

1.5 μm 波段基于级联二阶非线性的铌酸锂 光波导全光波长变换的理论分析*

薛挺 于建 杨天新 倪文俊 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2001 年 6 月 13 日收到, 2001 年 7 月 26 日收到修改稿)

研究了基于级联二阶非线性的铌酸锂波导全光波长变换器的特性. 首先从耦合模方程出发, 比较了数值分析结果与小信号近似分析的结果. 其次在数值分析基础上, 分析了铌酸锂晶体的温度变化导致相应基频光波波长与极化反转光栅周期的变化关系. 最后分析了在不同相互作用长度下, 转换的光波功率与有效基频光波波长带宽、温度调谐带宽、极化反转光栅周期带宽等关系, 以对全光波长变换器件进行优化设计.

关键词: 级联二阶非线性, 波长变换, 准位相匹配, 铌酸锂 光波导

PACC: 4265, 4265K, 4280L, 4280S

1 引 言

对于波分复用光通信系统而言, 全光波长变换器是光波波长路由系统的核心器件. 目前用来实现波长变换的方案有若干种, 如: 1) 基于半导体光放大器的(SOA)波长变换器^[1,2]; 2) 利用带有可饱和吸收段的 DBR(分布 Bragg 反射腔)激光器的波长变换器; 3) 利用光纤的 $\chi^{(3)}$ 通过四波混频(FWM)机理实现波长变换; 4) 利用二阶非线性光学晶体的频率(波长)变换. 利用二阶非线性光学晶体的频率(波长)变换的主要优点是速度快、低噪声, 无啁啾, 易实现 THz 的调制带宽, 并且可以以相等的效率同时向上和向下转换多个信道(波长), 而且因为其变换机理是相干相互作用过程, 不是能级跃迁过程, 因而没有附加的放大自发辐射(ASE), 并保持着相互作用光波的强度和相位信息, 是一种全透明变换, 因此把它用于光通信波长变换器的研究应运而生. Xu 等人于 1993 年报道了在周期性极化反转的铌酸锂光波导中利用差频效应实现了 1.48—1.54 μm 的波长变换^[3], 并于 1995 年作了许多改进的工作^[4]; Chou 等人于 1998 年利用差频效应, 在周期性极化反转的铌酸锂光波导中对 1.5 μm 波段实现了波长变换^[5], 又于 1999 年利用基于级联二阶非线性效应, 对 1.55 μm 波段的

四个信道进行了波长变换^[6], 并于 2000 年成功地进行了传输实验^[7], 而且提出并实现了波长变换的偏振不敏感方案^[8]. Chistian 等人于 2001 年研究了对于不同波导掩模版开口宽度和不同极化反转周期, 倍频功率与基频光波波长的关系^[9]. Gallo 等人于 1997 年用耦合模理论对基于级联二阶非线性效应的波长变换进行了理论分析^[10], 并于 1999 年给出了在小信号近似情况下输出转换光波功率的近似表达式, 并据此讨论了单向与双向相互作用时的波长变换效率和变换带宽与相互作用长度的关系等^[11].

本文第二部分给出了全光波长变换的理论分析与耦合模方程, 第三部分给出了铌酸锂晶体的退火质子交换光波导的制作参数以及标量有限元方法的分析结果, 第四部分给出了小信号近似下的解析表达式, 并给出了耦合模方程数值分析结果. 由于小信号近似情况下忽略了倍频光波的转换损耗, 引入了较大的误差, 因此又将小信号近似解与数值解进行了比较, 并确定采用数值方法来分析基于级联二阶非线性效应的铌酸锂全光波长变换的特性; 第五部分讨论了温度调谐引起相对应的极化反转光栅周期与基频光波波长的调谐范围, 以及不同的相互作用长度下, 转换的光波功率与 3dB 基频光波波长带宽、温度调谐带宽、极化反转光栅周期带宽的关系. 最后对全文工作进行了总结.

* 天津市重点自然科学基金(批准号 99380071)资助的课题.

2 理论分析

利用级联二阶非线性效应($\chi^{(2)}:\chi^{(2)}$)来实现全光波长变换的结构如图 1 所示,其工作机理为首先利用基频光 ω_F 在周期性极化反转铌酸锂光波导中倍频,实现倍频光 $\omega_{SHG} = 2 \cdot \omega_F$ 输出,然后倍频光波

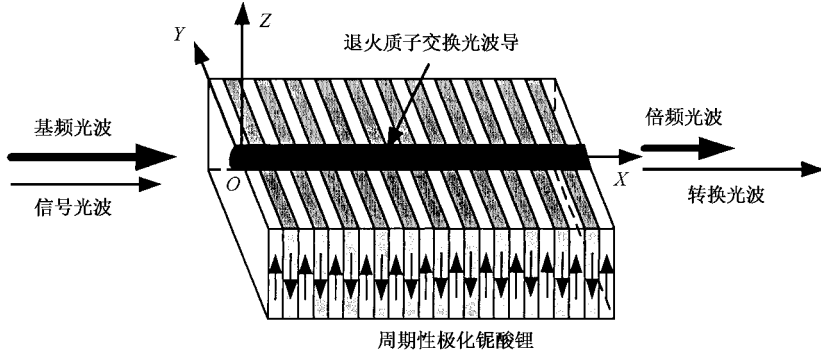


图 1 铌酸锂全光波长变换的结构示意图

当基频光波通过周期性极化反转结构时,倍频光波与基频光波的位相失配可描述为

$$\Delta\beta_{SHG} = \beta_{SHG} - 2\beta_F - 2\pi m/\Lambda_{SHG}, \quad (1)$$

其中 β_{SHG} 为倍频光波的传播常数, β_F 为基频光波的传播常数, m 为位相匹配阶数。由于铌酸锂晶体具有二阶非线性效应,基频光波转换为倍频光波效率非常高,当倍频光波 ω_{SHG} 与基频光波 ω_F 达到位相匹配时,即 $\Delta\beta_{SHG} = 0$ 时,此时所对应的一阶($m = 1$)极化反转周期为

