 *School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China*)

(2 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

Abstract: In recent years, nonlinear integrated optical devices have shown great potential in all-optical signal processing, and a lot of research work has been done on them. The nonlinear integrated optical devices usually use silicon, III – V, chalcogenide glass and other materials platform. Silicon has very sophisticated low-cost manufacturing platforms, but silicon is an indirect band-gap list of semiconductor materials with very low luminous efficiency, and silicon needs to be integrated with other materials, for example, the integration of III – V lasers and amplifiers on a silicon substrate to achieve integrated optical path, which makes the integrated optical path complex and expensive, and has compatibility problems. As₂Se₃ chalcogenide glasses stand out among many materials because of their low linear and nonlinear loss, but their refractive index can not be adjusted within a certain range, which is not conducive to the flexibility of all-optical signal processing. The As₂Se₃ chalcogenide glass platform is not compatible with the Complementary Metal-oxide Semiconductor (COMS) process, and the fabrication process is complex. Various ternary and quaternary III – V compounds with different bandgap wavelengths can form a group of nonlinear photonic materials that can cover the whole spectrum window from ultraviolet to infrared. III – V materials can improve the flexibility of custom-made integrated optical devices by changing the components of different materials, within a certain range. III – V semiconductor platforms enable active and passive integrated optical devices to be combined on the same material platform, which can be achieved by careful design and advanced manufacturing methods, for example, multilayer epitaxy and vertical coning. III – V semiconductor waveguides have high nonlinear coefficients, and minimal nonlinear absorption can be achieved by selecting the appropriate material composition and operating wavelength. Recent studies have shown that the carrier lifetime of III – V list of semiconductor materials can be reduced to 0.42 ps, which can reduce the nonlinear loss in the communication band and has the potential for efficient wavelength conversion.

In this paper, an InP/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} strip-loaded waveguide is optimized and designed. The high efficiency broadband wavelength conversion is realized by zero phase mismatch of the waveguide from 1.53 μm to 1.59 μm. The waveguide has good nonlinear optics characteristics with a high Kerr coefficient of $2.2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$. The wavelength conversion with 35 nm bandwidth and peak conversion efficiency of –26.7 dB is realized in the optimized waveguide structure. The influence of the doping coefficient y of In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} on the wavelength conversion is discussed. The numerical results show that when the pump power and the pump wavelength are constant, with the doping coefficient y decreasing, the effect of the doping coefficient y on the wavelength conversion of In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} on the wavelength conversion of In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} is obvious, the conversion bandwidth is increased. In addition, the peak conversion efficiency of the waveguide is increased by increasing the pump power while the pump power is kept

constant, and the band of the Idle Light is redshifted with the redshift of the pump wavelength. At the same time, the optimum length of $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ strip-loaded waveguide is 5 mm by analysis and numerical simulation. Wavelength converter based on $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ waveguide platform has important application value in optical communication, optical sensing and other fields.

Key words: Nonlinear optics; Integrated optics; $\text{InP}/\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$; Wavelength conversion; Four-wave mixing

OCIS Codes: 190.4390; 130.2790; 130.3120; 230.3120; 230.7370

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 61505160), the Innovation Capability Support Program of Shaanxi (No.2018KJXX-042), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (No. 2019JM-084), State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics (No.SKLST202108), the Graduate Innovation and Practical Ability Training Project of Xi'an Shiyou University (No. YCS20211075)