

doi:10.3788/gzxb20144310.1006004

# 阶梯分段准相位匹配结构的平坦宽带波长转换

刘涛, 崔洁, 张珂, 卢春林, 朱凯

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:**利用龙格-库塔法分析了阶梯分段准相位匹配结构对基于差频效应的波长转换器的转换带宽、转换效率及平坦性的影响。当晶体长度不变时,增加阶梯段数,设计合理的起始段极化周期及合理的阶梯变化量,可以同时获得高平坦性、大转换带宽和高转换效率的波长转换。分析了结构参数对波长转换特性的影响。对于 3 cm 长的晶体,在保证平坦度低于 0.2 dB 的前提下,得到 166 nm 的转换带宽和 -0.55 dB 的最大转换效率。对比分析了阶梯分段结构的波长转换器与正弦啁啾光学超晶格和分段光栅结构的波长转换器的特性,结果表明阶梯分段结构与正弦啁啾光学超晶格相比在转换效率、带宽和平坦度方面都占优势;与分段光栅结构相比,转换带宽稍小,但转换效率和平坦度都更大。

**关键词:** 波长转换; 准相位匹配; 差频; 带宽; 平坦度

**中图分类号:** TN913.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)10-1006004-5

## Flattop Broadband Wavelength Conversion Based on Step-segmented Quasi-phase Matched Gratings

LIU Tao, CUI Jie, ZHANG Ke, LU Chun-lin, ZHU Kai

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

**Abstract:** Flattop broadband wavelength conversions based on difference frequency generation were fulfilled by utilizing step-segmented quasi-phase matched gratings. For the same waveguide length, high conversion efficiency, flat response and broad signal bandwidth can be obtained simultaneously by adding the segment number of quasi-phase matched grating and optimizing the poling period of the first segment and the period shifts between adjacent sections. Analysis of the structure parameters on conversion efficiency, signal bandwidth and response flatness is performed as well. The conversion bandwidth in a 3-cm-long waveguide reaches 166 nm, which is over the whole conventional band and long-wavelength band, meanwhile the maximum efficiency is -0.55 dB and the peak-to-peak ripples less than 0.2 dB. In addition, the comparison among step-segmented gratings, sinusoidally chirped optical superlattices and segmented gratings is carried out, the step-segmented gratings shows higher conversion efficiency and flatter response than the other two gratings, and has much broader bandwidth than sinusoidally chirped optical superlattices.

**Key words:** Wavelength conversion; Quasi-phase matching; Difference frequency generation; Bandwidth; Flatness

**OCIS Codes:** 060.4510; 190.4410; 230.7405

## 0 引言

波长转换技术是未来全光通信网中的一项关键技

术,它允许波长重用,避免波长竞争,能够提高网络的重构能力和生存能力,实现灵活的网络管理和动态组网<sup>[1]</sup>. 与其它的波长转换技术相比,基于准相位匹配

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. 61302105, 61302163)、河北省自然科学基金(No. F2012502015)和中央高校基本科研业务费专项资金资助

**第一作者:** 刘涛(1981-),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤通信和非线性光学. Email: Ltwin211@126.com

**收稿日期:** 2014-02-24; **录用日期:** 2014-04-25

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

(Quasi-phase Matching, QPM)光波导的波长转换技术具有响应速度快、低噪声、无啁啾、对调制格式全透明等优点<sup>[2]</sup>,近年来受到国内外学者广泛的关注<sup>[3-21]</sup>.在QPM波导中实现1.5  $\mu\text{m}$ 波段信号光的波长转换可以采用差频(Difference Frequency Generation, DFG)效应<sup>[4-5]</sup>或者级联二阶非线性效应(级联倍频(Second-harmonic Generation, SHG)+差频效应和级联和频(Sum Frequency Generation, SFG)+差频效应)<sup>[2,7-13,22-23]</sup>.基于级联二阶非线性效应的波长转换过程由于要经过两次二阶非线性变换,所以在理论上其转换效率比直接基于DFG的要低<sup>[14]</sup>.而基于DFG的波长转换器所需的泵浦光不处于光通信波段,因此同时将信号光和泵浦光一起入射到波导当中而不激发高阶模成为了此技术的难点.Chou<sup>[16]</sup>等通过采用锥形周期波导很好地解决了这个问题.

