

文章编号: 1001-3806(2007)04-0337-04

常规 DSF 光纤参变放大器的带宽拓宽研究

李建平, 罗斌*, 潘炜, 卢静, 王欣, 罗广军
(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 为了拓宽常规色散位移光纤(DSF)型双抽运光纤参变放大器(FOPA)的放大带宽,提出了用DSF和单模光纤(SMF)级联来构造周期色散补偿双抽运 FOPA 的思想。利用 SMF 正的二阶色散以减小 DSF 负的四阶色散引起的相位失配,从而达到有效拓宽 FOPA 放大带宽的目的。结合四波混频耦合方程对该双抽运 FOPA 进行仿真研究,得到拓宽为 69nm 的放大带宽的结果。结果表明,光纤长度一定时,采用给出的最佳补偿光纤长度进行色散补偿,可有效减小因 DSF 四阶色散引起的相位偏移,进而拓宽放大带宽;分多段级联进行色散补偿时,可进一步拓展放大带宽。

关键词: 光通信;增益带宽;色散补偿;光纤参变放大器

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Study on the bandwidth broadening of optical parametric amplifier based on conventional dispersion-shifted fiber

LI Jianping, LUO Bin, PAN Wei, LU Jing, WANG Xin, LUO Guangjun

(School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract In order to broaden the amplification bandwidth of conventional dispersion-shifted fiber(DSF) double-pumped fiber optical parametric amplifier (FOPA), a cascade configuration with periodic dispersion compensation composed of conventional DSF and singlemode fiber(SMF) was proposed. Utilizing the configuration, the phase mismatch caused by the negative fourth-order dispersion of DSF can be reduced by the positive second-order dispersion of SMF, thus the amplification bandwidth can be broadened efficiently. Utilizing the four-wave mixing coupling equations, the double FOPA was studied. Through simulation, a 69nm bandwidth after broadening was obtained. The results show, for a fixed DSF fiber length, using the optimal SMF length to compensate the dispersion, the phase mismatch induced by the fourth-order dispersion of DSF can be efficiently reduced and the amplification bandwidth can be broadened. It further shows that a larger bandwidth can be obtained by using multi-segment compensation.

Key words optical communication; gain bandwidth; dispersion compensating fiber optical parametric amplifier

引 言

近年来,随着密集波分复用光通信网络技术的迅速发展,在实际应用中对光放大器提出了越来越高的要求,利用色散位移光纤(dispersion-shifted fiber, DSF)、高非线性光纤(high-nonlinear optical fiber, HNLF)和光子晶体光纤设计光纤参变放大器(fiber optical parametric amplifier, FOPA)的研究成为提高光纤可利用带宽的一个热点课题^[1~4]。而满足相位匹配条件的波长范围大小是影响光纤参变放大器带宽的一个重要因素。对单抽运光纤参变放大器而言,由于转换效率与相位失配有很强的依赖关系^[5],高的转换效

率只发生在特定的信号波长,若信号波长稍微偏离这个条件,转换效率将急剧减小,进而限制了放大带宽。因此,人们开始研究双抽运 FOPA。与单抽运 FOPA 相比,双抽运 FOPA 可得到更宽的放大带宽和更平坦的参变增益^[6]。YANG 等人首先对双抽运光纤参变放大器进行了研究^[7]。最近, BIGGIO 等人利用 DSF 设计双抽运 FOPA 获得了超过 47nm 的平坦增益带宽^[8],并指出,由于零色散波长的纵向改变和偏振模色散的存在,常规 DSF 双抽运 FOPA 的带宽将受到限制。

然而,相位失配对双抽运 FOPA 同样有很大影响。非对称抽运时,三阶色散和四阶色散及非线性效应是引起相位失配的主要因素;对称抽运时,三阶色散的影响被消除,但四阶色散和非线性效应的影响依然存在。为进一步拓展放大带宽,在更宽的波长范围内减小四阶色散和非线性效应引起的相位失配就成为要解决的

作者简介:李建平(1982-),男,硕士研究生,从事光通信与光放大器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: bluo@home.swjtu.edu.cn

收稿日期:2006-06-14 收到修改稿日期:2006-12-12

关键问题。针对该问题,作者结合 DSF和单模光纤 (single mode fiber, SMF)来设计双抽运 FOPA。在对称抽运和忽略非线性影响前提下,提出利用 SMF的二阶色散 β_2' 周期补偿来减小因 DSF四阶色散 β_4 引起的相位偏移的方法,从而拓展放大带宽,同时给出选取最佳色散补偿光纤长度的依据。

