

光纤光参量放大器及其应用

吕洪君¹, 胡睿², 李子尧²

(1 合肥工业大学理学院, 安徽 合肥 230009

2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 评述了基于光纤的光参量放大器的理论基础, 介绍了这种器件在光通信领域的应用情况, 最后展望了这一领域的研究前景。

关键词: 光通信; 光参量放大器; 四波混频

中图分类号: TN722.3+1

文献标识码: A

文献编号: 1006-1231(2004)03-0008-04

Fiber-based Optical Parametric Amplifiers and Their Applications

LU Hong-jun¹, HU Rui², LI Zi-yao²

(1 College of Sciences, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The theoretical fundamentals of fiber-based optical parametric amplifiers(OPA) are reviewed, and their applications are discussed in this paper. In the end the future research aspects are expected.

Key words: optical communication; optical parametric amplifier; four-wave mixing

1 引 言

众所周知, 光参量放大^[1](parametric amplification) 是介质中 $\chi^{(1)}$ 非线性所产生的一种非线性现象。但是, 在光纤中也可以通过 $\chi^{(3)}$ 非线性来获得参量放大。这主要归因于新型高功率光源和优质的高非线性光纤(HNLF)的进展^[2], 以及光纤通信等应用对光纤光参量放大器(optical parametric amplifier, OPA)的需求。

光参量放大的机制是四波混频(four-wave mixing, FWM), 即利用四个光子相互作用的相对相位来产生和选择所需的信号光^[3,4]。本文第二部分简单介绍光纤光参量放大器的原理, 特别讨论了相位匹配条件。第三部分讨论了光纤光参量放大器的一些应用。最后在结论部分对这一研究领域的前景进行了展望。

2 原 理

设泵浦光频率为 ω_p , 信号光为 ω_s , 闲散光为 ω_i , 则简并四波混频过程需满足如下条件

$$\Delta\beta = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_i) - 2\beta(\omega_p) = 0 \quad (1)$$

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

这里 $\Delta\beta$ 为相位失配, $\beta_{p,s,i} = n_{p,s,i}/c$ 分别是各个光波的传播常数, c 为真空中的光速。

从量子力学的观点看, 参量放大就是两个泵浦光子(ω_p) 转变成一个信号光子(ω_s) 和一个闲散光子(ω_i) 的过程。这种转换需满足能量守恒关系[即(2)式]和量子力学的光子动量守恒关系[即(1)式]。

考虑三个电磁波的相互作用, 其角频率分别为 ω_p 、 ω_s 、 ω_i , 电场的缓变振幅分别为 $A_p(z)$ 、 $A_s(z)$ 、 $A_i(z)$, 因此在单模光纤中传播的横向场强可写为

$$E(x, y, z) = f(x, y)A(z) = f(x, y) \cdot \frac{1}{2} [A_p(z) \exp(i\beta_0 z - i\omega_0 t) + A_s(z) \exp(i\beta_1 z - i\omega_1 t) + A_i(z) \exp(i\beta_2 z - i\omega_2 t) + \text{c.c.}] \quad (3)$$

这里 c.c. 表示复共轭, 在计算中通常可忽略。 $f(x, y)$ 为电场的横向廓线, 可以认为对三个光波都相同。采用标准的传播方程^[4], 可以导出下列耦合方程^[3~5]

$$\frac{dA_p}{dz} = i\gamma [(|A_p|^2 + 2(|A_s|^2 + |A_i|^2)) A_p + 2A_s A_i A_p^* \exp(i\Delta\beta z)] \quad (4)$$

$$\frac{dA_s}{dz} = i\gamma[(|A_s|^2 + 2(|A_i|^2 + |A_p|^2))A_s + A_i^* A_p^2 \exp(-i\Delta\beta z)] \quad (5)$$

$$\frac{dA_i}{dz} = i\gamma[(|A_i|^2 + 2(|A_s|^2 + |A_p|^2))A_i + 2A_s^* A_p^2 \exp(-i\Delta\beta z)] \quad (6)$$

$$\frac{d\theta}{dz} = \Delta\beta + \gamma(2P_p - P_s - P_i) + \gamma[(P_p^2 P_i / P_s)^{1/2} + (P_p^2 P_i / P_s)^{1/2} - 4(P_s P_i)^{1/2}] \cos\theta \quad (10)$$

