

文章编号: 0253-2239(2005)05-651-4

准相位匹配级联二阶非线性全光波长转换研究*

罗勇锋^{1,2} 陈云琳^{1,2*} 袁建伟^{1,2} 张万林¹ 郭娟^{1,2} 陈绍林¹ 许京军¹ 张光寅¹

(¹南开大学物理科学学院 弱光非线性光子学材料先进技术及制备教育部重点实验室, 天津 300071)
(²山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

摘要: 对基于级联和频差频非线性效应铌酸锂光波导新型全光波长转换器进行了理论研究。这种新型波长转换器需要两束抽运光源, 它将输入的抽运光波长置于信号光波段窗口的两边, 抽运光波长与信号光波长相近容易实现最佳耦合又不会占用信号波段, 而且具有偏振不敏感的优点。从建立级联和频差频铌酸锂光波导全光波长转换器的理论模型出发, 给出了波导中光相互作用的耦合模方程; 利用逐步法详细推导了耦合模方程的解, 得出了物理意义清晰的转换光功率表达式, 分析了非线性晶体相互作用长度、抽运光功率对转换效率的影响, 为级联和频差频铌酸锂光波导全光波长转换器优化设计提供了理论依据。

关键词: 非线性光学; 全光波长转换器; 级联和频差频; 准相位匹配

中图分类号: O437; TN252 文献标识码: A

Study of Quasi-Phase-Matched Cascaded $\chi^{(2)}$ All-Optical Wavelength Conversion

Luo Yongfeng^{1,2} Chen Yunlin^{1,2} Yuan Jianwei^{1,2} Zhang Wanlin¹ Guo Juan^{1,2}

Chen Shaolin¹ Xu Jingjun¹ Zhang Guangyin¹

(¹The Key Lab of ATF-WL-NPM, College of Physics, Nankai University, Tianjin 300071)
(²Key Lab of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract: A novel all-optical wavelength conversion (AOWC) based on the cascaded sum frequency generation (SFG) and difference frequency generation (DFG) in LiNbO₃ waveguides have been theoretically studied. This novel wavelength convertor employing two pump sources places the two input pump wavelengths outside the optical communication band. It is easily realize optimum coupling between pump wavelengths and signal wavelength since their wavelengths are relatively close to each other and the pump wavelenths do not occupy the communication band and the convertor has a characteristic of polarization-insensitive. The theoretical model of the AOWC is established and the coupled-mode equations of optical interaction in waveguide are given out. Then the solutions of coupled-mode equations are in detail deduced step by step and an electric field expression of clear physical insight is obtained. The effects of the device length and the pump powers on the conversion efficiency are analyzed, and it offers theoretical foundation for the optimum frabrication parameters for stable and highly efficient AOWC.

Key words: nonlinear optics; all-optical wavelength conversion; cascaded sum frequency generation and difference frequency generation; quasi-phase-matching

1 引 言

全光波长变换器是未来波分复用光网络的关键器件之一。近年来, 由于铌酸锂晶体光波导制作工艺成熟特别是外加电场周期性极化铌酸锂的迅速发展,

实现铌酸锂准相位匹配全光波长转换器研究倍受关注^[1~4]。二阶非线性差频^[5]和级联倍频差频^[6,7]方法经常在准相位匹配波长变换中应用。在通信波段中, 对差频波长变换器, 波长为775 nm抽运光, 而在级联

* 国家自然科学基金(10174040, 90101022)、天津市重点自然科学基金(033800111)、天津市国际合作项目和晶体材料国家重点实验室开放项目资助课题。

