

文章编号:1004-4736(2008)01-0113-04

级联二阶非线性全光波长转换技术

于文兵, 夏守之

(武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:分析了级联二阶非线性全光波长转换中产生有限的泵浦与信号光带宽的原因, 提出与论证了在准相位匹配光栅波导中引入非周期性分布的 π 相移域来增加泵浦波长可变范围的方法. 结果表明可使波长调谐曲线的宽度和平坦性得到很大提高, 泵浦带宽增加约1倍.

关键词:全光波长转换器; 差频效应; 准相位匹配

中图分类号: TN 913.7 **文献标识码:** A

0 引言

光波长转换器能实现信息从一个波长的光载波到另一个波长的光载波的复制, 是全光网和宽带 DWDM 系统中不可缺少的关键器件. 差频全光波长转换器 (DFG-AOWC) 是基于二阶非线性差频光学效应, 通常采用准相位匹配 (QPM, quasi phase-matching) 光波导作为非线性光学介质, 它是一种较新颖的光波长转换技术^[1,2]. 差频全光波长转换器具有对信号速率和调制形式严格透明、多波长同时转换、转换过程噪声指数极低、转换波长范围对光纤工作波段透明等独特优点^[2], 但较窄的泵浦带宽是制约其实用化的主要问题^[3,4]. 本文对 DFG-AOWC 的泵浦带宽的改善方法进行了研究, 提出在准相位匹配光栅波导中引入非周期性分布的 π 相移域来增加泵浦波长可变范围的方法.

1 级联二阶非线性全光波长转换的基本原理

利用频率为 ω_p 的高功率激光源作为初始泵浦, 将它和同波段的频率为 ω_s 信号光同时注入到 QPM 波导中, 传播过程中初始泵浦光发生高效率的倍频效应, 产生足够强度频率为 ω_{SHG} 的倍频光场, 该光场又与信号光场发生差频效应, 从而产生频率为 ω_{DFG} ($\omega_{DFG} = 2\omega_p - \omega_s$) 的新光场. 此过程中同时包含倍频和差频两个过程, 所以称之为级联二阶非线性效应, 如图1所示. 由于不同波长的多个信号光与泵浦光之间的差频效应相互独立, 可同时进行, 所以 DFG-AOWC 具备多波长同时转换能力.

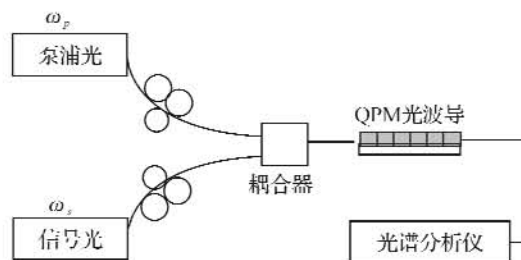


图1 DFG-AOWC 的示意图

Fig. 1 The schematic diagram of DFG-AOWC

当泵浦光通过周期性极化反转结构时, 倍频光波与泵浦光波的相位失配描述为: $\Delta\beta_{SHG} = \beta_{SHG} - 2\beta_p - 2\pi n/\Lambda_{SHG}$, 倍频光波 ω_{SHG} 、信号光波 ω_s 与转换光波 ω_{DFG} 的差频相位失配为: $\Delta\beta_{DFG} = \beta_{SHG} - \beta_{DFG} - 2\pi m/\Lambda_{DFG}$. 其中 β_{SHG} 为倍频光波的传播系数, β_p 为泵浦光波的传播系数, m 为相位匹配阶数, β_s 为信号光波的传播常数, β_{DFG} 为转换光波的传播常数, Λ_{DFG} 为极化反转周期, 级联二阶非线性效应有 $\Lambda_{SHG} = \Lambda_{DFG}$. 当泵浦光波与倍频光波在畴反转结构中满足相位匹配时, 与此同时倍频光波与信号光波的差频也能满足相位匹配条件, 则可获得差频后的转换光波 λ_{DFG} 的输出, 实现全光波长的转换.

2 波长转换效率

当泵浦光和信号光从同一端进入 PPLN 光波导, 转换光从另一端输出. 此时若 $\lambda_p \approx \lambda_s \approx \lambda_{DFG}$ 并且有 $\lambda_{SHG} = \frac{1}{2}\lambda_p$ 时, 耦合系数: $\kappa = \kappa_p \approx \kappa_s \approx \kappa_{DFG}$ 并且 $\kappa_{SHG} = 2\kappa_p$. 则一阶准相位匹配条件下的耦合波方程组为^[4]:

$$\frac{\partial E_p}{\partial z} = -i\kappa E_{SHG} E_p^* \exp(i\Delta\beta_{SHG}z) - \alpha_p E_p$$

收稿日期: 2006-05-16

作者简介: 于文兵 (1973-), 男, 湖北洪湖人, 讲师, 硕士, 研究方向: 全光通信.