$$\Lambda_{SHG} = \frac{\lambda_F/2}{N_{SHG} - N_F}, \quad (2)$$

其中 N_{SHG} 和 N_F 分别为倍频光波和基频光波在铌酸锂光波导中的 0 阶 TM 模折射率, λ_F 为基频光波的波长。

又倍频光波 ω_{SHG} 与信号光波 ω_S 、转换光波 ω_{DFG} 的差频位相失配为

$$\Delta\beta_{DFG} = \beta_{SHG} - \beta_S - \beta_{DFG} - 2\pi m/\Lambda_{DFG}, \quad (3)$$

其中 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。在这种波长变换器件中,有 $\Lambda_{SHG} = \Lambda_{DFG}$,利用级联二阶非线性效应即是利用倍频过程与差频过程中具有相同的极化反转周期。由能量守恒关系有

$$1/\lambda_{DFG} = 2/\lambda_F - 1/\lambda_S, \quad (4)$$

因此转换光波的波长为

ω_{SHG} 与信号光波 ω_S 相互作用,产生转换的差频光波 ω_{DFG} ,差频光波 ω_{DFG} 再与倍频光波 ω_{SHG} 作用产生信号光波 ω_S ,如此循环往复,倍频光波 ω_{SHG} 的能量被转换到差频光 ω_{DFG} 与信号光波 ω_S 中,从而实现了波长变换(以下将差频光波 ω_{DFG} 称为转换光波)。当基频光功率足够大或相互作用长度足够长时,还可以得到放大的信号光波与转换光波。

$$\lambda_{DFG} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{SHG}} - \frac{1}{\lambda_S}} \approx \lambda_{SHG} - \lambda_S,$$

其中 λ_{SHG} 与 λ_S 分别为倍频光波和信号光波在真空中的波长。

令 $\lambda_S = \lambda_F + \delta\lambda$,可得 $\lambda_{DFG} \approx \lambda_F - \delta\lambda$,当 $\delta\lambda$ 与 λ_F 相比非常小时,有 $\beta_S + \beta_{DFG} \approx 2\beta_F$,因此可得 $\Delta\beta_{DFG} \approx 0$ 。即当基频光波与倍频光波在畴反转的结构中满足位相匹配时,同时也使倍频光波 λ_{SHG} 与信号光波 λ_S 的差频的位相匹配条件达到满足,则可获得二者差频后的转换光波 λ_{DFG} 的输出,实现全光波长的转换。

倍频过程中,基频光与倍频光的有效相互作用面积^[11]

$$S_{SHG} = \left[\int |\psi_F(x, y)|^2 dx dy \right] \cdot \left[\int |\psi_{SHG}(x, y)|^2 dx dy \right] / \left| \int \psi_{SHG}^*(x, y) \psi_F^2(x, y) dx dy \right|^2,$$

差频过程中,倍频光、信号光和转换光波的有效相互作用面积为

$$S_{DFG} = \left[\int |\psi_{DFG}(x, y)|^2 dx dy \right] \cdot \left[\int |\psi_S(x, y)|^2 dx dy \right] \cdot \left[\int |\psi_{SHG}(x, y)|^2 dx dy \right]$$

$$/ \left| \int \psi_{\text{SHG}}^*(x, y) \psi_S(x, y) \psi_{\text{DFG}}(x, y) dx dy \right|^2,$$

其中 ψ_j 为归一化光场振幅, $j = \text{F}, \text{SHG}, \text{S}, \text{DFG}$,

$$\iint_{-\infty}^{+\infty} \psi_j \psi_j^* dx dy = 1. \text{倍频耦合系数}$$

$$\kappa_{\text{SHG}} = d_{\text{eff}} \cdot \sqrt{\frac{2\mu_0}{c \cdot N_{\text{SHG}} \cdot N_{\text{F}}^2 \cdot S_{\text{SHG}}}},$$

差频耦合系数

$$\kappa_{\text{DFG}} = d_{\text{eff}} \cdot \sqrt{\frac{2\mu_0}{c \cdot N_{\text{SHG}} \cdot N_{\text{S}} \cdot N_{\text{DFG}} \cdot S_{\text{DFG}}}}$$

其中 c 为自由空间的光速, μ_0 为自由空间的磁导率, N_{S} 和 N_{DFG} 分别为信号光波 E_{S} 和转换光波 E_{DFG} 在铌酸锂光波导中的 0 阶 TM 模折射率. 铌酸锂进行质子交换之后, Li^+ 被 H^+ 代替, 因此质子交换部分的铌酸锂二阶非线性极化系数为零; 另外, 退火之后, 铌酸锂光波导中的有效非线性极化系数将减小为 $d_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi} d_{33}$, 其中 $d_{33} = 27 \text{pm/V}$ 为铌酸锂晶体的非线性系数. 由于质子交换深度较浅, 其中传播的导模光功率占光波导中总功率的比例较小, 因此, 光波导中的有效非线性系数可以近似用 d_{eff} 代替.

