

一种新颖的 WDM 网波长转换器

刘雪明, 甘朝钦, 孙小菡, 张明德

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

摘 要: 本文首次提出了利用周期性热及电场诱导的 D 型光纤的波长转换器. 推导了转换效率 η 和转换带宽 $\Delta\lambda$ 的表达式, 该式与数值计算一致. 结果表明, η 与二次非线性系数和泵浦光功率成对数关系, 但它们对 $\Delta\lambda$ 的影响不大. 适当增加 D 型光纤的长度能有效提高 η , 但却降低了 $\Delta\lambda$. 一般情况下, $\eta > -15\text{dB}$, $\Delta\lambda > 100\text{nm}$. 模拟了 WDM 网中 8 个信道信号光的波长转换.

关键词: 波分复用; 带宽; 波长转换; 诱导

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 03-0414-03

A Novel Kind of Wavelength Converter for WDM Nets

LIU Xue-ming, GAN Chao-qin, SUN Xiao-han, ZHANG Ming-de

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A novel wavelength converter is proposed by use of D fiber after periodically thermal/ electric field poling in the paper for the first time. The expressions for conversion efficiency η and bandwidth $\Delta\lambda$ are derived, which are consistent with numerical calculation. The results show that η is proportional to the logarithm of second-order nonlinear coefficient and pump light power, and, however, they have only a little effect to $\Delta\lambda$. By properly increasing the length of D fiber η can be efficiently enhanced, but $\Delta\lambda$ will be decreased. Under the ordinary condition, $\eta > -15\text{dB}$ and $\Delta\lambda > 100\text{nm}$ can be achieved. The wavelength conversion for 8 channel signal is simulated.

Key words: WDM; bandwidth; wavelength conversion; poling

1 引言

波分复用全光通信网(WDM AONs)有望成为解决超大容量和超高速率通信系统的有效手段. 然而, 由于 WDM AONs 中的独立波长数目有限, 一般需要波长转换技术. 因此, 低串音、对偏振态不灵敏、宽带宽和高效率的多信道波长转换技术在 WDM 网中被广泛地研究. 如利用波导(如 LiNbO_3)干涉仪结构的准相位匹配差频产生(QPM DFG), 以及半导体光放大器(SOA)的交叉相位调制(XPM)、交叉增益调制(XGM)和四波混频(FWM)^[1,2]. 由于 SOA XPM 和 XGM 不仅存在较大的噪声, 而且传输速率限制在 $\sim 10\text{Gb/s}$ 以内, 而 SOA FWM 存在较大的自发发射噪声和窄带宽($\sim 10\text{nm}$)的缺陷^[1]. 虽然 LiNbO_3 波导的 QPM DFG 能实现宽带宽($\sim 60\sim 90\text{nm}$), 高数据传输率($> 10\text{Tb/s}$), 但激光损伤阈值较低、对温度敏感, 而且不便于在 WDM AONs 中直接集成^[1,2]. 一般情况中, 石英材料不存在二次非线性. 然而, 自 1991 年报导了经热及电场诱导(TEFP: thermal/ electric field poling)熔融石英的二阶极化率 $\chi^{(2)}$ 达 1pm/V 之后^[3], TEPF 石英光纤进行了广泛的研究. 目前, 不仅得到了诱导石英光纤的电光系数 γ 达 5.8pm/V ^[4], 接近于 LiNbO_3 的相应值, 而且周期性 TEPF D 型光纤的长度达 75mm 以上, 得到的二次谐波的效率达 20% 以上^[5], 并可进行 f_s 量

级脉冲的倍频^[6]. 实验表明, 如果优化实验条件, 效率能进一步提高, 并且能有效地进行和频产生(SFG)和 DFG^[5-8], 因此能广泛地应用于变频器、参量放大等. 本文首次提出了基于周期性 TEPF 的 D 型光纤的波长转换器, 推导了波长转换的带宽和转换效率的表达式, 计算结果表明, 这种波长转换器不仅有非常宽的带宽($> 100\text{nm}$), 而且转换效率高($> -15\text{dB}$), 并且可在 WDM AONs 中进行在线波长转换.