对于波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)系统的多信道波长转换而言,希望转换带宽大且转换效率曲线平坦.然而传统采用均匀周期结构QPM波导的波长转换器的信号光转换带宽和抽运光调谐带宽都十分有限,因此有学者利用非均匀极化周期结构对带宽进行扩展<sup>[2-3,12-15]</sup>.Liu<sup>[15]</sup>等采用分段相移结构周期极化铌酸锂(Periodically Poled Lithium Niobate, PPLN)晶体对基于DFG的波长转换器的特性进行了研究,获得了148 nm的转换带宽和0.56 nm的抽运光调谐带宽,转换效率曲线的波动性小于1 dB.利用分段结构PPLN晶体将基于SHG+DFG效应的波长转换器的转换带宽和调谐带宽分别扩展到了160 nm和0.88 nm,同时可保持波动性在0.77 dB<sup>[2]</sup>.Gao<sup>[14]</sup>等提出了正弦啁啾光学超晶格(Sinusoidally Chirped Optical Superlattices, SCOS),并利用SCOS获得了103 nm的转换带宽和0.33 nm的调谐带宽,其DFG转换效率曲线的波动性低至0.42 dB.上述研究大都关注尽量去扩展波长转换器的带宽,因此转换平坦性较差.Amirhossein<sup>[13]</sup>等提出了步变啁啾光栅(Step-Chirped Grating, SCG)结构,可使转换效率曲线十分平坦(波动性低于0.2 dB),不过其转换带宽不足100 nm,且由于采用级联SFG+DFG效应,最大转换效率仅约-15 dB.为了同时获得高平坦性、大转换带宽和高转换效率,本文利用阶梯分段QPM结构对基于DFG效应的波长转换过程进行了研究,在保证平坦度低于0.2 dB的前提下,获得了166 nm的转换带宽和-0.55 dB的最大转换效率.此外还将此种结构与SCOS和分段光栅结构进行了对比,结果显示阶梯分段QPM结构具有良好的综合特性.

## 1 原理和模型

在准相位匹配晶体,如PPLN晶体中,如果泵浦光

和信号光都是准连续的平面光,在慢变包络近似下,差频过程可以用耦合波方程来描述<sup>[3]</sup>,即

$$\frac{\partial E_s}{\partial x} = -i\omega_s \kappa_{\text{DF}} E_c^* E_p \exp(-i\Delta k_{\text{DF}} x) - \frac{\alpha_s}{2} E_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial x} = -i\omega_c \kappa_{\text{DF}} E_s^* E_p \exp(-i\Delta k_{\text{DF}} x) - \frac{\alpha_c}{2} E_c \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial x} = -i\omega_p \kappa_{\text{DF}} E_s E_c \exp(i\Delta k_{\text{DF}} x) - \frac{\alpha_p}{2} E_p \quad (3)$$

式中下标s, c和p分别代表信号光、转换光和泵浦光, E是场分布,  $\alpha$ 是传输损耗,  $\Delta k_{\text{DF}}$ 是DFG相位失配因子,  $\kappa_{\text{DF}}$ 是DFG的耦合系数<sup>[3]</sup>.

