

文章编号:1001-9014(2004)05-0367-04

准相位匹配 LiNbO_3 波导全光波长变换的理论研究

陈云琳, 罗勇锋, 郭娟, 袁建伟, 张万林, 刘晓娟, 许京军, 张光寅
(南开大学 物理科学学院, 天津 300071)

摘要:对周期性极化 LiNbO_3 (PPLN) 光波导实现准相位匹配全光波长变换进行了理论研究, 得出了提高准相位匹配和全频光波长变换效率的有效途径, 为准相位匹配全光波长变换器的研制提供了理论指导.

关键词:波长变换; 准相位匹配; LiNbO_3

中图分类号: O437.1; TN773.1; TN252 **文献标识码:** A

THEORETICAL RESEARCH OF QUASI-PHASE-MATCHED ALL-OPTICAL WAVELENGTH CONVERSION IN LiNbO_3 WAVEGUIDES

CHEN Yun-Lin, LUO Yong-Feng, GUO Juan, YUAN Jian-Wei
ZHANG Wan-Lin, LIU Xiao-Juan, XU Jing-Jun, ZHANG Guang-Yin
(Institute of Physical Science, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Periodically poled LiNbO_3 (PPLN) waveguide quasi-phase-matched all-optical wavelength conversion was studied theoretically. The analysis suggests useful criteria for the optimization of the fabrication parameters in order to enhance the efficiency of quasi-phase-matched wavelength conversion processes.

Key words: wavelength conversion; quasi-phase-matched (QMP); LiNbO_3 .

引言

通信市场对网络高容量的需求大大推动了波分复用(WDM)技术的发展. 在 WDM 网络中, 可使用的波长数目决定了信道的容量, 由于受诸多因素的影响, 造成目前光通信中的可用的波长数不能满足大量节点应用. 在这种情况下, 当相同波长的两个信道争用同一输出端时, 可能出现阻塞, 解决这些问题的有效方法之一是采用全光波长变换器(AOWC)^[1]. AOWC 把带有信号的从一个光波长(λ_1)变换为另一波长(λ_2), 实现波长的再利用和再分配, 避免了波长争用, 提高了网络系统的容量. 近年来发展了多种全光波长变换技术, 有基于半导体光放大器(SOA)全光波长变换器^[2], 基于 SOA 的交叉相位调制波长变换器^[3], 利用带有可饱和吸收段的分布 Bragg 反射腔激光器的波长变换器^[4], 利用

光纤的 $x^{(3)}$ 通过四波混频(FWM)机理实现的波长变换器^[5]和利用二阶非线性光学晶体的波长(频率)变换器^[6]. 利用晶体二阶非线性的波长变换器主要优点是具有对高速率信号的波长变换能力(10Gb/s 以上)、较宽的波长变换范围且可以同时以相同效率实现多波长变换、低噪声、低啁啾输出、无附加放大自发辐射、光波的强度和相位信息在相互作用中保持全部透明.

本文对应用周期性极化二阶非线性 LiNbO_3 光波导实现准相位匹配全光波长变换开展了理论研究. 首先在 z -切 PPLN 波导中利用和频效应给出了耦合模方程, 并就信号光强改变与不变两种情况分别给出了输出和频光波功率的近似表达式, 然后对影响波长变换效率的各参量进行了讨论, 最后总结出提高准相位匹配和频全光波长变换效率的有效途径.

收稿日期: 2003-11-12, 修回日期: 2004-03-12

Received date: 2003-11-12, revised date: 2004-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(10174040), 天津市重点自然科学基金与天津市国际合作项目(033800111).

作者简介: 陈云琳(1965-), 女, 北京人, 南开大学物理学院光电研发中心副教授, 博士, 主要从事非线性光学, 光电材料和器件方面的研究.

