

文章编号 : 0253-2239(2001)06-0664-03

色散位移光纤中零色散波长纵向分布对四波混频转换效率的影响

何勇志 安宏林 林祥芝 刘弘度

(北京大学物理系及介观物理国家重点实验室,北京 100871)

摘要: 研究了色散位移光纤零色散区域附近的四波混频特性,讨论了当零色散波长彼此不同的多段光纤连接起来后对四波混频效率的影响。理论计算结果表明,在信号光和抽运光波长间隔较小的区域,各光纤对四波混频过程都有贡献,且互相调制,并出现增益现象,有着很复杂的效率图。

关键词: 色散位移光纤;四波混频;波长转换

中图分类号: TN25 文献标识码: A

色散位移光纤中四波混频特性的研究对于波长转换^[1]、光解时分复用^[2]及光谱反转^[3]具有十分重要的意义。利用其四波混频特性制成的光交换器件具有位码率全透明、速率高及啁啾反转的优点,故具有广泛的应用前景。色散位移光纤中的四波混频效率及转换带宽受相位匹配条件的制约,而相位匹配条件又是由色散位移光纤的零色散波长分布决定的,因此有必要讨论零色散波长分布给四波混频带来的影响。对零色散波长恒定的色散位移光纤,通常是将抽运光的波长置于光纤的零色散波长处以达到相位匹配条件^[4]。这种情况下是不会发生调制不稳定过程的(增益放大过程),但在抽运光波长略大于零色散波长的情况下,在零色散波长附近会发生增益放大过程^[5]。实际应用的色散位移光纤其零色散波长沿光纤的长度方向分布并不均匀(主要是由工艺过程中的微扰因素造成的),因此其中的四波混频过程及调制不稳定现象不同于零色散波长恒定的色散位移光纤。故研究零色散波长的分布对四波混频效率的影响具有一定的实际意义。

本文从理论上讨论了两段连在一起的零色散波

长靠近但不相同的色散位移光纤中的四波混频的特性,计算模拟出在信号光和抽运光间隔较小和较大两种情况下四波混频的三维效率曲线。

1 理论分析

假设零色散波长 $\lambda_0 = 1548 \text{ nm}$ 和 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 的两段光纤连接成一条光纤作为四波混频的研究对象。设该两段光纤均为保偏光纤,且连接后仍然保偏,虽然保偏光纤的损耗较一般光纤大,但由于在以下分析中所选取光纤的长度较短,故损耗仍可以忽略不记。光纤的连接损耗也被忽略。所选取的参数如下:第一段光纤长度 $L_1 = 2 \text{ km}$,第二段光纤长度 $L_2 = 2 \text{ km}$,两段光纤非线性参数为 $\gamma_1 = \gamma_2 = 2.2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,零色散波长附近的色散斜率为 $D'_{\lambda_1} = D'_{\lambda_2} = 0.085 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}$,抽运光功率 $P = 60 \text{ mW}$ 。

在抽运光近似不消耗的条件下,对于任何一条零色散波长恒定的色散位移光纤,四波混频过程后产生的信号光的共轭光 $A_c(z)$ 及信号光 $A_s(z)$ 计算结果为(计算过程参考文献[6]):

$$A_c(z) = \left[\frac{i\gamma A_p^2 A_s^*(0)}{g} \sinh gz + A_c(0) \cosh gz + i \frac{K}{2} A_c(0) \frac{\sinh gz}{g} \right] \exp \left[-\frac{i\Delta kz}{2} + i\gamma Pz \right], \quad (1)$$

$$A_s(z) = \left[\frac{i\gamma A_p^2 A_c^*(0)}{g} \sinh gz + A_s(0) \cosh gz + i \frac{K}{2} A_s(0) \frac{\sinh gz}{g} \right] \exp \left[-\frac{i\Delta kz}{2} + i\gamma Pz \right], \quad (2)$$

其中 z 为光波传播方向, A_p 为抽运光的振幅, $A_c(0)$ 为入射的信号光的振幅, Δk 为四波混频过程中色散

引起的相位失配。由于抽运波长位于两段色散位移光纤零色散波长的附近,所以 Δk 可以表示为^[1]

$$\Delta k = k_s + k_c - 2k_p \approx - (2\pi c / \lambda_p^2) D_\lambda (\lambda_s - \lambda_p) (\lambda_p - \lambda_0), \quad (3)$$