作者简介: 罗勇锋(1976~), 男, 湖南邵阳人, 南开大学物理学院光子学中心研究生, 主要从事全光波长转换研究。

** 通信联系人。E-mail: ylchen@nankai.edu.cn

收稿日期: 2004-06-03; 收到修改稿日期: 2004-09-27

倍频差频中,抽运光波长为1550 nm。一般地讲,差频波长转换器有更高的转换效率,但由于抽运光(1550 nm)和信号光(775 nm)波长差太大,所以在同一波导中很难获得两光波的最佳耦合。另一方面,级联倍频差频波长转换器中两光波很容易耦合进光波导,因为他们的光波长非常接近。但是抽运光波长必须设置在通信波段内,这样抽运光至少需要占用一个信道,这在实际应用中成了转换结构主要的障碍;另外,目前大多数准相位匹配波长变换器输出信号对输入信号偏振敏感,极大地限制了实际应用,而且高功率单模激光器又比较昂贵,因此寻找一种优于差频波长转换器和级联倍频差频的波长转换器并能够克服偏振敏感的全光波长转换器很有必要。一种新型的级联和频差频全光波长转换器^[8]弥补了上述波长转换器的不足,这种转换器需要两束抽运光,将输入的抽运光波长置于信号波段窗口的两边,这样抽运波长与信号波长相近容易实现最佳耦合又不会占用信号波段,而且具有偏振不敏感^[8]等优点,这给光通信应用技术提供了极大的方便。本文对这种新型的级联和频差频波长转换器模型进行了理论研究,对耦合模方程采用逐步法进行了详细的理论推导,并对其全光波长转换效率优化进行了理论研究。

2 理论分析

利用级联和频差频二阶非线性效应实现全光波长转换晶体结构如图1所示,晶体为周期性极化铌酸锂波导,极化周期为 $\Lambda=l_1+l_2$,每一周期分为未反转I(l_1)和极化反转II(l_2)两个部分,其工作原理是利用二阶级联非线性过程,首先两抽运光通过和频作用实现 $\omega_{SF}=\omega_{p1}+\omega_{p2}$,再由和频光和信号光通过差频过程得到转换光 $\omega_c=\omega_{SF}-\omega_s=\omega_{p1}+\omega_{p2}-\omega_s$,在每一部分中假设忽略波导中的损耗,而把传播和转换损耗集中归结到每一部分的分界面上,用透射系数 t_{12}^{oj} 和 t_{21}^{oj} ($j=p1,p2,s,SF,c$)来表示。

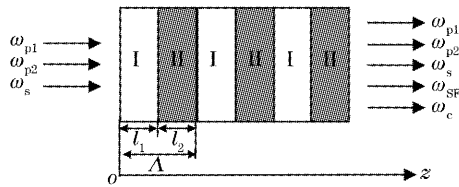


图1 准相位匹配周期极化铌酸锂光学微结构示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of quasi-phase-matched optical micro structure PPLN

当两抽运光波通过周期性极化反转结构时,为了实现有效的波长转换,必须同时满足和频过程和

差频过程中的准相位匹配条件:

$$\frac{2\pi n_{SF}}{\lambda_{SF}} - \frac{2\pi n_{p1}}{\lambda_{p1}} - \frac{2\pi n_{p2}}{\lambda_{p2}} = \frac{2\pi m}{\Lambda_{SFG}}, \quad (1)$$

$$\frac{2\pi n_{SF}}{\lambda_{SF}} - \frac{2\pi n_s}{\lambda_s} - \frac{2\pi n_c}{\lambda_c} = \frac{2\pi m}{\Lambda_{DFG}}, \quad (2)$$

(1)式、(2)式中的 m 为准相位匹配阶数,这里只需考虑一阶($m=1$)准相位匹配, n_j 为相应光波的折射率, Λ_{SFG} 、 Λ_{DFG} 为极化周期且应有 $\Lambda_{SFG}=\Lambda_{DFG}$ 。利用级联二阶非线性效应和频过程与差频过程中具有相同的极化反转周期。由能量守恒关系可以得到

$$\frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\lambda_{p1}} + \frac{1}{\lambda_{p2}} - \frac{1}{\lambda_s}, \quad (3)$$

两抽运光波长一定时,很显然转换光波长与信号光波长关于两抽运光波长平均值对称。

若非线性过程考虑平面波,在第 N 个周期中电场表达式为

$$E(z, \omega_j) = E_j(z) \exp[i(k_j z - \omega_j t + \varphi_{N,j})], \quad (4)$$