2 理论

周期结构(如均匀光栅)非线性介质中的 QPM DFG 机理不同于双折射晶体. 前者是利用非线性介质的光栅结构产生色散补偿来满足差频过程的相位匹配, 而后者则利用线性介质的双折射, 通过控制不同的入射角来满足的. 由 Maxwell 方程, 可以得到三束不同频率光波在周期结构非线性介质 QPM DFG 的耦合方程^[9], 即

$$\frac{\partial E_1(z)}{\partial z} = -i(\omega_1 d / (n_1 c)) E_2(z)^* E_3(z) \exp(-i\Delta k z) \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_2(z)}{\partial z} = -i(\omega_2 d / (n_2 c)) E_1(z)^* E_3(z) \exp(-i\Delta k z) \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_3(z)}{\partial z} = -i(\omega_3 d / (n_3 c)) E_1(z) E_2(z) \exp(i\Delta k z) \quad (3)$$

式中 E_1 、 E_2 、 E_3 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 和 n_1 、 n_2 、 n_3 分别依次对应于信号光、差频产生光、泵浦光的电场强度的幅度、波矢、频率和折射率, 通常 $\omega_1 \approx \omega_2$ 、 $\omega_2 = \omega_3 - \omega_1$, c 是真空中的光速, d 是二次非线性系数, $\Delta k (= k_3 - k_2 - k_1 - 2\pi/\Lambda)$ 是波矢失配, Λ 是光栅的周期. 对于 TEFP 的 D 型光纤, D 面到纤芯的距离较小 ($< 5 \mu\text{m}$) 和光栅的非理想性^[8, 10], 必须考虑光波在 D 型光纤中衰减, 则 $k_j = 2\pi n_j/\lambda_j + i\alpha_j$ ($j = 1, 2, 3$), λ_j 和 α_j 分别是相应的光波波长和衰减系数.

由式(1)~(3), 数值计算了在不同输入泵浦光 ($P_3(0) = 100\text{mW}$ 和 300mW) 和 $E_1(z)$ 、 $E_2(z)$ 和 $E_3(z)$ 在周期性 TEFP D 型光纤中的传播, 如图 1 所示(在 E 和 P 转换中, 利用了 $I = \varepsilon_0 c n |E|^2/2$, $P = \pi \omega_0^2 I$, I 是光强度, ω_0 是模场半径. 设 TEFP D 型光纤的纤芯直径为 $6 \mu\text{m}$ ^[5]). 图 1 表明, 泵浦光在 DFG 过程中近似不变, 故可假设 $E_3(z) = E_3(0)$. 于是, 经 D 型光纤长度 L 后, QPM-DFG 光的幅度 $E_2(L)$ 可从式(1)~(3)中解出, 即

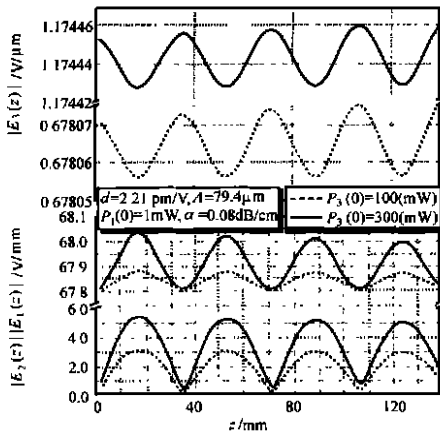


图 1 泵浦光、信号光和 DFG 光在 D 型光纤中变化的示意图

$$E_2(L) = i(M_2/Q) \sinh(QL) \exp(ix) E_1^*(0) \quad (4)$$

式中 $x = \Delta kL/2$, $Q = \sqrt{M_1^2 M_2^2 - (\Delta k/2)^2}$, $M_j = \omega_j d E_3(0) / (n_j c)$ ($j = 1, 2$).