其中 $\theta(z)$ 为四个相互作用的光波之间的相位差即

$$\theta(z) = \Delta\beta z + 2\phi_p(z) - \phi_s(z) - \phi_i(z) \quad (11)$$

这里光纤损耗已被忽略。 $\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{eff}$ 为非线性系数， n_2 为光纤的参量， A_{eff} 为光纤的有效模面积。这里还假设对三个波来说 γ 基本相同， n_2 为实数而使 Raman 散射的增益可忽略不计。(4)~(6) 式前两项分别是自相位调制 (SPM) 和交叉相位调制 (XPM) 所引起的非线性相移，而最后一项则是光波相互作用所引起的能量转移。

我们可以用光的功率 P_j 和相位 ϕ_j 来重写方程 (4)~(6)。这里 $j \in \{p, s, i\}$, $P_j = |A_j(z)|^2$, $A_j(z) = \sqrt{P_j} A_j(z) = \sqrt{P_j} \exp(i\phi_j)$ 。我们有 [6]

$$\frac{dP_p}{dz} = -4\gamma(P_p^2 P_s P_i)^{1/2} \sin\theta \quad (7)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = 2\gamma(P_p^2 P_s P_i)^{1/2} \sin\theta \quad (8)$$

$$\frac{dP_i}{dz} = 2\gamma(P_p^2 P_s P_i)^{1/2} \sin\theta \quad (9)$$

这里 $\phi_i(z)$ 包括在 $z = 0$ 处的初始相位和在传播过程中所获得的非线性相移。(10) 式右边第一项为线性相移，第二项、第三项为非线性相移。

从 (7)~(10) 可以看出，通过控制相位 θ ，我们就可以控制四波混频相互作用中能量转移的流向。在 $\theta = \pi/2$ 时，能量从泵浦光流向信号光和闲散光，这时为参量放大；在 $\theta = -\pi/2$ 时，能量从信号光和闲散光流向泵浦光，我们称之为参量衰减 (parametric attenuation)。换句话说，我们将信号光、闲散光和泵浦光同时置于光纤输入端调整它们之间的相对相位，就可以决定是放大还是衰减信号光。在 CPA 中，最困难的就是控制和维持相互作用光子之间的相对相位，即相位匹配。图 1 就是光纤参量放大器的示意图。考虑一个强泵浦光 ω_p 和一个弱信号光 ω_s 。假定在 $z = 0$ 处闲散光为零，这可以理解为在光纤中传播一段无限小的距离就会产生闲散光。

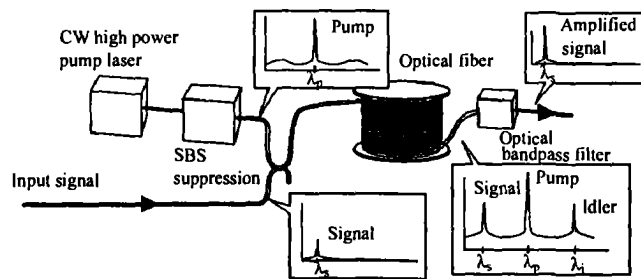


图 1 相敏光纤光参量放大器示意图

Fig.1 General scheme of phase-insensitive fiber-based optical parametric amplifier

在相位匹配的条件下 ($\theta = \pi/2$)，设 $P_p \gg P_s$ ，我们引入相位失配参量 κ ，有

$$\frac{d\theta}{dz} \approx \Delta\beta + \gamma(2P_p - P_s - P_i) \approx \Delta\beta + 2\gamma P_p = \kappa \quad (12)$$

将 β 在无色散频率附近 ($\beta_2(\omega_0)$) 展开为 Taylor 级数有

$$\Delta\beta = \{ \beta_3(\omega_p - \omega_0) + \frac{\beta_4}{2}[(\omega_p - \omega_0)^2 + (\omega_p - \omega_s)^2] \} (\omega_p - \omega_s)^2 \quad (13)$$