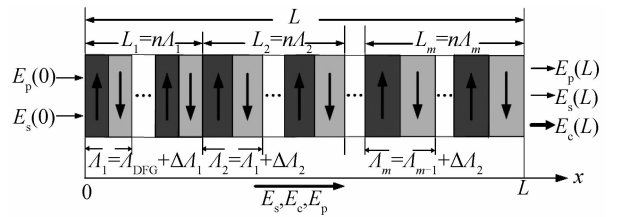


图1 阶梯分段结构准相位匹配模型

Fig. 1 Schematic of the step-segmented structure

为了获得高效、平坦的宽带波长转换,可以对传统的具有单一极化周期的PPLN晶体的结构进行改变,采用阶梯分段光栅的形式,如图1.沿着光的传输方向(x轴)晶体被分成了m段,每段都有一个统一的极化周期 $\Lambda_j$ ,每段的长度为 $L_j = n\Lambda_j$ .第一段的极化周期 $\Lambda_1 = \Lambda_{\text{DFG}} + \Delta\Lambda_1$ ,其中 $\Lambda_{\text{DFG}}$ 为泵浦光和信号光分别为0.775  $\mu\text{m}$ 和1.55  $\mu\text{m}$ ,相位匹配(即 $\Delta k_{\text{DF}} = 0$ )时对应的极化周期, $\Delta\Lambda_1$ 是第一段极化周期的改变量.第一段之后的每一段的极化周期 $\Lambda_j$ 相对于其前一段都只改变 $\Delta\Lambda_2$ .通过控制 $\Delta\Lambda_1$ 和 $\Delta\Lambda_2$ 这两个参数,可以使PPLN具有不同的极化周期结构,此时虽会导致各个晶体段内发生差频作用的光波并不能完全相位匹配,从而略微地影响转换效率,但同时也能使转换带宽得到扩展,转换效率的平坦性也能被改善.因此,可以根据实际中对波长转换器特性的需求而对 $\Delta\Lambda_1$ 和 $\Delta\Lambda_2$ 进行设计.

## 2 结果与讨论

波长转换是WDM光网络一个非常重要的功能,其要求具有平坦的响应特性,大的转换带宽和高的转换效率.本节利用龙格-库塔法<sup>[20]</sup>对基于DFG的全光波长转换过程中PPLN晶体的阶梯分段结构进行了优化设计,优化的目标是在获得高转换效率的前提下尽可能大地扩展转换带宽,同时保持转换效率曲线的平坦度 $\leq 0.2$  dB(即最大转换效率 $\eta_{\text{max}}$ -中心转换效率 $\eta_0 \leq 0.2$  dB).在不考虑传输损耗的影响时,采用的初始条件为 $P_{p0} = |E_p(0)|^2 = 100$  mW,  $P_{s0} = |E_s(0)|^2 = 1$  mW,  $P_{c0} = |E_c(0)|^2 = 0$  mW,式中P为光功率,泵浦光波长为0.775  $\mu\text{m}$ ,工作温度为150  $^\circ\text{C}$ ,晶体长度为

3 cm,此时计算得到  $\Lambda_{\text{DFG}} = 18.511 \mu\text{m}$ .

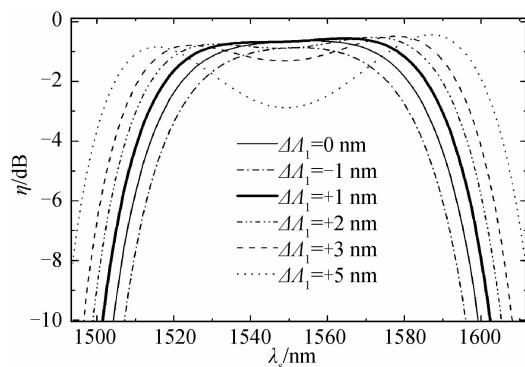


图2 不同  $\Delta\Lambda_1$  时基于单段结构 PPLN 晶体的波长转换器的转换效率

Fig. 2 Conversion efficiency of one-segment PPLN-based device versus signal wavelength for different  $\Delta\Lambda_1$

当仅采用单段结构(即  $\Delta\Lambda_2 = 0$ )时,极化周期的改变量  $\Delta\Lambda_1$  对转换效率的影响如图 2. 从图 2 可以看出,当极化周期下降时(点划线),转换效率曲线顶部将变得更平坦,但信号光的转换带宽和转换效率也会随之下降. 随着极化周期的增加,转换带宽得到扩展,最大转换效率基本不变,但曲线的平坦度越来越差. 为了获得平坦的宽带波长转换,在平坦度  $\leq 0.2$  dB 的约束条件下,  $\Delta\Lambda_1 = +1$  nm 时信号光的 3 dB 转换带宽最大,达到 81 nm,此时的最大转换效率为  $-0.56$  dB(对应的信号光波长  $\lambda_{\text{sm}} = 1565$  nm),如图 2 中加粗实线所示. 单段结构相当于传统的单一均匀极化周期的情况,从图 2 中可以看出,如果要保证转换效率的平坦度,采用传统结构时转换带宽最大仅为 80 nm 左右. 如果想扩展带宽,则必须以牺牲平坦度为代价,不过即使如此,3 dB 带宽最大也只能达到 105 nm,而此时的平坦度已恶化到 2.4 dB,如图 2 中点线( $\Delta\Lambda_1 = +5$  nm)所示.