式中 $E_j(z)$ 为含有慢变振幅和相位电场, k_j 为传播常量, $\varphi_{N,j}$ 为相应部分初始相位,在慢变振幅近似下,耦合波方程为

$$\frac{\partial E_{SF}}{\partial z} = i \frac{\omega_{SF}}{n_{SF} c} d_{DF}(\omega_{SF}) E_c(z) E_s(z) e^{-i\Delta k_{DF} z} + i \frac{\omega_{SF}}{n_{SF} c} d_{SF}(\omega_{SF}) E_{p1}(z) E_{p2}(z) e^{-i\Delta k_{SF} z}, \quad (5a)$$

$$\frac{\partial E_s}{\partial z} = i \frac{\omega_s}{n_s c} d_{DF}(\omega_s) E_c^*(z) E_{SF}(z) e^{i\Delta k_{DF} z}, \quad (5b)$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial z} = i \frac{\omega_c}{n_c c} d_{DF}(\omega_c) E_s^*(z) E_{SF}(z) e^{i\Delta k_{DF} z}, \quad (5c)$$

$$\frac{\partial E_{p1}}{\partial z} = i \frac{\omega_{p1}}{n_{p1} c} d_{SF}(\omega_{p1}) E_{p2}^*(z) E_{SF}(z) e^{i\Delta k_{SF} z}, \quad (5d)$$

$$\frac{\partial E_{p2}}{\partial z} = i \frac{\omega_{p2}}{n_{p2} c} d_{SF}(\omega_{p2}) E_{p1}^*(z) E_{SF}(z) e^{i\Delta k_{SF} z}, \quad (5e)$$

(5)式中

$$\begin{cases} \Delta k_{SF} = \frac{2\pi n_{SF}}{\lambda_{SF}} - \frac{2\pi n_{p1}}{\lambda_{p1}} - \frac{2\pi n_{p2}}{\lambda_{p2}}, \\ \Delta k_{DF} = \frac{2\pi n_{SF}}{\lambda_{SF}} - \frac{2\pi n_s}{\lambda_s} - \frac{2\pi n_c}{\lambda_c}, \end{cases} \quad (6)$$

$d(\omega_j)$ 为二阶非线性系数, c 是真空中光速, k_j 为传播常量。

3 耦合模方程求解

一般为了得到高转换效率通常需要高抽运功率,因此在级联二阶非线性相互作用中我们可以假设抽运光功率远大于信号光功率和转换光功率($E_{p1}, E_{p2} \gg E_s, E_c$),这样(5a)式中的第一项可以忽略,现假设每个周期中的两部分均为无损耗的各向

同性介质,在无损耗近似下(E_{p1} , E_{p2} 及 E_s 均可视为常量),假设先发生和频效应,接着发生差频效应,这样(5)式耦合波方程简化为

$$\frac{\partial E_{SF}}{\partial z} = i \frac{\omega_{SF}}{n_{SF}c} d_{SF}(\omega_{SF}) E_{p1}(z) E_{p2}(z) e^{-i\Delta k_{SF}z}, \quad (7a)$$

$$\frac{\partial E_c}{\partial z} = i \frac{\omega_c}{n_c c} d_{DF}(\omega_c) E_s^*(z) E_{SF}(z) e^{i\Delta k_{DF}z}, \quad (7b)$$

对整个周期性结构来说,必须考虑到在 I 部分和 II 部分之间边界条件,在第 $N-1$ 个周期 II 部分和第 N 个周期的 I 部分界面边界条件为

$$E'_j[(N-1)\Lambda] = t_{21}^{\omega_j} E''_j[(N-1)\Lambda], \quad (8a)$$

$$\phi'_{N,j} = (k'_j - k''_j)(N-1)\Lambda + \phi''_{N-1,j}, \quad (8b)$$

在第 N 个周期中 I 部分和 II 部分之间的界面边界条件为

$$E''_j[(N-1)\Lambda + l_1] = t_{21}^{\omega_j} E'_j[(N-1)\Lambda + l_1], \quad (9a)$$

$$\phi''_{N,j} = (k''_j - k'_j)[(N-1)\Lambda + l_1] + \phi'_{N-1,j}, \quad (9b)$$