由于光波导对基频光、信号光为单模, 对倍频光为多模, 但是高阶模不满足位相匹配条件, 因此忽略高阶模影响, 仅仅考虑零阶导模之间的相互作用: $\text{TM}_{00}(\omega_{\text{F}}) + \text{TM}_{00}(\omega_{\text{F}}) \rightarrow \text{TM}_{00}(\omega_{\text{SHG}})$, $\text{TM}_{00}(\omega_{\text{S}}) + \text{TM}_{00}(\omega_{\text{DFG}}) \rightarrow \text{TM}_{00}(\omega_{\text{SHG}})$, 并考虑到各光波的传播损耗, 令光波功率, $P_j(z) = |E_j(z)|^2$, $j = \text{F}, \text{SHG}, \text{S}, \text{DFG}$, 得一阶准位相匹配条件下的耦合模方程为

$$\frac{dE_{\text{F}}}{dz} = -i\omega_{\text{F}} \cdot \kappa_{\text{SHG}} \cdot E_{\text{F}}^* E_{\text{SHG}} e^{-i\Delta\beta_{\text{SHG}}z} - \alpha_{\text{F}} E_{\text{F}}, \quad (5)$$

$$\frac{dE_{\text{S}}}{dz} = -i\omega_{\text{S}} \cdot \kappa_{\text{DFG}} \cdot E_{\text{DFG}}^* E_{\text{SHG}} e^{-i\Delta\beta_{\text{DFG}}z} - \alpha_{\text{S}} E_{\text{S}}, \quad (6)$$

$$\frac{dE_{\text{DFG}}}{dz} = -i\omega_{\text{DFG}} \cdot \kappa_{\text{DFG}} \cdot E_{\text{S}}^* E_{\text{SHG}} e^{-i\Delta\beta_{\text{DFG}}z} - \alpha_{\text{DFG}} E_{\text{DFG}}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{\text{SHG}}}{dz} = & -i\omega_{\text{F}} \cdot \kappa_{\text{SHG}} \cdot E_{\text{F}}^2 e^{i\Delta\beta_{\text{SHG}}z} \\ & - 2i\omega_{\text{F}} \cdot \kappa_{\text{DFG}} E_{\text{S}} E_{\text{DFG}} e^{i\Delta\beta_{\text{DFG}}z} \\ & - \alpha_{\text{SHG}} E_{\text{SHG}}. \end{aligned} \quad (8)$$

波长变换效率为

$$\eta_{\text{DFG}} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{DFG}}}{P_{\text{S}}} \right) \quad (\text{dB}), \quad (9)$$

定义归一化波长变换输出功率

$$P_{\text{DFG}}^{\text{Nor}} = \frac{P_{\text{DFG}}}{P_{\text{DFG}}^{\text{max}}},$$

其中 $P_{\text{DFG}} = |E_{\text{DFG}}|^2$, $P_{\text{S}} = |E_{\text{S}}|^2$, $P_{\text{DFG}}^{\text{max}}$ 为转换波长的最大输出功率.

当光波波长 λ 处于 $0.6\text{--}2.0\mu\text{m}$ 范围时, 光波导损耗 $\alpha_{\text{F}} \approx \alpha_{\text{SHG}} \approx \alpha_{\text{S}} \approx \alpha_{\text{DFG}} = 0.4 \text{dB/cm}$.

3 光波导设计

表 1 退火质子交换光波导制作参数

参数	数值
切向	z -切
质子交换源	苯甲酸
掩模版开口宽度 $w/\mu\text{m}$	10
交换温度 $T_e/^\circ\text{C}$	250
交换时间 t_e/min	30
退火时间 T_a/h	2
退火温度 $t_a/^\circ\text{C}$	350

本文采用表 1 中给出的铌酸锂退火质子交换光波导制作参数, 用文献 [12] 中给出的铌酸锂退火质子交换光波导的计算方法来计算折射率分布. 当基频光波波长 $\lambda_{\text{F}} = 1.55\mu\text{m}$, 信号光波波长 $\lambda_{\text{S}} = 1.52\mu\text{m}$, $T = 27^\circ\text{C}$ 时, 采用标量有限元方法 [12] 计算得 $\Lambda_{\text{SHG}} = 16.44\mu\text{m}$, S_{SHG} 和 S_{DFG} 的数值为 $S_{\text{SHG}} \approx S_{\text{DFG}} = 46.5\mu\text{m}^2$.