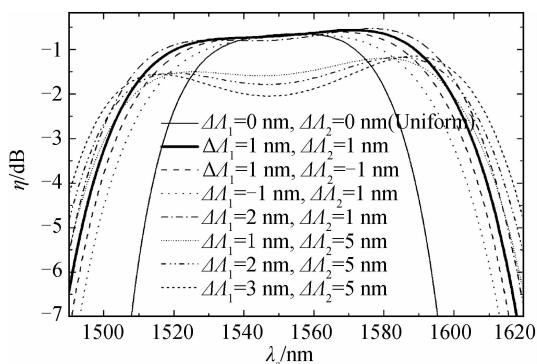


图3 不同  $\Delta\Lambda_1$  和  $\Delta\Lambda_2$  时基于两段阶梯结构 PPLN 晶体的波长转换器的转换效率

Fig. 3 Conversion efficiency of two-step-segmented PPLN-based device versus signal wavelength for different  $\Delta\Lambda_1$  and  $\Delta\Lambda_2$

图 3 为采用 2 段阶梯分段结构时不同的结构设计参数  $\Delta\Lambda_1$  和  $\Delta\Lambda_2$  下转换效率随信号光波长的变化曲线. 与图 2 类似,第一段的极化周期改变量  $\Delta\Lambda_1$  会影响

转换效率的平坦度及转换带宽,  $\Delta\Lambda_1$  减小时平坦度变好,但转换带宽下降,反之  $\Delta\Lambda_1$  增加时平坦度变差,但转换带宽得到扩展. 与图 2 不同的是此时采用阶梯分段结构,所以除了  $\Delta\Lambda_1$  之外,极化周期的阶梯变化量  $\Delta\Lambda_2$  也会对转换效率起作用. 当  $\Delta\Lambda_1$  相同时,随着  $\Delta\Lambda_2$  的减小平坦度也会得到改善,但转换带宽下降,而随着  $\Delta\Lambda_2$  增加平坦度变差,但转换带宽变大,如图 3 中粗实线( $\Delta\Lambda_1 = 1$  nm,  $\Delta\Lambda_2 = 1$  nm)、虚线( $\Delta\Lambda_1 = 1$  nm,  $\Delta\Lambda_2 = -1$  nm)和短点线( $\Delta\Lambda_1 = 1$  nm,  $\Delta\Lambda_2 = 5$  nm)所示. 此外,  $\Delta\Lambda_2$  还会影响转换效率的大小,无论  $\Delta\Lambda_2$  增加还是减小,整体转换效率都会下降,如图 3 中  $\Delta\Lambda_2 = 5$  nm 时的三条曲线所示. 分析可知,为了得到大的转换效率,极化周期的阶梯变化量  $\Delta\Lambda_2$  应保持在小的变化范围内,此时可以通过合理的设计  $\Delta\Lambda_1$  和  $\Delta\Lambda_2$  两个参数获得高效、平坦的宽带波长转换. 对于 2 段阶梯分段结构,在平坦度  $\leq 0.2$  dB 的约束条件下,  $\Delta\Lambda_1 = 1$  nm、 $\Delta\Lambda_2 = 1$  nm 时信号光的 3 dB 转换带宽最大,达到 111 nm,最大转换效率为  $-0.56$  dB( $\lambda_{\text{sm}} = 1571$  nm). 此结果与单段结构相比不仅可以保持最大转换效率和平坦度基本不变,而且将转换带宽扩展了 30 nm.

为了获得更大的转换带宽,可以进一步增加所分的段数. 图 4 为采用 3 段阶梯分段结构时不同的结构设计参数  $\Delta\Lambda_1$  和  $\Delta\Lambda_2$  下转换效率随信号光波长的变化曲线. 与 2 段阶梯分段结构相比,转换带宽进一步得到了扩展. 在平坦度  $\leq 0.2$  dB 的约束条件下,  $\Delta\Lambda_1 = 1$  nm、 $\Delta\Lambda_2 = 1$  nm 时 3 段阶梯结构的 3 dB 转换带宽达到最大,为 134 nm,最大转换效率为  $-0.55$  dB( $\lambda_{\text{sm}} = 1577$  nm),转换带宽比 2 段阶梯结构大了 23 nm.  $\Delta\Lambda_1$  和  $\Delta\Lambda_2$  对波长转换特性的影响与图 3 类似,但当段数  $m$  增加时,  $\Delta\Lambda_2$  的变化会加剧整体转换效率的下降. 如当  $\Delta\Lambda_1 = 1$  nm、 $\Delta\Lambda_2$  分别为 1 nm 和 5 nm 时,2 段阶梯结构下最大转换效率相差 0.63 dB(图 3 中的粗实线和短点线),而 3 段阶梯结构的最大转换效率却相差