式中 $t_{21}^{\omega_j}$ 是频率为 ω_j 的光波从 I 部分到 II 部分传播中的透过率, $t_{12}^{\omega_j}$ 是频率为 ω_j 的光波从 II 部分到 I 部分传播中的透过率, $t_{21}^{\omega_j}$ 、 $t_{12}^{\omega_j}$ 由传播损耗和界面反射损耗决定。“'”表示 I 部分的物理量,“''”表示 II 部分的物理量。在无损耗和各向同性均匀介质中,我们假设 $t_{12}^{\omega_j} = t_{21}^{\omega_j} = 1$, $k'_j = k''_j = k_j$ 和 $n'_j = n''_j = n_j$ 。并令 $\beta = \exp[i(\Delta k''_{SF} l_2 + \Delta k'_{SF} l_1)]$, 由(7)式~(9)式得

$$\begin{aligned} E''_c(N\Lambda) = & \frac{\omega_{SF}^2 \omega_c^2 E_{p1}(0) E_{p2}(0) E_s^*(0)}{c^4 k'_{SF} k'_c \Delta k'_{SF} \Delta k'_{DF}} (Nd'(\omega_{SF}) d'(\omega_c) [\exp(i\Delta k'_{DF} l_1) - 1] + \\ & Nd''(\omega_{SF}) d''(\omega_c) \exp(i\Delta k''_{SF} l_2) [\exp(i\Delta k''_{DF} l_2) - 1] + \\ & [1 + (1 + \beta) + (1 + \beta + \beta^2) + \dots + (1 + \beta + \beta^2 + \dots + \beta^{N-1})] \times \\ & \{d'(\omega_{SF}) [\exp(i\Delta k'_{SF} l_1) - 1] + d''(\omega_{SF}) [1 - \exp(-i\Delta k''_{SF} l_2)]\} \times \\ & d''(\omega_c) [\exp(i\Delta k''_{DF} l_2) - 1] + \\ & [1 + (1 + \beta) + \dots + (1 + \beta + \dots + \beta^{N-2})] \times \\ & \{d'(\omega_{SF}) [\exp(i\Delta k'_{SF} l_1) - 1] + d''(\omega_{SF}) [1 - \exp(-i\Delta k''_{SF} l_2)]\} \times \\ & \exp(i\Delta k''_{SF} l_2) d'(\omega_c) [\exp(i\Delta k'_{DF} l_1) - 1]), \end{aligned} \quad (10)$$

(10)式有着清晰的物理意义,每一项都与周期性结构中的每个部分产生的电场有关,和频与差频在各部分交叉产生的结果,很显然,在周期性极化反转的准相位匹配的微结构中 $d' = d'' = d$, $\Delta k l_1 = \Delta k l_2 = m$ ($m = 1, 3, 5, \dots$), (10)式有最大值。在这个条件下电场表达式可以写成

$$E''_c(L) = - \frac{2\omega_{SF}^2 \omega_c^2 E_{p1}(0) E_{p2}(0) E_s^*(0)}{c^4 \pi^2 k_{SF} k_c} L^2 d(\omega_{SF}) d(\omega_c), \quad (11)$$

由转换功率定义 $P = \frac{1}{2} n c \epsilon_0 |E|^2 A_{\text{eff}}$ 可得

$$P_c(L) = \frac{16\omega_{SF}^2 \omega_c^2 P_{p1} P_{p2} P_s}{n_c n_{SF}^2 n_{p1} n_{p2} n_s c^6 \pi^4 \epsilon_0^2 A_{\text{eff}}^2} L^4 d^2(\omega_{SF}) d^2(\omega_c), \quad (12)$$

这里 n_j 为相应频率的折射率, P_c 为转换光功率, P_{p1} , P_{p2} 和 P_s 为耦合进波导时的两抽运功率和信号功率, A_{eff} 为光波导有效截面积。由(12)式可知转换功率与光波导长度 ($L = N\Lambda$) 四次方成正比;分别与两抽运光功率和信号光功率成正比, (12) 式为优化器件设计提供很好的指导,为了实现高效率波长转换,首先需要选择尽可能大的非线性系数材料,尽可能小的折射率,和尽可能大的光栅周期(尽可能小的相位失配),其次光波导长度和每部分的非线性系数必须精确控制,使得 $d' = d'' = d$, $\Delta k l_1 = \Delta k l_2 = m\pi$ ($m = 1, 3, 5, \dots$), 最后应使制约各光波的导模的因素(如光波导有效截面积)尽可能小。