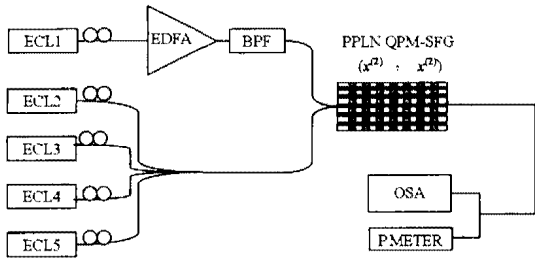


图1 实现全光波长变换的示意图
Fig. 1 Diagrammatic sketch of realizing all-optical-wavelength conversion

1 理论分析

图1是实现准相位匹配全光波长变换的实验示意图。图中包括腔外激光器(ECL)、掺铒放大器(EDFA)、滤波器(BPF)、PPLN波导准相位匹配全光波长变换器、光谱分析器(OSA)和功率计等器件。PPLN全光波长变换的结构如图2所示,其中 Λ 为光栅周期, L 为相互作用长度。 z -切LiNbO₃基片的厚度为0.5mm,长为15mm,宽为19mm。

准相位匹配全光波长变换器和频波长变换的机理为:一束波长与角频率分别为 λ_r, ω_r 的信号光和一束光波长与角频率为 λ_p, ω_p 的泵浦光同时入射耦合到同一波导中,且这两光波均为TM模。通过利用LiNbO₃晶体的最大非线性系数 d_{33} 实现准相位匹配和频效应,将产生一个波长为 λ_s 、角频率为 ω_s 的和频输出光波。

当泵浦光波与信号光波通过PPLN结构实现准相位匹配产生和频输出光波 λ_s 时,泵浦光波、信号光波与和频光波间的相位失配为:

$$\Delta k = k_s - k_r - k_p - \frac{2\pi m}{\Lambda} \quad (1)$$

其中 $k_i = \frac{2\pi n_i}{\lambda_i}$ ($i = s, r, p$)为光波的传播常数, m 为准相位匹配阶数。若不考虑波导损耗,耦合过程中能量守恒,则有

$$\omega_r + \omega_p = \omega_s \quad (2)$$

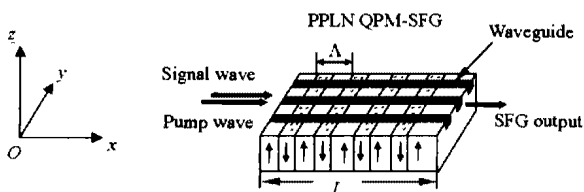


图2 PPLN全光波长变换的结构示意图
Fig. 2 Diagrammatic sketch of PPLN all-optical wavelength conversion

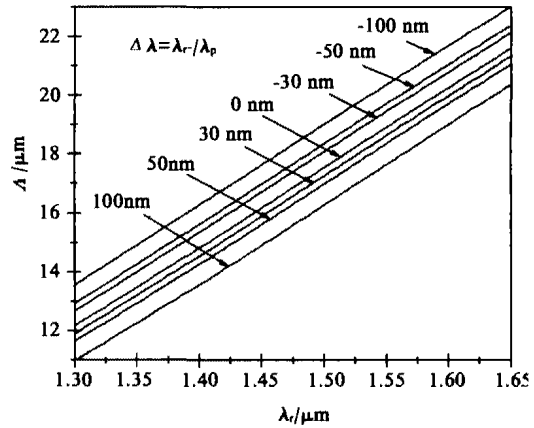


图3 QPM光栅周期与信号光波长关系
Fig. 3 Relation of QPM grating period and signal wavelength

因此和频变换的光波波长为:

$$\lambda_s = \frac{\lambda_r \lambda_p}{\lambda_r + \lambda_p}$$

在一阶准相位匹配情况下:

$$\frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_r}{\lambda_r} - \frac{n_p}{\lambda_p} = \frac{1}{\Lambda} \quad (3)$$

当不同波长的信号光和泵浦光同时入射耦合到同一波导中实现 λ_r, λ_p 与 λ_s 间的准相位匹配时,需要不同的光栅周期 Λ ,图3是准相位匹配光栅周期 Λ 与红外信号光波长 λ_r 之间的关系图。

在PPLN波导中考虑两个TM模与一个TE模的非线性耦合过程,两个TM模耦合而产生第三个不同频率的TE模,这个过程可用这三个模的非线性作用耦合模方程来描述,在波导无损耗条件下,耦合模方程组可写成:

$$\frac{d}{dx}[A_r] = -i\omega_r \kappa^* \exp(i\Delta kx) [A_s][Z_p A_p^*] \quad (4)$$

$$\frac{d}{dx}[A_p] = -i\omega_p \kappa^* \exp(i\Delta kx) [A_s][Z_r A_r^*] \quad (5)$$

$$\frac{d}{dx}[A_s] = -i\omega_s Z_s \kappa \exp(-i\Delta kx) [Z_r A_r][Z_p A_p] \quad (6)$$