对于周期性 TEFP 的 D 型光纤, d 和 L 分别是 pm/V 和 cm 量级, 而 $E_3(0)$ 在 $\text{V}/\mu\text{m}$ 量级(对应于泵浦功率 $\sim 100\text{mW}$), 则 $M_1 M_2 L^2 \approx 0.01 \sim 0.1$. 而 $\Delta kL/2$ 随信号光波长 λ_1 的变化如图 2 所示(忽略了光纤的衰减). 计算中, 设 $\lambda_3 = 775\text{nm}$, 并忽略了 D 型光纤经 TEFP 后折射率的变化 Δn ($\Delta n \ll n$), 采用典型石英光纤色散特性的 Sellmeier 方程^[11]. 该图表明, 在一般情况

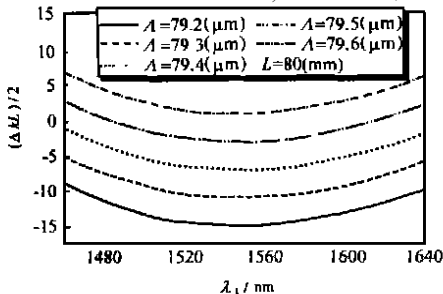


图 2 $\Delta kL/2$ 与 λ_1 的关系

下, $(\Delta kL/2)^2 \gg M_1 M_2 L^2$. 于是式(4)的 Taylor 展开为

$$E_2(L) = iM_2 L [\sin(x)/x] \exp(ix) E_1^*(0) \quad (5)$$

由式(5), 得到 DFG 光的功率转换效率 η 为

$$\eta = 10 \lg [P_2(L)/P_1(0)] = 20 \lg [M_2 L |\sin(x)/x|] \quad (6)$$

可见, 经周期性 TEFP 的 D 型光纤的 QPM-DFG 效率 η 与二次非线性系数 d 和泵浦光输入功率成对数关系. D 型光纤的长度 L 对 η 影响也较大, 选择合适的 L 能有效提高 η 值. 当 $\Delta k \rightarrow 0$, $\eta \rightarrow$ 极大值, 并且与 L 成对数增加. 由式(6), 在一阶近似下, 可得出 DFG 光的转换效率下降到 $1/e$ 点的转换带宽 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \frac{[\ln(10)\eta/e - 20] x_0 \tan^{-1}(x_0) - 1/x_0}{5L [x_0 \tan^{-1}(x_0) - 1] \Delta k'(\lambda_0)} \quad (7)$$

式中 λ_0 表示带宽的中心波长(近似相当于泵浦光波长 $\lambda_0 = 2\lambda_3$), $x_0 = \Delta k(\lambda_0)L/2$, $\Delta k'(\lambda_0)$ 表示在中心波长处波矢失配的一阶导数. 由式(7)可知, 当波矢失配 $\Delta k(\lambda)$ 为常数时, 则 $\Delta k'(\lambda) = 0$, 于是 $\Delta\lambda \rightarrow \infty$. 如果 $\Delta k(\lambda) = 0$, 即完全满足相位匹配, 由式(6)和(7)可知, $\Delta\lambda$ 和 η 都达到极大值. 当 $L \rightarrow 0$ 时, 有 $x_0 \tan^{-1}(x_0) \rightarrow 1$, 则 $\Delta\lambda \rightarrow \infty$, 但 $\eta \rightarrow 0$. 当 L 增大时, $\Delta\lambda$ 的包络线减小.