4 讨 论

4.1 转换效率与相互作用长度关系

定义波长转换效率为

$$\eta = 10 \times \lg(P_c/P_s), \quad (13)$$

这里 P_c 和 P_s 分别是波长转换后输出的转换光功率和输入光波导时的信号光功率,这两个功率在实验中可以直接测量,图2为波长转换效率与非线性晶体相互作用长度之间的关系图,为了得到这个关系图,这里选取两抽运光功率和波长分别为 $P_{p1} = 5 \text{ mW}$, $\lambda_{p1} = 1528.8 \text{ nm}$; $P_{p2} = 3 \text{ mW}$, $\lambda_{p2} = 1557.3 \text{ nm}$ 。信号光波长选取 $\lambda_s = 1555.1 \text{ nm}$, 这样可以得到转换光波长 $\lambda_c = 1530.9 \text{ nm}$, 根据光波导制作参量^[9~12] 选取

$A_{\text{eff}} = 35 \mu\text{m}^2$; 选取铌酸锂非线性系数 $d(\omega_{\text{SF}}) = d(\omega_c) = 18 \text{ pm/V}$, 晶体极化反转周期 $\Lambda = 18.7 \mu\text{m}$ 。由图2可以看出波长转换效率 η 随着晶体相互作用长度 L 增加越来越缓慢, $L = 4.5 \text{ cm}$, $\eta = -28.5 \text{ dB}$, 波长转换效率理论值与文献[8]中实验值 -32 dB 基本吻合。在 $0 \sim 4 \text{ cm}$ 时波长转换效率随相互作用长度变化显著, 此后转换效率增加缓慢, 也就是说在实验中应该选取适当的晶体长度, 在通信波段选取 $4 \sim 6 \text{ cm}$ 晶体相互作用长度即可。

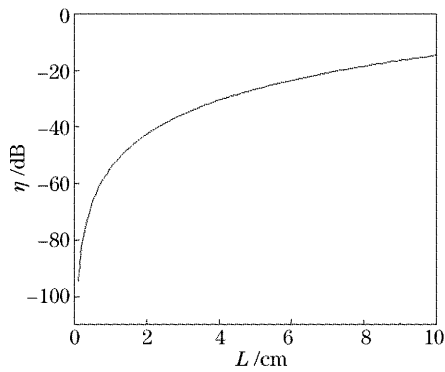


图2 晶体长度与转换效率关系图

Fig. 2 Relation of crystal interaction length and conversion efficiency

4.2 转换效率与抽运功率关系

选取非线性晶体相互作用长度 $L = 2.5 \text{ cm}$ 和 4.5 cm 以便进行比较, 两抽运光功率(为了方便起见, 这里选取 dBm 作为功率单位)变化, 其他条件与前面 4.1 讨论相同。由此可以得到转换效率与两抽运光功率之和 ($P_{\text{p1}} + P_{\text{p2}}$) 的关系图 3, 实线为 $L = 4.5 \text{ cm}$, 虚线为 $L = 2.5 \text{ cm}$, 由图 3 也验证了 4.1 小节得出的结论, 两抽运功率之和与波长转换效率成正比, 因此为了得到较高的波长转换效率, 应使两抽运光功率之和尽可能的大。