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_{\text{SHG}}}{\partial z} &= -ikE_p^2 \exp(i\Delta\beta_{\text{SHG}}z) - \\ &\quad i2\kappa E_{\text{DFG}} E_s \exp(i\Delta\beta_{\text{DFG}}z) - \alpha_{\text{SHG}} E_p \\ \frac{\partial E_s}{\partial z} &= i\kappa E_{\text{SHG}} E_{\text{DFG}}^* \exp(-i\Delta\beta_{\text{DFG}}z) - \alpha_s E_s \\ \frac{\partial E_{\text{DFG}}}{\partial z} &= -i\kappa E_{\text{SHG}} E_s^* \exp(-i\Delta\beta_{\text{DFG}}z) - \alpha_{\text{DFG}} E_{\text{DFG}}\end{aligned}$$

在倍频过程中,当相位完全匹配时,即 $\Delta\beta_{\text{SHG}}=0$,并且无损耗即 $\alpha_p=\alpha_{\text{SHG}}=\alpha_s=\alpha_{\text{DFG}}=0$. 仅考虑倍频光与信号光波相互作用时,由于它们的相位并不影响器件的总体特性,因此可以将其忽略. 当相互作用长度 L 较短时,泵浦光波所转换的功率 P_{SHG} 较小,可以忽略由泵浦光转换为倍频光波的损失,并且忽略传播损耗,可得输出转换光波效率 $\eta_{\text{SHG:DFG}}$ 为:

$$\eta_{\text{SHG:DFG}}(\text{dB}) \approx 10 \log\left(\frac{1}{4} \eta_{\text{nor}}^2 L^4 P_p^2\right)$$

$$\text{式中: } \eta_{\text{nor}} = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2}{n_p n_s n_{\text{DFG}} c \epsilon_0 \lambda_s \lambda_{\text{DFG}} A_{\text{eff}}}$$

(在 $\eta_{\text{nor}} L^2 P_p < 1$ 时取近似)

3 改善泵浦带宽与调谐能力的研究

波长转换效率是光波长转换器的重要性能指标,用数值模拟的方法对转换效率进行分析. 输入信号光和泵浦光功率分别固定为 0 dBm 和 20 dBm,波长分别固定为 1 545.0 nm 和 775.0 nm. 当泵浦光波长改变时,波矢失配量 $\Delta\beta = \beta_{\text{SHG}} - \beta_s - \beta_p$ 也随之发生改变,使 $\Delta\beta - 2\pi/\Lambda \neq 0$,转换效率会发生变化. PPLN 波导长度取为 50 mm,泵浦光输入功率为 20 dBm,信号光波长固定为 1 545.0 nm. 图 2 示出了波长转换效率与泵浦光波长的关系曲线,可见转换效率对泵浦光波长的变化非常敏感,当泵浦波长偏离波导的准相位匹配波长(775.0 nm)时,转换效率迅速下降,曲线半宽度只有不到 0.2 nm. 泵浦光的可调谐能力很弱,这也是 DFG-AOWC 的主要问题.

当泵浦光波长固定为 775.0 nm, PPLN 波导长度同样为 50 mm 时,转换效率与输入信号光波长间的关系曲线如图 3 所示. 由图 3 可见信号光波长在很大范围内(1 530~1 570 nm)改变时,转换效率的变化很小,并且曲线半宽度超过 60 nm. 这说明 DFG-AOWC 有很好的信号光波长可调谐能力.