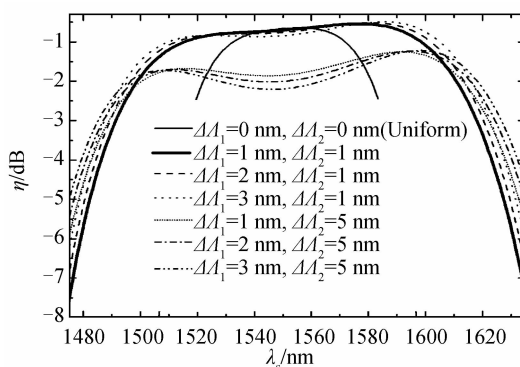


图4 不同  $\Delta\Lambda_1$  和  $\Delta\Lambda_2$  时基于三段阶梯结构 PPLN 晶体的波长转换器的转换效率

Fig. 4 Conversion efficiency of three-step-segmented PPLN-based device versus signal wavelength for different  $\Delta\Lambda_1$  and  $\Delta\Lambda_2$

0.72 dB(图4中的粗实线和短点线). 所以多段阶梯结构虽然转换带宽更大, 但为了获得高转换效率, 应注意控制阶梯变化量  $\Delta A_2$  的变化范围.

图5为不同段数时, 在平坦度  $\leq 0.2$  dB的约束条件下转换效率随信号光的变化曲线以及相应的极化周期设计参数. 从图5中可以看出, 通过合理设计  $\Delta A_1$  和  $\Delta A_2$ , 不仅转换效率及其平坦度不会随着段数的增加而恶化, 信号光转换带宽也会持续增加. 5段阶梯结构的3 dB带宽达到166 nm, 比传统的均匀周期结构提高了85 nm, 可以覆盖全部的C、L波段及部分S、U波段. 与采用级联SFG+DFG效应和SCG结构<sup>[13]</sup>相比, 本文结果不仅保持了相同的平坦度, 同时随着段数的增加转换效率和转换带宽也不会下降, 此外在相同条件下最大转换效率以及转换带宽也要大很多, 如当晶体长度都为3 cm时, 同样是5段的情况下本方法最大转换效率和带宽分别为-0.55 dB( $\lambda_{sm} = 1580$  nm)和166 nm, 而文献<sup>[13]</sup>分别约为-15 dB( $\lambda_{sm} = 1523$  nm)和95 nm.

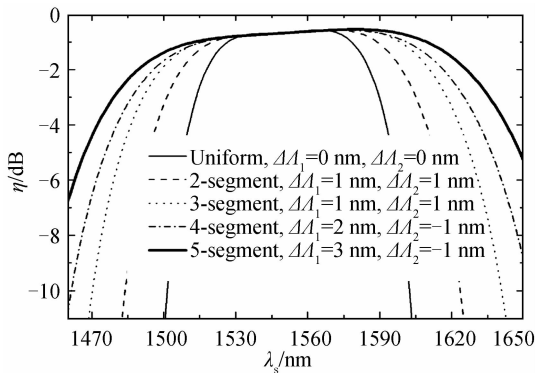


图5 不同阶梯分段结构下的转换效率变化

Fig. 5 Conversion efficiency versus signal wavelength for one- to five-step-segmented grating structures

实际中传输损耗会引起转换效率的下降( $L = 3$  cm时降低约2 dB), 但对转换带宽及平坦度几乎没有影响<sup>[2]</sup>. 所以上文结构优化设计参数对于引入传输损耗后如何获得平坦的宽带波长转换特性同样适用. 此外, 虽然增加段数可以获得更大的转换带宽, 但也相应的增加了波长转换器的制作难度和成本, 所以应根据实际情况合理选取晶体所分段数.