1 理论原理

1.1 基本结构

由常规 DSF和 SMF构造 FOPA的基本结构如图 1所示。在此结构中,DSF的长度假定为 $L = Nl$,每一段

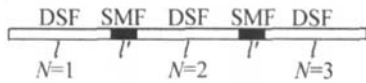


Fig 1 The configuration of FOPA with periodic dispersion compensation

DSF长度为 l 。信号光和抽运光从第 1段 DSF输入,从第 N 段 DSF输出。各段 DSF之间用长度为 l' 的 SMF连接。SMF总长度为 $L' = (N - 1)l'$ 。

1.2 理论模型

双抽运 FOPA 是利用光纤三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 引起的非简并四波混频原理将输入的信号光加以放大。设抽运光频率分别为 ω_{p1} 和 ω_{p2} ,信号光频率为 ω_s ,闲频光频率为 ω_i ,则非简并四波混频过程需满足条件^[9]:

$$\omega_{p1} + \omega_{p2} + \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

$$\Delta\beta = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_i) - \beta(\omega_{p1}) - \beta(\omega_{p2}) \quad (2)$$

$$\Omega_s = \omega_{p1} - \omega_s = \omega_i - \omega_{p2} \quad (3)$$

式中, $\Delta\beta$ 为相位失配, $\beta_x = n_x \omega_x / c$ 分别为各个光波的传播常数, Ω_s 为信号光频移, n_x 代表光纤模式折射率, c 为真空中的光速,下标 x 分别为 $p1, p2, s, i$ 表示抽运光,信号光和闲频光。

各光波在光纤中传输时,由于四波混频作用,它们的功率将随光纤长度的增加而发生演变。经推导,各功率之间的耦合方程可表示为^[11]:

$$\frac{dP_{p1}}{dz} = -\alpha P_{p1} - 4\gamma(P_{p1}P_{p2}P_sP_i)^{\frac{1}{2}} \sin\theta \quad (4)$$

$$\frac{dP_{p2}}{dz} = -\alpha P_{p2} - 4\gamma(P_{p1}P_{p2}P_sP_i)^{\frac{1}{2}} \sin\theta \quad (5)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = -\alpha P_s + 4\gamma(P_{p1}P_{p2}P_sP_i)^{\frac{1}{2}} \sin\theta \quad (6)$$

$$\frac{dP_i}{dz} = -\alpha P_i + 4\gamma(P_{p1}P_{p2}P_sP_i)^{\frac{1}{2}} \sin\theta \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dz} = \Delta\beta + 2\gamma \left[\frac{P_{p1}P_{p2}P_i}{P_s} \right]^{\frac{1}{2}} +$$

$$\left[\frac{P_{p1}P_{p2}P_s}{P_i} \right]^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{P_sP_{p2}P_i}{P_{p1}} \right]^{\frac{1}{2}} - \left[\frac{P_{p1}P_sP_i}{P_{p2}} \right]^{\frac{1}{2}} \right] \cos\theta + \gamma(P_{p1} + P_{p2} - P_s - P_i) \quad (8)$$

$$\theta(z) = \Delta\beta z + \Phi_s(z) + \Phi_i(z) - \Phi_{p1}(z) - \Phi_{p2}(z) \quad (9)$$

式中, $\gamma = 2\pi n_2 / \lambda_{eff} A_{eff}$ 为光纤非线性系数, n_2 为非线性参量, A_{eff} 为有效纤芯面积, P_x 分别为各光波的功率, Φ_x 分别为各光沿 z 轴传播的相位,下标 x 分别为 $p1, p2, s, i$; α 为光纤衰减因子, z 是光纤长度。

1.3 相位匹配条件与放大带宽

从(4)式~(7)式可以看出,通过控制相位 θ 可以控制非简并四波混频过程能量转移的流向。当 $\theta \in (0, \pi)$ 时,能量从抽运光流向信号光和闲频光,这时对应参量放大;当 $\theta \in (\pi, 2\pi)$ 时,能量从信号光和闲频光流向抽运光,这时对应参量衰减。