这里 β_3 和 β_4 是传播常数 $\beta(\omega)$ 在 ω_0 附近的三阶和四阶导数。

略去 β_4 ，我们可以将 (13) 式从 $\Delta\beta$ 与频率的关系改为与波长的关系即

$$\Delta\beta = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_i) - 2\beta(\omega_p) = -\frac{2\pi c}{\lambda_0^2} \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_p - \lambda_0)(\lambda_p - \lambda_s) \quad (14)$$

这里 $dD/d\lambda$ 是零色散波长处色散的斜率，在 $\lambda_p - \lambda_s \ll \lambda_p$ 时， $\omega_i - \omega_j = c(\lambda_j - \lambda_i) / 2\pi\lambda_0^2$ 。当 λ_p 位于正常色散区域 ($\lambda_p < \lambda_s$)，累积的相位失配会随着信号光波长的增加而增加，这样就会使信号光参量放大的效率减小。当泵浦光波长位于反常色散区域 ($\Delta\beta < 0$)，就可以用线性相移 $\Delta\beta$ 来补偿非线性相移 $2\gamma P_p$ 。对于固定的 λ_p ，参量放大的增益 G 与 λ_s

的关系曲线在 λ_p 的两边各有一个极大值点, 在该极大值点有 $\kappa = \Delta\beta + 2\gamma P_p = 0$. 也就是说参量过程在群速色散 (GVD) 和非线性 Kerr 效应之间建立了一种平衡.

方程 (4)~(6) 在一般情况下包含耗尽的泵浦 (depleted pump)、高阶色散及非线性相移, 可以方便地用标准的计算机软件进行数值求解, 但满足下列条件下, 即强泵浦和弱信号输入光纤, 在全部的参量过程中泵浦光没有耗尽 (undepleted pump) 时, 可以设 $dA_0/dz = 0$, 通过余下的耦合方程得到解析解

$$P_s(L) = P_s(0) \left(1 + \left[\frac{\gamma P_p}{g} \sinh(gL)^2 \right] \right) \quad (15)$$

$$P_i(L) = P_i(0) \left[\frac{\gamma P_p}{g} \sinh(gL)^2 \right]^2 \quad (16)$$

这里 L 是光纤的相互作用长度, 参量增益系数 g 可写成

$$g^2 = [(\gamma P_p)^2 - (\kappa/2)^2] = -\Delta\beta \left[\frac{\Delta\beta}{4} + \gamma P_p \right] \quad (17)$$

3 应 用

连续波 (CW) 泵浦的光纤光参量放大器具有下列优点: 对所有的比特率全透明; 不需同步; 泵浦光没有 SPM 或 XPM. 其缺点是要求较高的泵浦功率及需要降低受激布里渊散射 (SBS) 的阈值. 光纤 OPA 在光纤通信等领域有广泛应用, 包括线性光放大^[7] (linear optical amplification)、波带转换^[8] (wavelength band conversion)、方波脉冲产生^[9] (return-to-zero-pulse generation)、光时分复用^[10,11] (optical time-division demultiplexing)、全光限幅器^[12] (all-optical limiters) 和全光取样器^[13] (all-optical sampling) 等. 下面对这些应用作简单介绍.

线性光放大就是采用光纤 OPA 对信号光直接进行放大. 图 2 是一个 39 dB 光纤 OPA 的输出光谱图. 这里泵浦光功率为 2 W, HNLFF 长 500 m, 被分为 3 段, 长分别为 200 m、200 m 和 100 m, 对

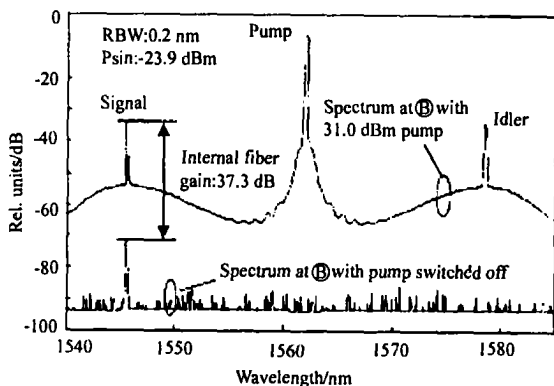


图 2 OPA 的输出光谱

Fig.2 Optical spectrum measured at OPA output

应的零色散波长分别为 1556.8 nm、1560.3 nm 和 1561.2 nm. 从图 2 可以看出, 信号光放大了 37.3 dB.