当晶体长度为3 cm, 对比分析同样采用DFG效应时阶梯分段结构、分段结构<sup>[3]</sup>和SCOS结构<sup>[14]</sup>对波长转换特性的影响, 结果如图6和表1. 当都将晶体分为3段时, 与分段结构相比, 采用阶梯分段结构时转换带宽稍差, 但也达到了134 nm, 而且能够获得更大的转换效率, 此外转换效率曲线十分平坦, 在此方面优势明显. 与SCOS结构相比, 阶梯分段结构在转换效率、带宽和平坦度方面都占优势, 分别高出76%、30%和52%, 此外阶梯分段结构相对而言在结构上简单, 所以

在实际中更易实现. 通过对比分析看出, 阶梯分段QPM结构具有良好的综合特性, 是获得高效、平坦的宽带波长转换特性的较佳选择.

表1 不同QPM结构中基于DFG效应的波长转换器的转换特性

Table 1 The characteristics of DFG-based wavelength converter for different QPM structures

Different QPM structures	$\Delta\lambda_s$ /nm	$\eta_{max}$ /dB	Response flatness/dB
Step-segmented grating	134	-0.55	0.2
Equal-segmented grating	150	-0.96	0.8
SCOS	103	-2.29	0.42

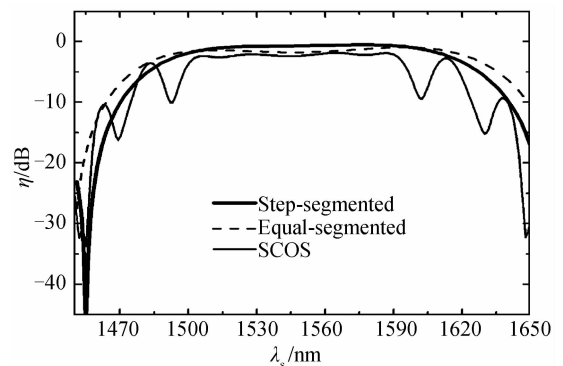


图6 阶梯分段结构、分段结构和SCOS结构下转换效率随信号光的变化曲线

Fig. 6 Conversion efficiency versus signal wavelength for step-segmented, equal-segmented and SCOS grating structures

### 3 结论

本文对基于阶梯分段QPM结构和DFG效应的波长转换器的特性进行了研究. 通过增加阶梯段数并合理设计起始段极化周期的变化量参数及相邻段之间的阶梯变化量参数, 不仅能够极大地扩展信号光转换带宽, 也能在控制增益起伏低于0.2 dB的同时获得大的转换效率. 当晶体长度为3 cm时, 采用5段阶梯分段结构可以得到166 nm的转换带宽和-0.55 dB的最大转换效率. 同时分析了结构设计参数对波长转换特性的影响. 此外, 还对分别采用阶梯分段结构、SCOS和分段结构时波长转换器的特性进行了对比分析. 当晶体长度为3 cm时, 采用阶梯分段结构时转换带宽稍差, 但能够获得更大的转换效率, 而且转换效率曲线的平坦度更好; 与SCOS相比, 使用阶梯分段结构时优势明显, 转换效率、带宽和平坦度分别高出了76%、30%和52%, 并且结构更简单, 在实际中更易实现. 结果表明阶梯分段QPM结构具有良好的综合特性, 是获得高效、平坦的宽带波长转换特性的较佳选择.