4 耦合模方程的求解

4.1 小信号分析

在倍频过程中, 当位相完全匹配时, 即 $\Delta\beta_{\text{SHG}} = 0$ 并且在无损耗情况下, 即 $\alpha_{\text{F}} = \alpha_{\text{SHG}} = \alpha_{\text{S}} = \alpha_{\text{DFG}} = 0$, 位置 $z = L$ 处的倍频光波复振幅为

$$E_{\text{SHG}}(L) = -iE_{\text{F}}(0) \tanh[\omega_{\text{F}} \kappa_{\text{SHG}} E_{\text{F}}(0)L],$$

其中 $|E_{\text{F}}(0)|^2 = P_{\text{F}}(0)$, 因此基频光转换为倍频光波的功率 P_{SHG} 为

$$P_{\text{SHG}}(L) = |E_{\text{SHG}}(L)|^2 = P_{\text{F}}(0) \tanh^2(\omega_{\text{F}} \kappa_{\text{SHG}} E_{\text{F}}(0)L). \quad (10)$$

参量放大过程中, 初始时, 即在 $z = 0$, 有 $P_{\text{S}}(0) = |E_{\text{S}}(0)|^2$, $P_{\text{DFG}}(0) = |E_{\text{DFG}}(0)|^2 = 0$. 仅考虑倍频光与信号光波相互作用时, 由于它们的位相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, 基频光波所转换的功率 P_{SHG} 较小,

可以忽略由基频光转换为倍频光波的损失,并且忽略传播损耗,可得输出的转换光波功率 P_{DFG} 为

$$P_{\text{DFG}}(L) = |E_{\text{DFG}}(L)|^2 = P_S \frac{\omega_{\text{DFG}}}{\omega_S} \left(\frac{g}{b}\right)^2 \sinh^2(bL), \quad (11)$$

其中

$$g = \kappa_{\text{DFG}} \sqrt{\omega_S \omega_{\text{DFG}}} \sqrt{P_{\text{SHG}}(L)},$$

$$b = \sqrt{g^2 - (\Delta\beta_{\text{DFG}}/2)^2}.$$

基频光波功率 $P_F = 100\text{mW}$, 信号光波功率 $P_S = 1\text{mW}$, 晶体温度 $T = 27^\circ\text{C}$ 时, 对应于不同相互作用长度 $L = 10\text{mm}$, 20mm , 40mm , 波长转换效率 η_{DFG} 与信号光波长 λ_S 的关系如图 2 所示.

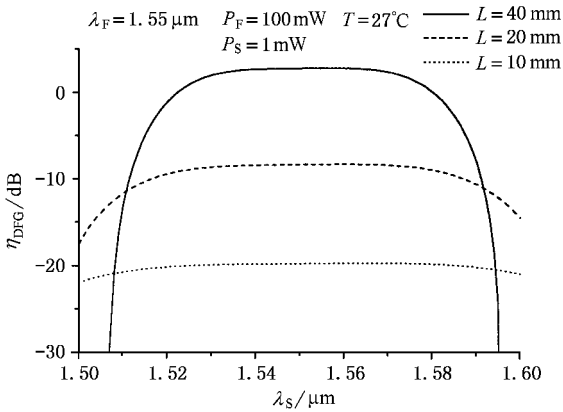


图 2 相互作用长度 L 分别为 10mm , 20mm , 40mm , $P_F = 100\text{mW}$, $\lambda_F = 1.55\mu\text{m}$, $P_S = 1\text{mW}$, $\Delta\text{SHG} = 16.44\mu\text{m}$ 时, 波长转换效率 η_{DFG} 与信号光波长 λ_S 关系的小信号分析结果

4.2 数值分析

在无损耗情况下, 即 $\alpha_F = \alpha_{\text{SHG}} = \alpha_S = \alpha_{\text{DFG}} = 0$, 利用数值方法求解方程(5)–(8), 对应于不同相互作用长度 $L = 10\text{mm}$, 20mm , 40mm , 基频光波功率 $P_F = 100\text{mW}$, 信号光波功率 $P_S = 1\text{mW}$, 晶体温度 $T = 27^\circ\text{C}$ 时, 输出转换光波的转换效率 η_{DFG} 与信号光波波长 λ_S 的关系如图 3 所示. 由图中可见, 相互作用长度 L 越长, 转换效率 η_{DFG} 越高, 但是相应的有效信号波长变换范围也就越小. 在有损耗情况下, 取光波导损耗 $\alpha_F \approx \alpha_{\text{SHG}} \approx \alpha_S \approx \alpha_{\text{DFG}} = 0.4\text{dB/cm}$, 输出转换光波的转换效率与信号光波波长的关系曲线与无损耗情况相差不大, 由此可知基频光波的功率主要损失在倍频光波的转换过程中.

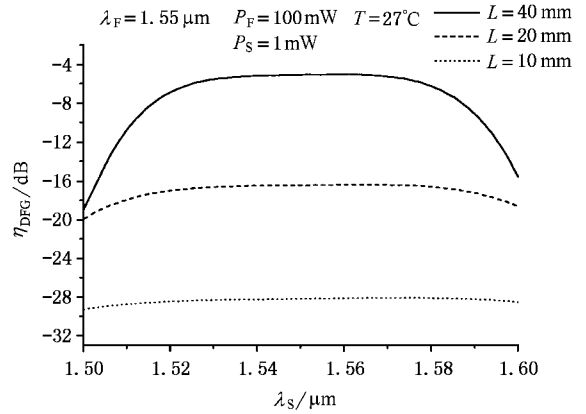


图 3 相互作用长度 L 分别为 10mm , 20mm , 40mm , $P_F = 100\text{mW}$, $\lambda_F = 1.55\mu\text{m}$, $P_S = 1\text{mW}$, $\Delta\text{SHG} = 16.44\mu\text{m}$ 时, 波长转换效率 η_{DFG} 与信号光波长 λ_S 关系的数值分析结果

4.3 数值计算结果与小信号分析结果的比较

数值解与小信号近似解的比较如图 4 所示. 由图中可见, 由于小信号近似忽略了倍频光波的转换损失, 因此计算结果比数值计算结果要偏高许多. 为此, 本文以下将采用数值分析的方法, 来分析铌酸锂全光波长变换的特性.