在对称于零色散频率 ω_0 抽运的情况下,即 $\omega_{p1} + \omega_{p2} = 2\omega_0$,DSF引起的相位失配 $\Delta\beta$ 主要来源于其高阶色散项 β_4 。通过推导可得 DSF和 SMF引起的相位失配分别为:

$$\Delta\beta = \frac{1}{12}\beta_4(\Delta\omega_s^4 - \Delta\omega_d^4), (l\text{段}) \quad (10)$$

$$\Delta\beta' = \beta_2'(\Delta\omega_s^2 - \Delta\omega_d^2), (l'\text{段}) \quad (11)$$

式中, β_4 和 β_2' 分别为 DSF四阶色散和 SMF二阶色散, $\Delta\omega_s = \omega_s - \omega_0$,为信号光频率与零色散频率间的差值; $\Delta\omega_d = (\omega_{p1} - \omega_{p2})/2 = \omega_{p1} - \omega_0$,为两抽运光频率差值的一半。

取抽运光波长 $\lambda_{p1} = \lambda_0 - d$,则:

$$\Delta\omega_d = 2\pi cd / [\lambda_0(\lambda_0 - d)] \quad (12)$$

式中, d 为抽运波长 λ_{p1} 与光纤零色散波长间的偏移量。

各光波在光纤中传输后,DSF和 SMF因相位失配而引起的总相位偏移为:

$$\Phi(L + L') = \Delta\beta L + \Delta\beta' L' = (\omega_s - \omega_{p1}) \times (\omega_s - \omega_{p2}) [\varphi_{DSF}(\omega_s) + \varphi_{SMF}(\omega_s)] \quad (13)$$

式中, $\varphi_{DSF}(\omega_s) = L\beta_4(\Delta\omega_s^2 + \Delta\omega_d^2)/12$, $\varphi_{SMF}(\omega_s) = L'\beta_2'$ 。由(13)式可以看出,当信号光波长等于两抽运光波长 ($\omega_s = \omega_{p1}$ 或 ω_{p2})时, $\Phi(L + L') = 0$

当信号光波长在两抽运光波长之间时,经分析可得 $\varphi_{DSF}(\omega_s) < 0$ 且其变化范围为 $(-L|\beta_4|\Delta\omega_d^2/6 - L|\beta_4|\Delta\omega_d^2/12)$,而 $\varphi_{SMF}(\omega_s) > 0$ 若适当选择 β_2' 和 L' , $\varphi_{DSF}(\omega_s)$ 与 $\varphi_{SMF}(\omega_s)$ 相加以后,就可以减小相位偏移波动的绝对值大小。通过计算,当满足下式时:

$$L' = \frac{|\beta_4|\Delta\omega_d^2}{8\beta_2'}L \quad (14)$$

$\varphi_{DSF}(\omega_s) + \varphi_{SMF}(\omega_s)$ 的变化范围成为 $(-L|\beta_4|\Delta\omega_d^2/24, L|\beta_4|\Delta\omega_d^2/24)$,定义此时 SMF长度

为最佳补偿长度。显然, 通过 SMF 的补偿, 相位偏移被平移到零附近的一对称区间, 且具有最小的波动绝对值。

根据 (14) 式所得 SMF 的长度, 画出的相位偏移曲线, 如图 2 所示。对于相同的相位偏移 $\Delta\Phi$, 比较

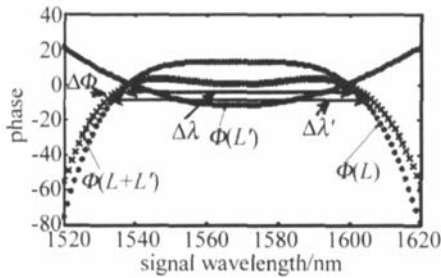


Fig 2 The relationship between phase offset and signal wavelength

$\varphi_{DSF}(\omega_s)$ 和 $\varphi_{DSF}(\omega_s) + \varphi_{SMF}(\omega_s)$ 的变化范围可知, 经过相位补偿后信号光的范围 $\Delta\lambda'$ 比相位补偿前信号光的范围 $\Delta\lambda$ 要宽, 这样就拓宽了放大器的放大带宽。

需要提及的是, 在采用色散补偿方法来拓展放大器带宽方面, MARH C^[10] 也做了相关研究。但与本文中的不同, 其利用 HNLF 和 DCF (dispersion compensating fiber) 级联来设计 FOPA。在这种结构中, 作者主要考虑了因 HNLF 高的非线性所引起的相位偏移, 但没有考虑高阶色散的影响。通过用 DCF 来周期色散补偿 HNLF 高非线性所引起的相位偏移, 拓展了放大带宽。