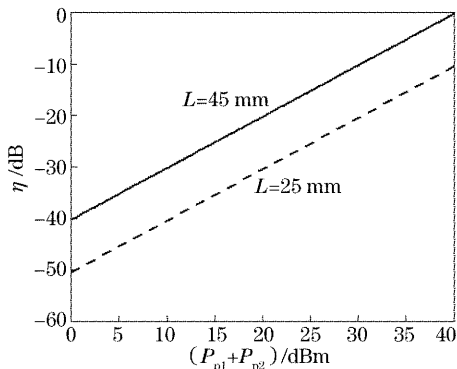


图3 两抽运光功率与转换效率关系图

Fig. 3 Relation of two pump powers (in dBm) and conversion efficiency

5 结 论

本文从理论上研究了级联和频差频铌酸锂光波导全光波长转换器。首先从耦合模方程出发, 得出物理意义清晰的波长转换光功率表达式, 分析得出波长转换效率 η 随着晶体相互作用长度 L 增加而增大的规律, 并指出实验中需适当选择晶体长度和应尽量使用功率较大的抽运源。为优化设计级联和频差频铌酸锂光波导全光波长转换器提供了依据。

参 考 文 献

- 1 K. R. Parameswaran, M. Fujimura, M. H. Chou *et al.*. Low-power all-optical gate based on sum frequency mixing in APE waveguides in PPLN[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6): 654~656
- 2 Y. L. Chen, J. J. Xu, X. Z. Zhang *et al.*. Ferroelectric domain inversion in near-stoichiometric lithium niobate for high efficiency blue light generation[J]. *Appl. Phys. (A)*, 2002, **74**(2): 187~190
- 3 Chen Yunlin, Liu Xiaojuan, Guo Juan *et al.*. The study of all-optical switching of LiNbO₃ based on cascading of second-order nonlinearity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1667~1671 (in Chinese)
陈云琳, 刘晓娟, 郭娟等. 级联二阶非线性铌酸锂全开光的研制[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1667~1671
- 4 Chen Yunlin, Ni Wenjun, Wang Dongmei *et al.*. Theoretical analysis of LN waveguide second harmonic generation quasi phase matched with ferroelectric domain inversion gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 1998, **A25**(5): 448~452 (in Chinese)
陈云琳, 倪文俊, 王冬梅等. 准相位匹配 LN 倍频波导铁电畴反转光栅的研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(5): 448~452
- 5 M. H. Chou, I. Brener, M. M. Fejer *et al.*. 1.5- μm -band wavelength conversion based on cascaded second-order nonlinearity in LiNbO₃ waveguides[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 653~655
- 6 S. A. Podoshvedov. Energy conversion and all-optical switching in three-wave mixing in crystal with periodical modulation of $\chi^{(2)}$ susceptibility[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **189**(3): 365~375
- 7 I. Crisiani, C. Liberale, V. Degiorgio *et al.*. Nonlinear characterization and modeling of periodically poled lithium niobate waveguides for 1.5- μm -band cascaded wavelength conversion [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **187**(2): 263~270
- 8 Y. Wang, B. Chen, C.-Q. Xu *et al.*. Polarisation-insensitive QPM wavelength converter with out-of-band pump[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(3): 189~190
- 9 Li Yushan, Duo Tian, Bang Xiong *et al.*. Proton-exchanged LiTaO₃ optical waveguides in pyrophosphoric acid [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(11): 1016~1020 (in Chinese)
李玉善, 多田, 邦雄等. 焦磷酸质子交换 LiTaO₃ 光波导[J]. *光学学报*, 1991, **11**(11): 1016~1020
- 10 Chen Yunlin, Ni Wenjun, Zhao Yuqiang *et al.*. Growth mechanism of proton-exchanged waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1261~1264 (in Chinese)
陈云琳, 倪文俊, 赵玉强等. 质子交换光波导生长机理的研究 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1261~1264
- 11 Chen Yunlin, Guo Juan, Liu Xiaojuan *et al.*. A study on periodic poling of different compositions of MgO:LiNbO₃ [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(1): 156~159 (in Chinese)
陈云琳, 郭娟, 刘晓娟等. 周期极化掺镁不同组分 LiNbO₃ 晶体的研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(1): 156~159
- 12 Chen Yunlin, Xu Jingjun, Song Feng *et al.*. Study on technology of periodic poling bulk LiNbO₃ by applying external field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 618~620 (in Chinese)
陈云琳, 许京军, 宋峰等. 外加电场极化法制备 LiNbO₃ 周期性畴反转的工艺研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5): 618~620