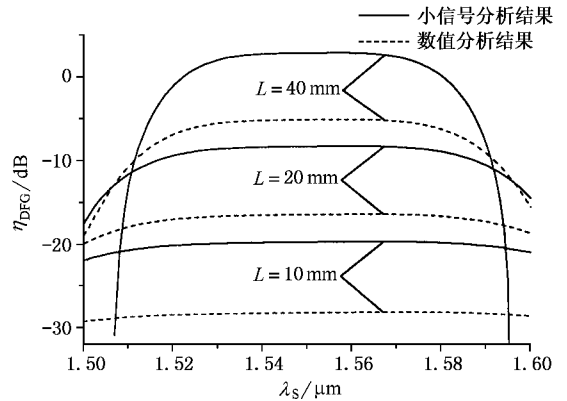


图 4 数值分析结果与小信号分析结果的比较

5 数值分析与讨论

下面以耦合模方程的数值求解为基础, 取基频光波功率 $P_F = 100\text{mW}$, 信号光波功率 $P_S = 1\text{mW}$, 讨论对应于不同相互作用长度 $L = 10\text{mm}$, 20mm , 40mm 的有效基频光波波长带宽、温度调谐带宽、极化反转光栅周期带宽、温度调谐范围, 以及极化反转光栅周期一定时, 温度调谐对应基频光波波长的调谐范围.

5.1 基频光波波长 λ_F 一定时, 光栅周期 Λ_{SHG} 与晶体温度 T 的关系

对于采用扇形光栅作为反转电极的极化反转铌酸锂, 由于各光波导之间有一定间距, 若基频光波波长 λ_F 固定, 为实现最大转换效率, 最佳方案是改变铌酸锂晶体的温度 T , 以改变铌酸锂晶体的折射率, 从而改变所需要的极化反转光栅周期 Λ_{SHG} , 来实现对波长转换的连续调谐. 考虑到铌酸锂晶体的线性热膨胀, 当温度为 T_1 时光栅周期为 $\Lambda_{\text{SHG}}(\lambda_\omega, T_1)$, 则当晶体温度为 T_2 时光栅周期 $\Lambda_{\text{SHG}}(\lambda_\omega, T_2)$ 应为

$$\Lambda_{\text{SHG}}(\lambda_\omega, T_2) = \Lambda_{\text{SHG}}(\lambda_\omega, T_1) [1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)], \quad (12)$$

其中 α 为铌酸锂晶体的线性热膨胀系数, 基频光波波长 $\lambda_F = 1.55\mu\text{m}$, 当晶体温度从 0°C 变化到 120°C 时, 如图 5 所示, 对应于 $T_2 = 27^\circ\text{C}$ 的极化反转光栅周期从 $16.49\mu\text{m}$ 变化到 $16.21\mu\text{m}$, 变化范围为 $0.28\mu\text{m}$, 变化率为 $-2.33\text{nm}/^\circ\text{C}$.

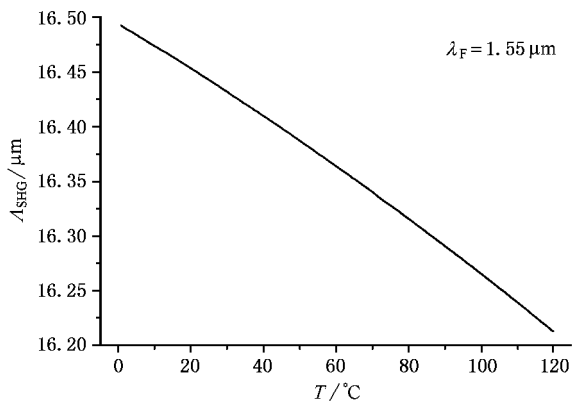


图 5 基频光波波长 $\lambda_F = 1.55\mu\text{m}$ 时, 光栅周期 Λ_{SHG} 与晶体温度 T 的关系

5.2 基频光波波长 λ_F 一定时, 温度调谐带宽 ΔT 与晶体温度 T 的关系

信号光波波长 $\lambda_s = 1.52\mu\text{m}$ 时, 温度调谐带宽 ΔT 与晶体温度 T 的关系曲线如图 6 所示. 由图中可以看出: 中心温度 T 越高, 温度带宽 ΔT 也越小; 相互作用长度 L 越长, 温度带宽 ΔT 也越小. 另外, 随着相互作用长度 L 的加大, 温度带宽 ΔT 随温度 T 的变化趋于平坦. 由此可见, 将温度控制在室温附近具有温度带宽宽、控温容易等优点, 易实现器件的实用化. 但是 Chou 等人将温度控制在 100°C 左右, 以降低光折变效应^[568].