2 数值分析

模拟仿真采用色散位移光纤^[6], 零色散波长为 $\lambda_0 = 1568.2\text{nm}$, 衰减 $\alpha = 0.24\text{dB/km}$, 非线性因子 $\gamma = 2.1(\text{W} \cdot \text{km})^{-1}$, DSF 和 SMF 的典型色散值分别为 $\beta_4 = -10^{-4}\text{ps}^4/\text{km}$, $\beta_2 = 20\text{ps}^2/\text{km}$, 设输入信号功率为 $P_s = -20\text{dBm}$, 闲频光的初始功率为 $P_i = -60\text{dBm}$ 。

2.1 分段数 N 对 FOPA 的放大带宽的影响

图 3 中给出了相位偏移与光纤长度间的关系曲线。由图可见, 光纤长度越长, 因高阶色散引起的相位

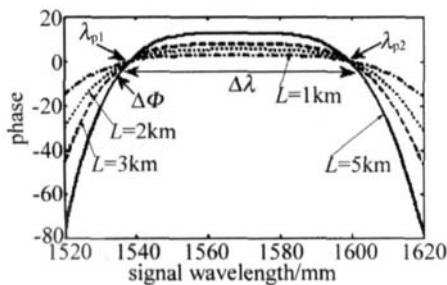


Fig 3 The relationship between phase offset and fiber length

偏移越大。在相同的 $\Delta\Phi$ 值下, 信号光的范围将越小。为获得宽的相位失配小的信号光范围, 应减小 DSF 长度。因抽运光波长 λ_{p1} , λ_{p2} 处相位失配为 0, 从而相位

偏移为 0。对于长度 L 一定的光纤, 将其分成 N 段, 使得每段的光纤长度较短, 再通过相位补偿, 从而获得较宽的带宽。

分段数 N 对 FOPA 的放大带宽的影响曲线如图 4 所示。图中, $L = 5\text{km}$, $d = 30\text{nm}$, $\lambda_{p1} = 1518.2\text{nm}$, 抽运

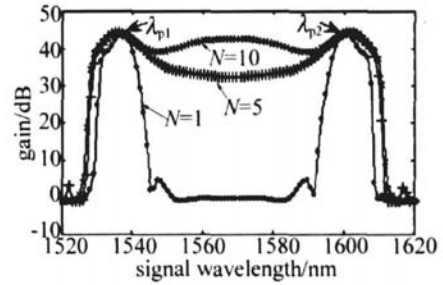


Fig 4 The influence of segment number N on the bandwidth of FOPA

功率 $P_0 = 400\text{mW}$ 。可以看出, 分段数 N 越大, FOPA 的放大带宽也越大。当 $N = 10$ 时, 在没有进行相位补偿情况下, 增益波动 5dB 的放大带宽只有 12nm, 而经过相位补偿后的放大带宽可达 69nm, 比未经补偿时的带宽增加了 57nm。

2.2 偏移量 d 与 FOPA 放大带宽之间的关系

图 5 中给出了 FOPA 放大带宽随偏移量 d 变化的关系曲线。图中, $L = 50\text{km}$, $N = 10$, $\lambda_{p1} = 1518.2\text{nm}$,

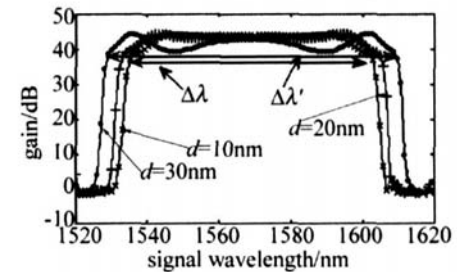


Fig 5 The relationship between offset d and bandwidth of FOPA

抽运功率 $P_0 = 400\text{mW}$ 。当偏移量 d 增大时, 相位偏移量将增大, 这将导致放大带宽变窄。但是, 通过 SMF 的色散补偿, 可以减小相位偏移量, 从而拓展相位失配小的信号光范围, 增大 FOPA 的放大带宽。从图可以看出, 偏移量 d 越大, FOPA 带宽越宽。