光纤 OPA 还可以将一组波长的光波同时转换为另一组波长的光波, 即波带转换^[8]. 图 3 是其示意图. 波带转换的物理机制是调制不稳定性 (modulation instability, MI), 它的本质也是四光子过程.

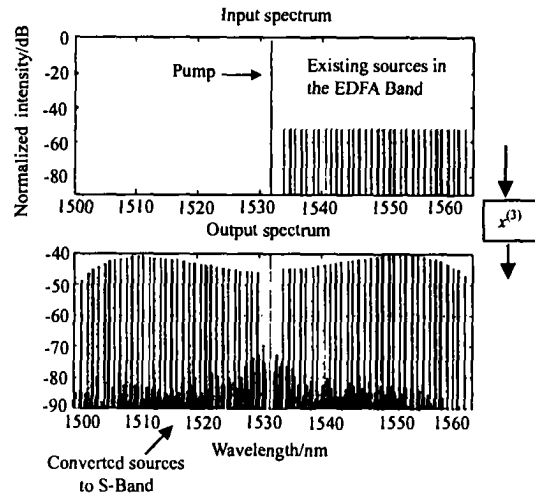


图 3 通过波长转换产生 S-带光源

Fig.3 Illustration of S-band source generation by wavelength conversion

通过一束激光泵浦, 就可以将原来的 C-波段转换为 S-波段. 从图 2 中可以看出, C-波段和 S-波段互为镜像. 波带转换在原距离光通信等方面很有应用, 例如, 采用 C-波段波分复用 (WDM) 容量有限, 通过波带转换就利用同时采用 C-波段、S-波段以及 L-波段, 从而扩展了通信容量.

在相位匹配条件下运转的光纤 OPA, 其增益随泵浦功率指数增长. 理论计算的结果如图 4(a) 所示. 这里使用的主要参量是增益斜率 S_p 与长度 L 的乘积. 图 4(b) 是计算所得的半高全宽 (FWHM) 与 LS_p 的关系曲线. 在增益很大时此参量放大器相当于一个光开关, 它仅仅放大 FWHM 内的全部光波, 而对 FWHM 之外的所有光波则全部透明. 所以只需用一个 40 GHz 的正弦波来调制泵浦光波, 就可以在信号光 (或闲散光) 产生一系列脉宽为 3 ps, 重复率为 40 GHz 的方波脉冲 (return-to-zero pulse, RZ 脉冲). RZ 脉冲在全光信号处理中有许多应用, 如脉冲压缩^[14]、RZ 脉冲产生、光时分复用 (O-TDM) 开关, 以及增加全光取样的分辨率.

在光纤通信中 OPA 的应用前景非常广阔. 光纤 OPA 的主要优点就是其多功能、宽波长范围以及可由需要来确定中心波长. 一个独特的性能就是可以使用 OPA 来产生无噪声光放大, 也就是放大器的噪声