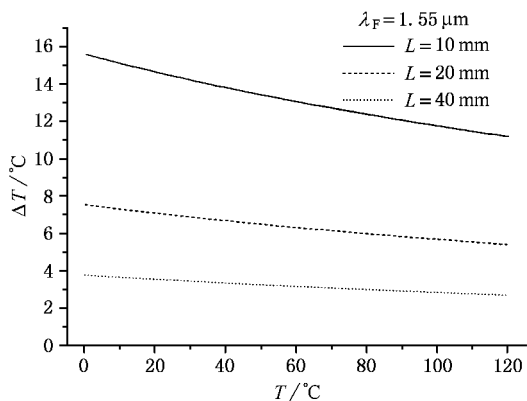


图 6 相互作用长度 L 分别为 10mm , 20mm , 40mm , 温度带宽 ΔT 与晶体温度 T 的关系

5.3 极化反转光栅周期 Λ_{SHG} 一定时, 基频光波波长 λ_F 与晶体温度 T 的关系

对于采用固定光栅周期作为反转电极的极化反转铌酸锂, 其极化反转光栅周期 Λ_{SHG} 固定, 因此可以采用改变基频光波 λ_F 的波长, 来实现最大倍频效率. 当 $\Lambda_{\text{SHG}} = \Lambda_0 = 16.44\mu\text{m}$, 在 27°C 时, 基频光波波长 $\lambda_F = 1.55\mu\text{m}$. 如图 7 所示, 当晶体温度从 0°C 变化到 120°C 时, 考虑到铌酸锂晶体的线性热膨胀, 相应的基频光波波长从 $1.548\mu\text{m}$ 变化到 $1.560\mu\text{m}$, 变化范围为 12nm , 变化率为 $0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$.

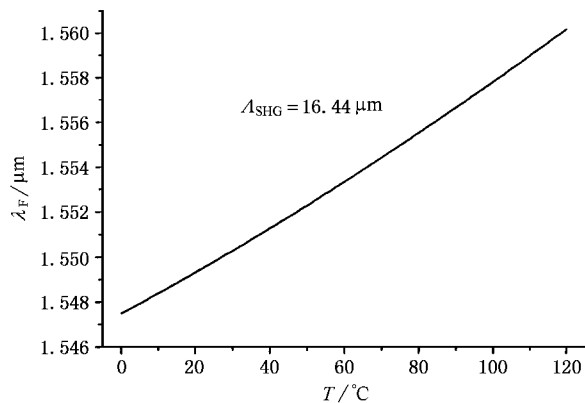
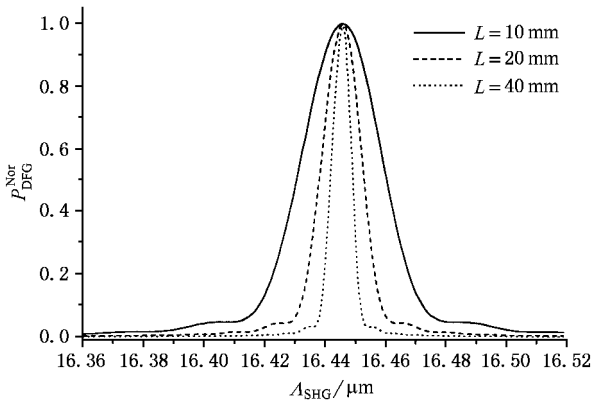


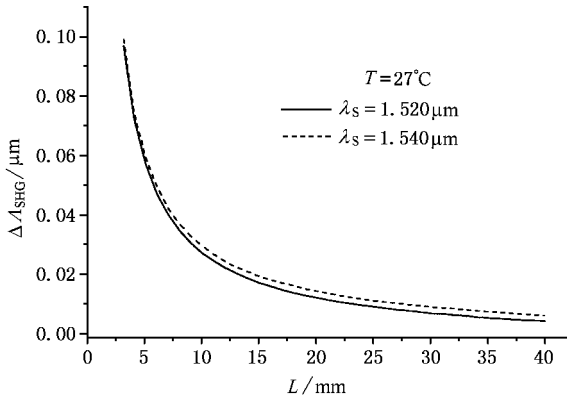
图 7 光栅周期 $\Lambda_{\text{SHG}} = 16.44\mu\text{m}$ 时, 基频光波波长 λ_F 与晶体温度 T 的关系

5.4 归一化波长变换输出功率 $P_{\text{DFG}}^{\text{Nor}}$ 与极化反转光栅周期 Λ_{SHG} 的关系

$\Lambda_{\text{SHG}} = \Lambda_0 = 16.44\mu\text{m}$, 无损耗, 对应于不同相互作用长度 $L = 10\text{mm}$, 20mm , 40mm , 晶体温度 $T = 27^\circ\text{C}$, 信号光波波长 $\lambda_s = 1.520\mu\text{m}$ 时, 输出的归一化



(a) 相互作用长度 L 分别为 10mm, 20mm, 40mm, $P_F = 100\text{mW}$, $\lambda_F = 1.55\mu\text{m}$, $P_S = 1\text{mW}$, $\lambda_S = 1.52\mu\text{m}$, $\Delta\lambda_{\text{SHG}} = 16.44\mu\text{m}$ 时, 归一化波长变换功率 $P_{\text{DFG}}^{\text{Nor}}$ 与光栅周期 $\Delta\lambda_{\text{SHG}}$ 的关系



(b) 信号光波波长 λ_S 分别为 1.52μm 和 1.54μm 时, 光栅周期带宽 $\Delta\lambda_{\text{SHG}}$ 与相互作用长度 L 的关系