式中 A_r, A_p, A_s 分别表示信号光、泵浦光与和频输出光的振幅, $\Delta k = \frac{2\pi n_s}{\lambda_s} - \frac{2\pi n_r}{\lambda_r} - \frac{2\pi n_p}{\lambda_p} - \frac{2\pi}{\Lambda}$, Z_i 为各模

的波阻抗($i = r, p, s$), $Z_r = \frac{k_r}{\omega_r \epsilon_0 n_r^2}$, $Z_p = \frac{k_p}{\omega_p \epsilon_0 n_p^2}$, $Z_s = \frac{\omega_s \mu_0}{k_s}$, κ 为耦合系数, $\kappa^2 = \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{3/2} \frac{d_{33}^2 (16\omega_s)^2}{\pi^3 n_s n_p n_r}$

$\frac{W_{yp} W_{zp}}{(W_{yr}^2 + W_{yp}^2)(W_{zr}^2 + W_{zp}^2)}$, W_{yp}, W_{zp} 是泵浦光的导模相互作用有效宽度和深度,大小为相应方向泵浦光强

度分布全宽的 $1/e^2$, 同样 W_r, W_p 是信号光与和频光的导模相互作用有效宽度和深度. 小信号近似下由于泵浦光较强, 在耦合过程中可以认为不变, 即:

$$A_p(x) = A_p(0) \quad , \quad (7)$$

则耦合模方程(4),(5),(6)可以简化为:

$$\frac{d}{dx}[A_r] + i\Gamma_r[A_s] \exp(i\Delta kx) = 0 \quad , \quad (8)$$

$$\frac{d}{dx}[A_s] + i\Gamma_s[A_r] \exp(-i\Delta kx) = 0 \quad , \quad (9)$$

式中 $\Gamma_r = \omega_r \kappa^* Z_p [A_p(0)]$, $\Gamma_s = \omega_s \kappa Z_s Z_p [A_p(0)]$

设 $A_r(x) = a_r \exp(i\frac{\Delta k}{2}x)$, $A_s(x) = a_s \exp(-i\frac{\Delta k}{2}x)$

代入式(8), 式(9)得到:

$$\frac{da_r}{dx} + i\frac{\Delta k}{2}a_r = -i\Gamma_r a_s \quad , \quad (10)$$

$$\frac{da_s}{dx} - i\frac{\Delta k}{2}a_s = -i\Gamma_s a_r \quad , \quad (11)$$

对式(10)和(11)求解, 得

$$A_s(L) = -i \exp(-i\Delta kL/2) \omega_s \kappa Z_s Z_p A_p(0) Z_r A_r(0) L \left(\frac{\sin(L\sqrt{(\Delta k/2)^2 + \Gamma_r \Gamma_s})}{L\sqrt{(\Delta k/2)^2 + \Gamma_r \Gamma_s}} \right) \quad , \quad (12)$$

和频光功率为:

$$P_s = \kappa^2 L^2 P_r P_p \left(\frac{\sin(L\sqrt{(\Delta k/2)^2 + \Gamma_r \Gamma_s})}{L\sqrt{(\Delta k/2)^2 + \Gamma_r \Gamma_s}} \right)^2 \quad , \quad (13)$$

在耦合过程中, 若信号光强不变, 即 $A_r(x) = A_r(0)$

则耦合模方程(4),(5),(6)可简化为:

$$\frac{d}{dx}[A_s] = -i\omega_s Z_s \kappa \exp(-i\Delta kx) [Z_r A_r(0)] [Z_p A_p(0)] \quad , \quad (14)$$

可解得

$$A_s(L) = -i \exp(-i\Delta kL/2) \omega_s Z_s \kappa Z_p A_p(0) Z_r A_r(0) L \left(\frac{\sin\Delta kL/2}{\Delta kL/2} \right) \quad , \quad (15)$$

和频光功率为:

$$P_s = \kappa^2 L^2 P_r P_p \left(\frac{\sin(\Delta kL/2)}{\Delta kL/2} \right)^2 \quad , \quad (16)$$

2 光波导制作

与通常的苯甲酸质子交换技术相比, 以焦磷酸($H_4P_2O_7$)为质子源制作的 LiNbO₃ 光波导具有传输损耗低、光损伤小、电光系数劣变小、在 300℃ 以下的交换温度下挥发量极小、工艺上可做到易操作和控制^[7-8]. 所以本文采用焦磷酸作为交换源, 实现 H

离子和 z 切 LiNbO₃ 表面的 Li 离子进行交换, 质子交换后在 LiNbO₃ 表面形成 Li_{1-x}H_xNbO₃ 薄膜组织. 为了使 Li_{1-x}H_xNbO₃ 质子交换光波导维持单一偏振, 本文采用表 1 所列的参数制作退火质子交换光波导.