3 数值模拟及分析

由于式(7)是在一阶近似下得出的解析式, 为了精确地得到 $\Delta\lambda$ 和 η 值, 应直接求式(1)~(3)数值解. 在 WDM-AONs 中, 评定波长转换器特性优劣的指标主要有: 波长转换的带宽、转换效率、信噪比、传输速率和速率的动态变化范围等^[1]. 由于经周期性 TEFP 的 D 型光纤能实现 WDM 网络中的在线波长转换, 并且这种波长转换器长度短, 因此, 插入这种光纤对传输速率和速率的动态变化和信噪比的影响可忽略. 在周期性 TEFP 的 D 型光纤中, 为了得出光栅周期 Λ 的最佳值, 采用目前实验报道的典型值^[10], 即 $\gamma = 0.3$ 和 0.5 pm/V 两种情况(相当于 $d = 1.33$ 和 2.21 pm/V)、 $\alpha = 0.004$ 和 0.08 dB/cm 、D 面到纤芯的距离为 5 和 $3 \mu\text{m}$. 由式(1)~(3), 经数值计算, 波长转换效率 η 和 η 下降 $1/e$ 点的带宽 $\Delta\lambda$ 与光栅周期 Λ 的关系如图 3 所示(图 3~5 中, $P_3(0)$ 、 d 、 α 、 L 、 Λ) 的单位依次是 mW 、 pm/V 、 dB/cm 、 mm 、 μm . 图 3 表明, 选择 $\Lambda = 79.57 \mu\text{m}$ 时, 可获得 η 的极大值. 图 4 表明 η 和 $\Delta\lambda$ 与波长转换器总长度 L 的关

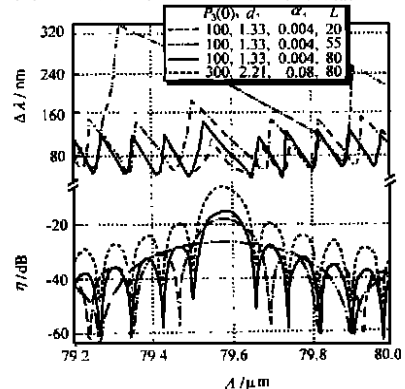


图 3 η 和 $\Delta\lambda$ 与光栅周期 Λ 的关系

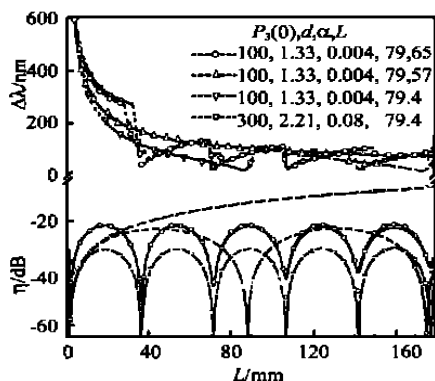
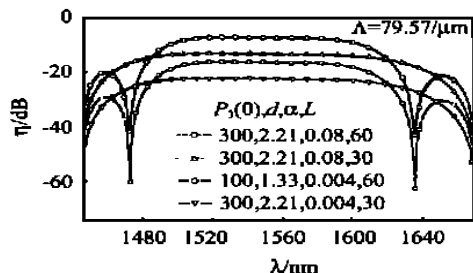
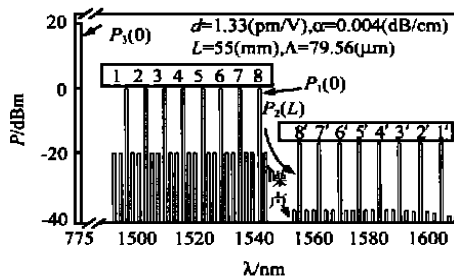
图 4 η 和 $\Delta\lambda$ 与 D 型光纤总长度 L 的关系图 5 η 与信号光波长 λ_s 的关系

图 6 信号光经 QPM-DFG 光的示意图

系, 图中的实线是由解析式得出的值, 而附有符号的虚线是由式(1)~(3)得出的数值解。从图可知, 解析式与数值解一致, d 和 $P_3(0)$ 对 η 影响较大, 但对 $\Delta\lambda$ 影响较小。该图也表示了, η 近似周期的变化, 当 $L \rightarrow 0$ 时, $\Delta\lambda \rightarrow \infty$, 并随 L 增大, $\Delta\lambda$ 的包络线逐渐减小, 这些结果正如式(7)所预言。由式(6)、(7)和图 2~4 可知, 当 $\Delta k \rightarrow 0$ 时(即 $\lambda \approx 79.57$), 随着 L 增大, η 增加, 而 $\Delta\lambda$ 却减小。这是由于, 在相位匹配条件近似满足时, 随着光纤长度 L 的延长, DFG 过程中光子数的交换也增多, 使得产生新光子数也增加, 于是 η 增大。但当 L 增加时, 一些波长的相位匹配难以满足, 于是使得一些波长的光子不能有效的 DFG, 因此, 带宽 $\Delta\lambda$ 变窄。为了既得到较大的带宽, 又获得较高的效率, L 可取 30~70mm。图 5 是转换效率 η 与信号光的