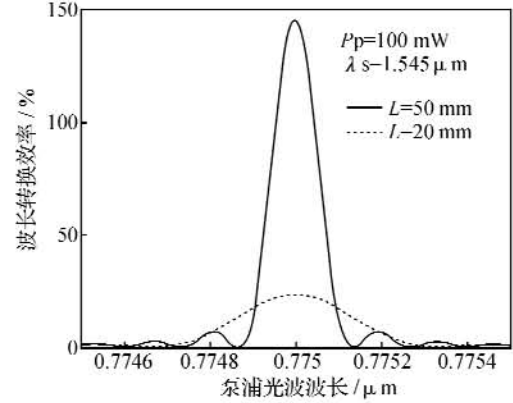


图 2 转换效率对泵浦光波长的变化曲线

Fig. 2 Relationship between converter efficiency and pump-wavelength

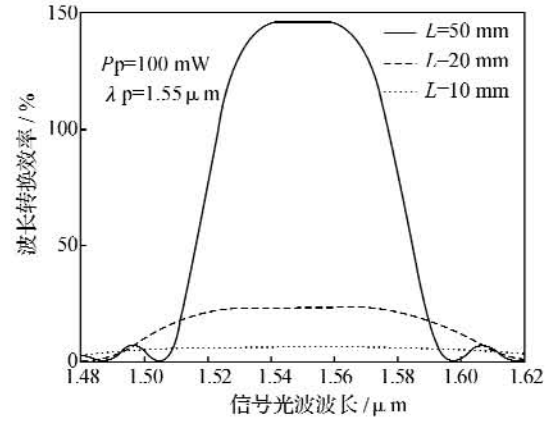


图 3 转换效率随信号光波长的变化曲线

Fig. 3 Relationship between converter efficiency and signal-wavelength

要解决泵浦光可调谐能力弱的问题,必须采用某种机制来补偿波长改变导致的 $\Delta\beta'$ 的改变. 本文提出在 QPM 光栅中引入 m 个 π 相移域并使其按非周期性样式分布,对波长改变导致的相位失配进行均衡,使泵浦波长调谐曲线的形态发生改变,从而增加有效泵浦带宽.

普通 QPM 光栅结构采用周期域反转样式,正域和反域依次相邻(如图 4 以箭头的方向表示). 在原本应相邻的正域和反域之间插入一个重复的正或负反域(图 5 中以反域表示),从而在光栅的该部位引入一个 π 的位相跳变. π 相移域的长度为 0.5Λ (一般情况下光栅的折射率是一致的). 如果合理设计这些 π 相移域在光栅中的分布样式,就能够使泵浦波长调谐曲线形态发生我们所希望的变化,使泵浦带宽与调谐能力得到改善.



图 4 QPM 光栅示意图

Fig. 4 The schematic diagram of QPM grating

图5 引入了 π 相移域的QPM光栅示意图Fig. 5 The schematic diagram of the π relative phase shift of QPM grating

4 数学模拟结果

选取采用质子交换淬火法制备的 z 切PPLN光波导,波导宽度为 $8\text{ }\mu\text{m}$,深度为 0.6 nm , $0.77\text{ }\mu\text{m}$ 波段的泵浦光和 $1.545\text{ }\mu\text{m}$ 波段的信号光与转换光(差频光)在此波导中都以TM基模传播.波导的反转周期 $\Lambda=15.310\text{ }\mu\text{m}$,对应的匹配波长为 $\lambda_{\text{pump}}=775.0\text{ nm}$, $\lambda_{\text{signal}}=1545\text{ nm}$, π 相移域的数量和分布参数见图6:曲线(1): $m=0$, $L_1=L$;曲线(4): $m=3$, $L_1=0.051L$, $L_2=0.149L$, $L_3=0.685L$, $L_4=0.115L$;曲线(5): $m=4$, $L_1=L_5=0.051L$, $L_2=L_4=0.149L$, $L_3=0.600L$.当

没有 π 相移域被引入时($m=0$),长度为 $L=50\text{ mm}$ 的波导,3 dB带宽约为 0.52 nm ;当引入4个 π 相移域并以恰当的方式分布时,曲线的3 dB带宽增加到约 2.0 nm ,1 dB带宽增加到约 1.7 nm ,带宽和平坦性都大为提高,带宽提高1倍以上.在带宽得到提高的同时,转换效率却有所下降,可以证明对于确定长度的波导,不管如何修改QPM光栅,波长调谐曲线所围成的面积总是一定的,所以要增加带宽,就必须牺牲一定的转换效率,这种牺牲是可以通过其他手段来弥补的,如通过提高泵浦光的功率来提高转换效率.