表 1 质子交换光波导制作参数

Table 1 Fabrication parameter for proton-exchange waveguide

| 制作参数 | 对应数值 |
|--------------------------|--------------------|
| 质子交换源 | 焦磷酸($H_4P_2O_7$) |
| 条波导宽度(μm) | 7 |
| 交换深度(μm) | 5 |
| 交换温度($^\circ\text{C}$) | 220 |
| 交换时间(h) | 0.5 |
| 退火温度($^\circ\text{C}$) | 300 |
| 退火时间(h) | 1.5 |

3 讨论

准相位匹配和频全光波长变换效率定义为:

$$\eta = \frac{P_s}{P_r P_p} \times 100\% \quad (17)$$

在理论分析中, 式(13)、(16)给出了两种不同情况下的和频输出功率表达式, 理论分析表明若要得到较高的变换效率, 在耦合过程中则需尽量保持信号光功率不变, 以下就式(16)在小信号近似下展开讨论:

(1) PPLN 波导长度对变换效率的影响

在一阶准相位匹配条件下 $\Delta k = 0$, 由式(16)可知相互作用长度 L 的平方与变换效率关系式为 $P_s/P_r P_p = \kappa^2 L^2$, 可知相互作用长度越长, 变换效率越高, 不过在这里我们忽略波导损耗, 与实际情况有差别, 图 4 为归一化 SFG 变换效率 η 与相互作用长度 L 的关系图.

(2) 光栅周期 Λ 对变换效率的影响

$\Lambda_{\text{SFG}} = 18.20 \mu\text{m}$, 无损耗, 在室温下, 对应不同相互作用 $L = 10\text{mm}, 15\text{mm}, 20\text{mm}$, 信号光波波长 $\lambda_r = 1.500 \mu\text{m}$, 光功率为 $P_r = 1.2\text{mW}$, 泵浦光波长 $\lambda_p = 1.540 \mu\text{m}$, 光功率为 $P_p = 120\text{mW}$, 输出的归一化波长变换功率与极化反转光栅周期 Λ_{SFG} 的关系如图 5 所示, 从图 5 可见, 对于一定的信号光波长, 只有相应的光栅周期才能满足准相位匹配条件, 所以对于不同波长的信号光, 需要不同的光栅周期, 因此在制作准相位匹配全光波长变换器时最好将 PPLN 光栅做成扇形, 这样就可以满足各种不同波长变化

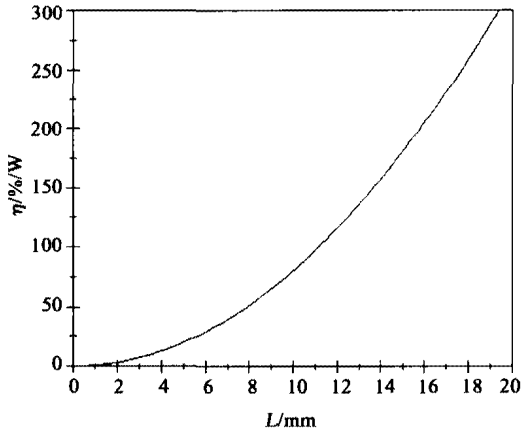


图4 相互作用长度 L 与归一化效率的关系
Fig.4 Relation of device length and normalized SFG efficiency