波长的关系(图中实线是解析值, 附带符号的虚线是数值值, 它们几乎重合)。该图表明了, 信号光在非常宽的带宽($> 100\text{nm}$)内能实现均匀转换效率($> -15\text{dB}$)。图 6 表示 WDM AONs 中不同波长输入信号光和附带的噪声经 D 型光纤 QPM-DFG 的转换示意图。图中 1、2、...、8 分别表示 WDM 网中 8 个不同的信道的信号光, $1'$ 、 $2'$ 、...、 $8'$ 分别表示经 QPM-DFG 后的 DFG 光, 其中泵浦光的波长是 775nm。

4 结论

本文首次提出了利用周期性 TEFP D 型光纤在 WDM AONs 中作为波长转换器。数据结果表明, 这种波长转换器的转换效率 $\eta > -15\text{dB}$ 、带宽 $\Delta\lambda > 100\text{nm}$ 。推导出了 QPM-DFG 光的转换效率 η 和一阶近似下带宽 $\Delta\lambda$ 的表达式, 该结果与数值结果相一致。表达式表明 η 与二次非线性系数 d 、泵浦光功率 $P_3(0)$ 成对数关系, 但它们对带宽的影响不大。光纤长度 L 对 η 和 $\Delta\lambda$ 的影响较大, 在较好的相位匹配条件下(即 $\Delta k \approx 0$), 随着 L 的增大, η 的极大值增大, 但 $\Delta\lambda$ 却减小, 其机理是: 当 L 增长时, DFG 过程的光子数增多, 转换所产生的光子也增加, 于是 η 增大。但随着 L 增大, 某些波长的光子在 DFG 过程中的动量守恒的偏差越来越大, 于是这些波长的光子难以满足相位匹配, 结果使得带宽变窄。为同时得到较大的 η 和较宽 $\Delta\lambda$, L 可取 30~70mm。模拟了 WDM 网中 8 个信道的波长转换结果。实验结果请见随后的报道。

参考文献:

- [1] S. J. B. Yoo, J. Lightwave Technol. [J], 1996, 14: 955-966.
- [2] M. H. Chou, J. Hauden, M. A. Arbore. [J]. Opt. Lett., 1998, 23: 1004-1007.
- [3] R. A. Myers, N. Mukherjee, S. R. J. Brueck. [J]. Opt. Lett., 1991, 16: 1732-1734.
- [4] T. Fujiwara, D. Wang, Y. Zhao, et al. [J]. Ele. Lett., 1995, 31: 573-575.
- [5] V. Pruneri, G. Bonfrate, P. G. Kazansky, et al. [J]. Opt. Lett., 1999, 24: 208-210.
- [6] V. Pruneri, G. Bonfrate, P. G. Kazansky, et al. [J]. Appl. Phys. Lett., 1998, 72: 1007-1009.
- [7] P. G. Kazansky, P. S. J. Russell, H. Takebe. [J]. Lightwave Technol., 1997, 15: 1484-1493.
- [8] V. Pruneri, P. G. Kazansky. [J]. Ele. Lett., 1997, 33: 318-319.
- [9] M. J. T. Milton. [J]. IEEE Quant. Ele., 1992, 28: 739-749.
- [10] X.-C. Long, S. R. J. Brueck. [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1997, 9: 767-769.
- [11] G. P. Agrawal, Nonlinear fiber optics [B]. Academic Press Inc., San Diego, 1989, P7.