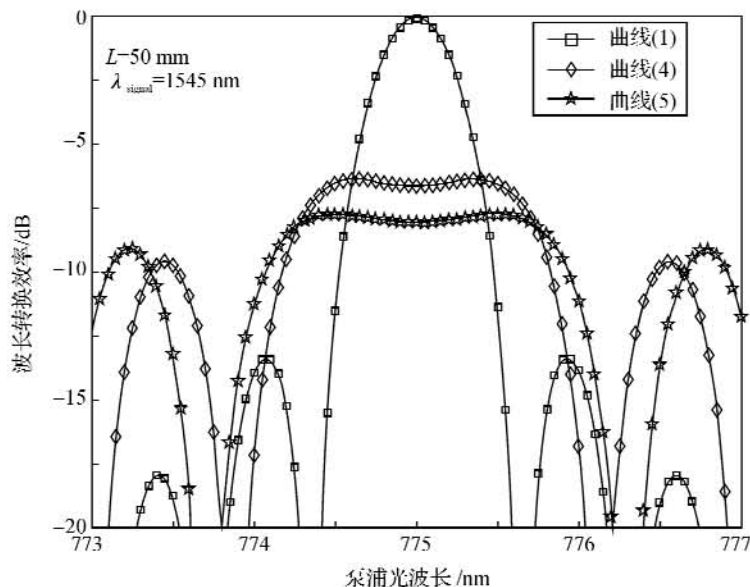


图6 转换效率随泵浦波长的变化曲线

Fig. 6 Relationship between converter efficiency and pump-wavelength

5 结 语

本文针对全光波长转换中泵浦带宽的改善方法进行了深入的研究,论证了在QPM光栅中引入一定数量的 π 相移域,并使其按非周期性分布,对波长变化导致的相位失配进行均衡,从而增加泵浦带宽与调谐能力的方案.研究表明该方案可使波长调谐曲线的宽度和平坦性都得到很大提高,泵浦带宽增加约4倍.如果同时对QPM光栅波导进行小范围的温度调节和控制,可以较简单地实现泵浦波长的宽带连续可调谐.本文分析结果对于解决DFG-AOWC的泵浦带宽问题具有较大的意义.

参考文献:

- [1] Brener I, Chou M H, Peale D, et al. Cascaded $\chi^{(2)}$ wavelength converter in LiNbO₃ waveguides with counter-propagating beams[J]. Elec Lett, 1999, 35: 1155-1157.
- [2] Chou M H, Hauden J, Arbores MA, et al. 1.5 μm -band wavelength converter based on difference-frequency generation in LiNbO₃ waveguides with integrated coupling structures[J]. Opt Lett, 1998, 23:1004-1006.
- [3] 于文兵,孙军强,刘威.基于DFG-AOWC的泵浦带宽与调谐研究[J].湖北工学院学报, 2004, 19(5): 37-39.
- [4] 李淳飞.非线性光学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2005. 29-32.

Study of all-optical wavelength conversion technology based on the cascaded second-order nonlinear effect

YU Wen-bing, XIA Sou-zhi

(School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The paper analyzes the reason of producing the limited pump bandwidth and signal bandwidth on all optical wavelength conversion based on the cascaded second order nonlinear effect, and proves the function of increasing the variable pump wavelength range if the π relative phase shift nonperiodically is introduced in QPM grating waveguides. The results show a flat tuning curves over a wide bandwidth are achieved, and the pump bandwidth increased by over 400%.

Key words: all optical wavelength conversion; difference frequency generation; quasi phase matching

本文编辑:萧 宁



(上接第103页)

5 结 语

数据字典标准化的核心就是要建立在企业范围内可共享使用的标准数据字典库。在分析企业数据字典的现状和其标准化工作流程的基础上,对数据字典标准化管理平台的设计方案进行了深入探讨。本设计方案的提出,为企业建设全面的信息标准化管理平台提供了思路和经验。

参考文献:

[1] 吴志刚,林 宁.信息共享、业务协同的前提——数

据标准化[J]. 信息技术与标准化, 2003, (1): 43-44.

[2] 周 平,刘 强.基于Turbin的数据字典管理系统模型[J]. 计算机应用软件, 2007, 24(4): 75-77.

[3] 刘若梅,蒋景瞳.中国地理信息元数据标准研究[M]. 北京:科学出版社, 2000. 1-5.

[4] 张海藩.软件工程导论[M]. 北京:清华大学出版社, 2003. 37-39.

[5] 孔祥麟,马玉鹏,李英凡.异构数据库中的数据类型转换[J]. 计算机应用研究, 2006, 23(4): 217-218.

[6] 郭胜辉,孙玉芳.基于数据字典库的信息系统的设计[J]. 计算机学报, 2000, 23(4): 414-418.

The solution of enterprise standardized data dictionary management platform

LIU Xiao-hua

(School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Combining the reality of enterprise information based construction, the article research how to set up standardized management platform of data dictionary. The platform manages the data dictionary of present information systems and establishes the standardized repository of data dictionary. According to the established data dictionary standardization, we can create a normal database for new information system. With the platform, all the data structural information is to be under unified plan and management and can be issued immediately. The article tells about the design plan of standardized management platform for data dictionary through process analysis, function analysis and design solution.

Key words: standardize; data dictionary; management platform

本文编辑:陈晓革