2.3 抽运光功率对 FOPA 放大带宽的影响

BEGD 等人^[8]指出, 抽运光功率的大小对光纤参变放大器的增益和放大带宽起着重要的作用。图 6 和图 7 中分别给出了色散补偿前和色散补偿后两种情况下, 抽运光功率大小与 FOPA 放大带宽间的关系曲线。图中, $L = 50\text{km}$, $N = 10$, $d = 30\text{nm}$, $\lambda_{p1} = 1518.2\text{nm}$, 由图可以看到, 抽运光功率越大, FOPA 的放大带宽越宽, 增益越大。然而, 色散补偿前, 由于在抽运光之间的相位偏移比较大, 带宽被限制在两抽运光附近的小范围内, 从而带宽比较小。色散补偿后, 减小了相位偏移, 使抽运光之间的信号光可以有效地放大, 这样就增

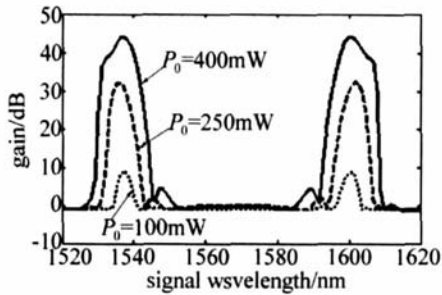


Fig 6 The influence of the pump power on the bandwidth of FOPA (uncompensated)

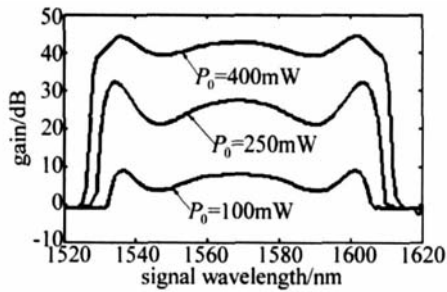


Fig 7 The influence of the power of pump on the bandwidth of FOPA (compensated)

大了放大带宽。从图可以明显看出,色散补偿后的放大带宽比色散补偿前的放大带宽要大得多。

3 结 论

建立了常规 DSF 和 SMF 级联的 FOPA 结构,并采用周期色散补偿法分析了该结构的主要性能。通过相位补偿减小了因四阶色散引起的相位偏移,并使得在抽运光之间的相位偏移具有最小的变化范围。通过模拟分析有:(1)对于长度一定的光纤,将其分段级联构造 FOPA 时,分段数 N 越大,放大带宽越宽,增益平坦度越好;(2)抽运光波长与零色散波长之间的偏移量 d 越大, FOPA 的放大带宽越宽;(3)抽运光功率越大,相

位补偿后的 FOPA 的放大带宽越宽,参量增益越大。综上所述,利用 DSF 和 SMF 构造双抽运 FOPA 时,进行周期色散补偿来减小四阶色散引起的相位失配,可有效的拓宽 FOPA 放大带宽。

参 考 文 献

- [1] PAROLARI P, MATAZZI L, ROGNONI E *et al*. Influence of pump parameters on two pump optical parametric amplification [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(8): 2524~2529.
- [2] TOROUNIDEST, ANDREKSON P A, OLSSON B E. Fiber optical parametric amplifier with 70dB gain [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 10(18): 1194~1196.
- [3] WABNITZ S. Broadband parametric amplification in photonic crystal fibers with two zero dispersion wavelengths [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(4): 1732~1738.
- [4] CAO H, CHEN G J. Design and application of high performance fiber optical parametric amplifier [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 383~386 (in Chinese).
- [5] NOUE K. Four-wave mixing in an optical fiber in the zero dispersion wavelength region [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(11): 1553~1561.
- [6] MCKINSTRICH J, RASIC S, CHRAPLYVY A R. Parametric amplifiers driven by two pump waves [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(3): 538~547.
- [7] YANG F S, HOM C, MARHEC E *et al*. Demonstration of two pump fiber optical parametric amplification [J]. Electron Lett, 1997, 33(21): 1812~1813.
- [8] BIGGIO J M C, MARCONI J D, FRAGNITO H L. Double pumped fiber optical parametric amplifier with flat gain over 47nm bandwidth using a conventional dispersion-shifted fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(9): 1842~1844.
- [9] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics [M]. 3rd ed, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002, 245~247 (in Chinese).
- [10] MARHEC E, YANG F S, HOM C *et al*. High nonlinearity fiber optical amplifier with periodic dispersion compensation [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(2): 210~215.

最新收录情况

本刊近日被美国《化学文摘》CA 数据库收录,欢迎广大读者踊跃投稿!