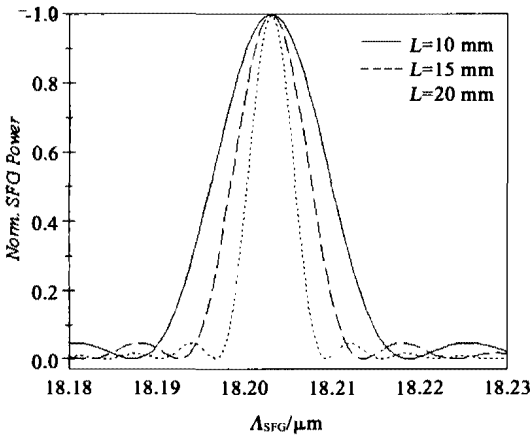


图5 光栅周期 Λ 与归一化功率的关系
Fig.5 Relation of grating period Λ and normalized SFG power

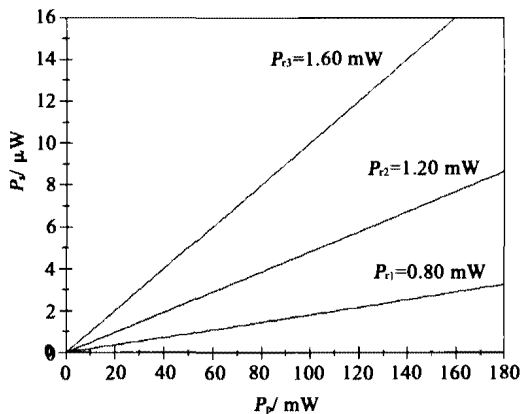


图6 泵浦光、信号光与和频输出光功率之间的关系
Fig.6 Relation of pump power, signal power and SFG power

(3) 泵浦光功率对变换效率的影响

将信号光功率分别固定在 0.8、1.2、1.6mW, 相互作用长度为 $L = 15\text{mm}$, 泵浦光功率 P_p 与和频输出功率 P_s 之间的关系如图 6, 图 6 表明在其他条件不变的情况下泵浦光功率越强, 和频光功率越大, 同样信号光功率越强, 和频光功率越大. 一般在小信号 ($\sim 1\text{mW}$) 情况下, 和频光功率为十几微瓦.

综上所述, 为了得到较高变换效率, 需要保持信号光功率不变, 但是光传播是有损耗的, 所以不是相互作用越长越好, 为了使各种不同波长的信号光波实现准相位匹配, LiNbO_3 周期极化光栅可制作成扇形.

4 结语

本文对在 z-切 PPLN 光波导中利用准相位匹配技术实现全光波长变换进行了理论研究和定性分析, 通过准相位匹配和频效应计算出两 TM 模耦合成 TE 模的波长变换效率, 讨论了影响波长变换效率的各种因素, 所有这些研究对制作准相位匹配全光波长变换器起到指导作用.

REFERENCES

- [1] Chou M H, Brener I, Fejer M M. 1.5- μm -band wavelength conversion based on cascaded second-order nonlinearity in LiNbO_3 waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 1999, **11**(6): 653—655.
- [2] Inoue K, Mukai T. Nearly degenerate four-wave mixing in a traveling-wave semiconductor laser amplifier[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(14): 1051—1053.
- [3] Kawaguchi H, Oe K. Tunable optical-wavelength conversion using a multielectrode distributed-feedback laser diode with a saturable absorber[J]. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(20): 1088—1089.
- [4] Takahata K, Kasaya K. Wavelength dependence of optical frequency conversion device with asymmetric κ -DBR structure[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(22): 2078—2079.
- [5] Provost J G, Frey R. Cavity-enhanced highly nondegenerate four-wave mixing in GaAlAs semiconductor lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(6): 519—521.
- [6] Xu C Q, Okayama H. 1.5 μm band efficient broadband wavelength conversion by difference frequency generation in a periodically domain-inverted LiNbO_3 channel waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(26): 3559—3561.
- [7] Li Yushan, Tada Kunio. Proton-exchanged LiTaO_3 optical waveguides in pyrophosphoric acid[J]. *Acta Optica Sinica* (李玉善, 多田邦雄, 焦磷酸质子交换 LiTaO_3 光波导. *光学学报*), 1991, **11**(11): 1016—1020.
- [8] Chen Yun-Lin, ZHANG Hui-Min, LI Shi-Chen. Proton-exchanged optical waveguides in z-cut LiNbO_3 using different acid[J]. *Optoelectronics Laser* (陈云琳, 张会敏, 李世忱, 不同质子源的 Z 切 LiNbO_3 质子交换平面光波导的研究. *光电子激光*), 1997, **8**(5): 337—343.

的需要, 以使得各种不同波长变换都达到最佳变换效率.