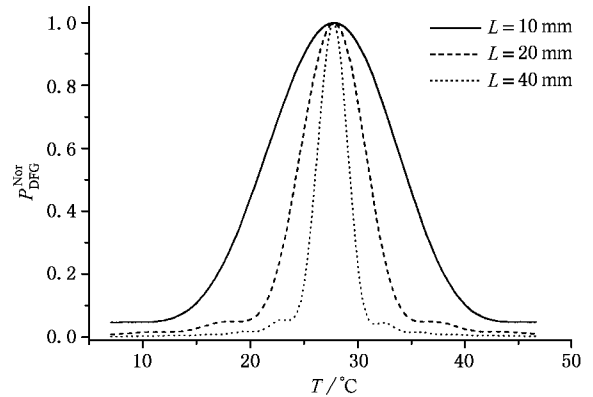
图 8

波长变换功率与极化反转光栅周期 $\Delta\lambda_{\text{SHG}}$ 的关系如图 8(a) 所示. 极化反转光栅周期 $\Delta\lambda_{\text{SHG}}$ 的 3dB 带宽 $\Delta\lambda_{\text{SHG}}$ 与相互作用长度 L 的关系如图 8(b) 所示. 由图中可以看出: 相互作用长度 L 越长, 或信号光波波长 λ_S 越远离基频光波的波长 λ_F , 极化反转光栅周期的带宽 $\Delta\lambda_{\text{SHG}}$ 越窄, 因而对极化反转光栅周期制作精度要求越高.

5.5 归一化波长变换输出功率 $P_{\text{DFG}}^{\text{Nor}}$ 与晶体温度 T 的关系

晶体温度 $T = 27^\circ\text{C}$, 信号光波波长 $\lambda_S = 1.520\mu\text{m}$ 时, 对应于不同相互作用长度 $L = 10\text{mm}$, 20mm , 40mm 输出的归一化波长变换功率与铌酸锂晶体温度 T 的关系如图 9(a) 所示. 信号光波波长 λ_S

分别为 $1.520\mu\text{m}$ 与 $1.540\mu\text{m}$ 时, 铌酸锂晶体温度的 3dB 带宽 ΔT 与相互作用长度 L 的关系如图 9(b) 所示. 由图中可以看出: 相互作用长度 L 越长, 或信号光波波长 λ_S 越远离基频光波的波长 λ_F , 铌酸锂晶体温度 T 的带宽 ΔT 越窄, 在实际应用中对温度稳定性的要求越高.



(a) 相互作用长度 L 分别为 10mm, 20mm, 40mm, $P_F = 100\text{mW}$, $\lambda_F = 1.55\mu\text{m}$, $P_S = 1\text{mW}$, $\Delta\lambda_{\text{SHG}} = 16.44\mu\text{m}$ 时, 归一化波长变换功率 $P_{\text{DFG}}^{\text{Nor}}$ 与晶体温度 T 的关系

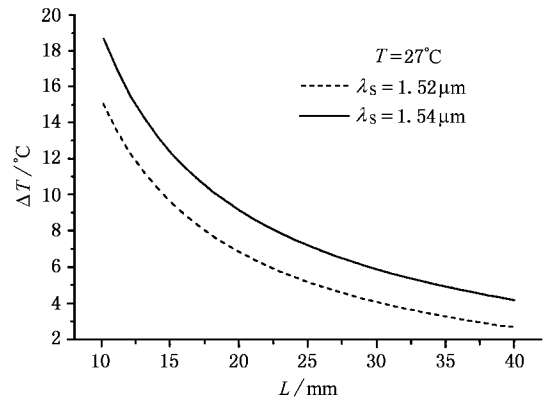
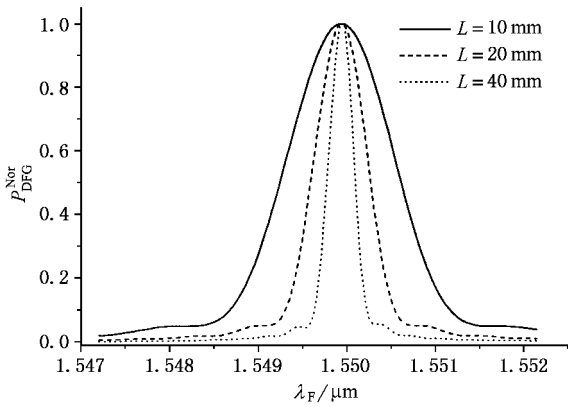


图 9(b) 信号光波波长 λ_S 分别为 1.52μm 和 1.54μm 时, 晶体温度带宽 ΔT 与相互作用长度 L 的关系

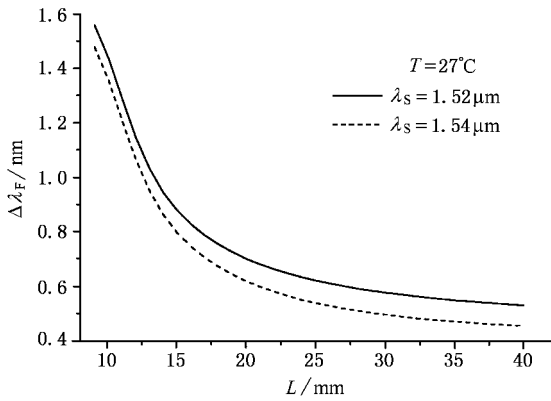
图 9

5.6 归一化波长变换输出功率 $P_{\text{DFG}}^{\text{Nor}}$ 与基频光波波长 λ_F 的关系

晶体温度 $T = 27^\circ\text{C}$, 信号光波波长 $\lambda_S = 1.520\mu\text{m}$ 时, 对应于不同相互作用长度 $L = 10\text{mm}$, 20mm , 40mm 输出的转换光功率与基频光波波长 λ_F 的关系如图 10(a) 所示. 信号光波波长 λ_S 分别为 $1.520\mu\text{m}$ 与 $1.540\mu\text{m}$ 时, 基频光波的 3dB 带宽 $\Delta\lambda_F$ 与相互作用长度 L 的关系如图 10(b) 所示. 由图中