## 参考文献

- [1] YU Song, GU Wan-yi, A tunable wavelength conversion and wavelength add/drop scheme based on cascaded second-order nonlinearity with double-pass configuration[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, **41**(7):1007-1012.
- [2] LIU Tao, QI Yu-lin, CHE Lin-lin, *et al.* Flat broadband wavelength conversion based on cascaded second-harmonic generation and difference frequency generation in segmented quasi-phase matched gratings[J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, **59**(7-8):650-657.
- [3] LIU Tao, LI Bao-gang, Broadband wavelength converter based on segmented quasi-phase matched grating[C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2010, 7544.
- [4] XU C Q, OKAYAMA H, KAWAHARA M, 1.  $5\mu\text{m}$  band efficient broadband wavelength conversion by difference frequency generation in a periodically domain-inverted  $\text{LiNbO}_3$  channel waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, **63**:3559-3561.
- [5] CHOU M H, BRENNER I, PARAMESWARAN K R, *et al.* Stability and bandwidth enhancement of difference frequency generation (DFG)-based wavelength conversion by pump detuning[J]. *Electronics Letters*, 1999, **35**(12):978-980.
- [6] KISHIMOTO T, NAKAMURA K, YAEGASHI H, *et al.* Chirped periodically poled  $\text{LiNbO}_3$  wavelength converter with apodization structure[J]. *Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(4):228-230.
- [7] CHOU M H, BRENER I, FEJER M M, *et al.* 1.  $55\text{-}\mu\text{m}$  -band wavelength conversion based on cascaded second-order nonlinearity in  $\text{LiNbO}_3$  waveguides[J]. *Photonics Technology Letters*, 1999, **11**(6):653-655.
- [8] CHEN B, XU C Q, Analysis of novel cascaded  $\chi^{(2)}$  (SFG + DFG) wavelength conversions in quasi-phase-matched waveguides[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, **40**(4):256-261.
- [9] MEENU A, AMIRHOSSEIN T, KRISHNAMOORTHY P, *et al.* Tunable all-optical wavelength broadcasting in a PPLN with multiple QPM peaks[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(24):27425-27433.
- [10] CHEN Yun-lin, LIU Gang, ZHENG Yan-qing, Broadband-signal wavelength converter with high damage resistance[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(16):2480-2482.
- [11] WANG J, SUN J Q, LUO C H, *et al.* Experimental demonstration of wavelength conversion between ps-pulses based on cascaded sum- and difference frequency generation (SFG + DFG) in  $\text{LiNbO}_3$  waveguides[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(19):7405-7414.
- [12] TEHRANCHI A, KASHYAP R, Efficient flattop ultra-wideband wavelength converters based on double-pass cascaded sum and difference frequency generation using engineered chirped gratings[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(23):22528-22534.
- [13] TEHRANCHI A, KASHYAP R, Flattop efficient cascaded  $\chi^{(2)}$  (SFG + DFG)- based wideband wavelength converters using step-chirped gratings[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, **99**:1-9.
- [14] GAO Shi-ming, YANG Chang-xi, JIN Guo-fan, Conventional-band and long-wavelength-band efficient wavelength conversion by difference-frequency generation in sinusoidally chirped optical superlattice waveguides [J]. *Optics Communication*, 2004, **239**:333-338.
- [15] LIU X, ZHANG H, GUO Y, *et al.* Optimal design and applications for quasi-phase-matching three-wave mixing[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, **38**(9):1225-1233.
- [16] CHOU M H, ARBORE M A, FEJER M M, Adiabatically tapered periodic segmentation of channel waveguides for mode-size transformation and fundamental mode excitation [J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(11):794-796.
- [17] WANG Jian, FU Hong-yan, GENG Dong-yu, *et al.* Single-PPLN-assisted wavelength-/time-selective switching/dropping/ swapping for 100-GHz-spaced WDM signals[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(3):3756-3774.
- [18] HUANG Hao, YANG Jeng-yuan, WU Xiao-xia, *et al.* Simultaneous subchannel data updating for multiple channels of 16-quadrature amplitude modulation signals using a single periodically poled lithium niobate waveguide [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(21):4365-4367.
- [19] WANG J, SUN J Q, ZHANG X L, *et al.* All-optical format conversions using periodically poled lithium niobate waveguides [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **45**(2):195-205.
- [20] DORMAND J R, PRINCE P J, A family of embedded Runge-Kutta formulae[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 1980, **6**:19-26.
- [21] GAO Shi-ming. Wavelength management method of telecommunication-band polarization-entangled twin photons in periodically poled lithium niobate crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5):820-824.  
王世铭, 周期极化铌酸锂中通信波段纠缠双光子的波长管理方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5):820-824.
- [22] WANG Jian, SUN Jun-qiang, SUN Qi-zhen, Experimental investigation of single-to-single and single-to-doual channel wavelength conversion between picosecond pulses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6):986-990.  
王健, 孙军强, 孙琪真, 单到单和单到双信道皮秒脉冲全光波长转换的实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6):986-990.
- [23] LI Wan-jie, ZHU Chang-hua, ZHAO Nan, *et al.* All-optical single-photon wavelength conversion based on cascaded sum-frequency generation and difference-frequency generation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7):763-767.  
李万杰, 朱畅华, 赵楠, 等. 基于和频与差频级联的全光单光子波长变换[J]. *光子学报*, 2013, **42**(7):763-767.