为 0 dB。这样就有可能消除光纤中的非线性现象，如四光子混频、SPM、XPM 以及非线性 WDM 串扰，因此就无须使用分布式 Raman 放大。

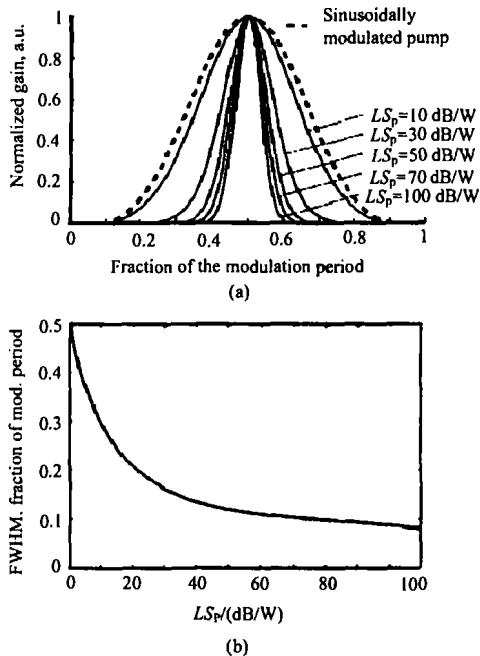


图 4 (a) 计算的 OPA 归一化时间窗口增益曲线;
(b) FWHM 与 LS_p 的关系曲线

Fig.4 (a) Calculated normalized gain time window profile for OPA with a sinusoidally modulated pump versus LS_p /(dB/W). (b) FWHM time window versus LS_p

4 结束语

本文评述了光纤 OPA 的基本理论模型和它的几种应用。光纤 OPA 由于其优异的性能在光纤通信和其他领域已得到或即将得到应用。该领域的进展主要得益于高非线性单模光纤的研发及商品化高功率半导体激光器的实现。展望未来，光纤 OPA 这一领域仍有许多工作需要开展。例如，OPA 本质上是一种偏振光的过程，而许多光纤通信方面的应用则需用非偏振光。此外，增益的饱和问题和保持宽带平顶增益谱 (wideband flat gain spectra) 等都是未来的研究方向。

参考文献:

[1] Choi S K, Li R D, Kim C et al. Traveling-wave optical parametric amplifier: investigation of its phase-sensitive and phase-insensitive gain response[J]. *J Opt Soc Amer B*, 1997, 14:1564~1575.

- [2] Onishi M, Okuno T, Kashiwida T, et al. Highly nonlinear dispersion-shifted fibers and their application to broadband wavelength converter[J]. *Opt Fiber Technol*, 1998, 4:204~214.
- [3] Stolen R H, Bjorkholm J E. Parametric amplification and frequency conversion in optical fibers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1982, QE-18:1062~1072.
- [4] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 2nd ed. San Diego, CA, USA: Academic press, 1995.
- [5] Vatarescu A. Light conversion in nonlinear single-mode optical fibers[J]. *J Lightwave Technol*, 1987, 5:1652~1659.
- [6] Inoue K, Mukai T. Signal wavelength dependence of gain saturation in a fiber optical parametric amplifier[J]. *Opt Lett*, 2001, 26:10~12.
- [7] Hansryd J, Andrekson P A. Broad-band continuous-wave-pumped fiber optical parametric amplifier with 49-dB gain and wavelength-conversion efficiency[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13:194~196.
- [8] Islam M N, Boyraz O. Fiber parametric amplifiers for wavelength band conversion[J]. *IEEE J Selected Topics in Quant Electron*, 2002, 8:527~537.
- [9] Hansryd J, Andrekson P A. Wavelength tunable 40 GHz pulse source based on fiber optical parametric amplifier[J]. *Electron Lett*, 2001, 37:584~585.
- [10] Hedekvist P O, Karlsson M, Andrekson P A. Fiber four-wave mixing demultiplexing with inherent parametric amplification[J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15:2051~2058.
- [11] Hansryd J, Andrekson P A. O-TDM demultiplexer with 40 dB gain based on a fiber optical parametric amplifier[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13:732~734.
- [12] Imajuku W, Takada A, Yamabayashi Y. Amplitude noise suppression using a high gain phase sensitive amplifier as a limiting amplifier[J]. *Electron Lett*, 1996, 32:677~679.
- [13] Li J, Hansryd J, Hedekvist P O, et al. 300 Gbit/s eye-diagram measurement by optical sampling using fiber based parametric amplification[J]. *Optical Fiber Communication Conf and Exhibit*, 2001, 4.
- [14] Yamamoto T, Nakazawa M. Active optical pulse compression with a gain of 29.0 dB by using four-wave mixing in an optical fiber[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, 9:1595~1597.

作者简介: 吕洪君 (1958-), 男, 1998 年获得中国科技大学硕士学位, 合肥工业大学副教授, 现从事光学与光电子学的研究。