(a) 相互作用长度 L 分别为 10mm, 20mm, 40mm, $P_F = 100\text{mW}$, $\lambda_F = 1.55\mu\text{m}$, $P_S = 1\text{mW}$, $\Delta\lambda_{\text{SHG}} = 16.44\mu\text{m}$ 时, 归一化波长变换功率 $P_{\text{DFG}}^{\text{Nor}}$ 与基频光波波长 λ_F 的关系



(b) 信号光波波长 λ_S 分别为 1.52 μm 和 1.54 μm 时, 基频光波波长带宽 $\Delta\lambda_F$ 与相互作用长度 L 的关系

图 10

可以看出, 相互作用长度 L 越长, 或信号光波波长 λ_S 越接近基频光波的波长 λ_F , 基频光波的带宽 $\Delta\lambda_F$ 越窄, 在实际应用中对基频光波的稳定性要求越高。

5.7 光波导损耗的影响

考虑到光波导的损耗, 与没有损耗的情况相比, 不但转换光波功率会降低, 而且极化反转光栅周期精度带宽 $\Delta\lambda_{\text{SHG}}$ 、温度带宽 ΔT 、基频光波波长带宽 $\Delta\lambda_F$ 都将略微减小, 更加提高了对实验精度与稳定性的要求。

6 结 论

本文研究了基于级联二阶非线性的铌酸锂波导全光波长变换器的特性。首先从耦合模方程出发, 比较了数值分析结果与小信号近似分析的结果。然后在用数值方法来分析全光波长变换特性的基础上, 讨论了基频光波波长 λ_F 与极化反转光栅周期 Λ_{SHG} 分别一定时, 光栅周期 Λ_{SHG} 随温度的变化率为 $-2.33\text{nm}/^\circ\text{C}$, 基频光波波长 λ_F 随温度 T 变化率为 $0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$ 。最后讨论了 $\Lambda_{\text{SHG}} = \Lambda_0 = 16.44\mu\text{m}$, 27°C 时, 对应于不同相互作用长度 $L = 10\text{mm}, 20\text{mm}, 40\text{mm}$ 输出的转换光功率 $P_{\text{DFG}}^{\text{Nor}}$ 与基频光波波长 λ_F 、晶体温度 T 、极化反转光栅周期 Λ_{SHG} 的关系, 以对全光波长变换器进行优化设计。

[1] Sun J Q et al 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 2369 (in Chinese) [孙军强等 1997 物理学报 **46** 2369]

[2] Zhang X L et al. 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 741 (in Chinese) [张新亮等 2000 物理学报 **49** 741]

[3] Xu C Q et al. 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 1170

[4] Xu Chang-Qing et al 1995 *Japanese Journal of Applied Physics* **34** L1543

[5] Chou M H et al 1998 *Optics Letters* **23** 1004

[6] Chou M H et al 1999 *IEEE. Photonics Technology Letters* **11** 653

[7] Chou M H et al 2000 *IEEE Photonics Technology Letters* **12** 82

[8] Chou M H et al 2000 *Electronics Letters* **36** 66

[9] Ilaria Chistiani et al 2001 *Optics Communication* **187** 263

[10] Katia Gallo et al 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 1020

[11] Katia Gallo et al 1999 *J. Opt. Soc. Am.* **B16** 741

[12] XueTing et al 2002 *Acta Phys. Sin.* (in Chinese)

Theoretical analysis of the $1.5\mu\text{m}$ band all-optical wavelength converters based on cascaded second-order nonlinearity in LiNbO_3 waveguide^{*}

Xue Ting Yu Jian Yang Tian-Xin Ni Wen-Jun Li Shi-Chen

(*College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University,*

Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science, EMC, Tianjin 300072, China)

(Received 13 June 2001 ; revised manuscript received 26 July 2001)

ABSTRACT

The characterization of all-optical wavelength converter based on the cascaded second-order nonlinearities in LiNbO_3 waveguides has been carried out in this work in order to find rules to optimize the fabrication parameters for stable and high-efficiency all-optical wavelength convention. Firstly, the comparison of numerical analysis results and the small-signal analysis results is given based on the coupled mode equation. Secondly, using the numerical results, the dependence of the fundamental wavelength and the QPM grating period on the bulk temperature is given respectively. Finally, the relationship between the output power of a converted light and the 3dB bandwidth of fundamental wavelength, bulk temperature, grating period is analyzed.

Keywords : cascade second-order nonlinearity, wavelength converter, quasi-phase-matched, LiNbO_3 , optical waveguide

PACC : 4265, 4265K, 4280L, 4280S

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Tianjin, China(Grant No.99380071).