其中 $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_0$ 分别代表抽运、信号光的波长及色散位移光纤的零色散波长, c 代表真空中光速, K 代表四波混频过程中总的相位失配, 可以表示为

$$K = \Delta k + 2\gamma P, \quad (4)$$

其中第二项为交叉相位调制非线性效应引起的相位失配, g 为四波混频过程的增益因子, 可表示为^[6]

$$g = \sqrt{(\gamma P)^2 - (K/2)^2}, \quad (5)$$

该因子可以为虚数, 但在 $g > 0$ 的范围内(即增益区内)将出现调制不稳定现象。

对于上述假设的两条色散位移光纤连接在一起的情况, 可以使用(1)式和(2)式来分别计算两条色散位移光纤中信号及共轭光的幅度。由于注入端 $A_c(0) = 0$, 经过第一条色散位移光纤后的结果为

$$A_c(L_1) = [i\gamma_1 A_p^2 A_s^*(0) / g_1] \sinh g_1 L_1 \times \exp[-(i\Delta k_1 L_1)/2 + i\gamma_1 P L_1], \quad (6)$$

$$A_s(L_1) = A_s(0) \left(\cosh g_1 L_1 + i \frac{K_1}{2} \frac{\sinh g_1 L_1}{g_1} \right) \times \exp[-(i\Delta k_1 L_1)/2 + i\gamma_1 P L_1], \quad (7)$$

将(6)式和(7)式作为初始信号及共轭光代入(1)式和(2)式即可得经过第二条光纤后的四波混频结果:

$$A_c(L_2) = \left[\frac{i\gamma_2 A_p^2 A_s^*(L_1)}{g_2} \sinh g_2 L_2 + A_c(L_1) \cosh g_2 L_2 + i \frac{K_2}{2} A_c(L_1) \frac{\sinh g_2 L_2}{g_2} \right] \exp\left[-\frac{i\Delta k_2 L_2}{2} + i\gamma_2 P L_2\right], \quad (8)$$

$$A_s(L_2) = \left[\frac{i\gamma_2 A_p^2 A_c^*(L_1)}{g_2} \sinh g_2 L_2 + A_s(L_1) \cosh g_2 L_2 + i \frac{K_2}{2} A_s(L_1) \frac{\sinh g_2 L_2}{g_2} \right] \exp\left[-\frac{i\Delta k_2 L_2}{2} + i\gamma_2 P L_2\right]. \quad (9)$$

由于(8)式和(9)式比较复杂, 得到解析解比较困难。以下利用计算机模拟方法来分析共轭光的转换效率和带宽特性。

2 结果及其讨论

定义四波混频的转换效率为

$$\eta = |A_c(L_2) / A_s(0)|^2. \quad (10)$$

图1是四波混频的三维转换效率图。为了更好地理解该效率图的特性, 我们将该效率图分成图1(a)和图1(b)。

由图1(a)可以看出, 在 $|\lambda_s - \lambda_p| < 3 \text{ nm}$, $\lambda_p > 1549 \text{ nm}$ 区域, 有很明显的调制不稳定现象。此结果可从(4)式和(5)式得到解释。在 $|\lambda_s - \lambda_p| = 0$ 区域附近, 当 $\lambda_p > 1549 \text{ nm}$ (此波长是两段光纤的平

均零色散波长)时, 两段色散位移光纤中的总增益因子 $g > 0$, 因而会出现调制不稳定性。

图1(b)为非增益区的效率图。可以看到在 $\lambda_p = 1548 \text{ nm}$ 和 1550 nm 波长处有两个关于 1549 nm 波长近似对称的平行效率峰。 $|\lambda_s - \lambda_p|$ 逐渐变小时, 两峰逐渐重合并在 1549 nm 处出现效率峰。这种现象主要是由于相位失配项 Δk 引起的, 因为在 $|\lambda_s - \lambda_p|$ 足够小的情况下, Δk 在 1549 nm 处也变得很小, 因而效率会上升且出现峰。

从图1(a)和图1(b)还可以看出该四波混频效率带宽最宽的区域应该是 $\lambda_p = 1548 \text{ nm}$ 和 1550 nm 处。在远离增益区的 $|\lambda_s - \lambda_p|$ 波长区域, 两条平行峰几乎没有任何关系。这种现象的原因在于无论 $\lambda_p = 1548 \text{ nm}$ 还是 $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$, 其中必有一条光纤中的相位失配很大, 其转换出的共轭光可以忽略。如

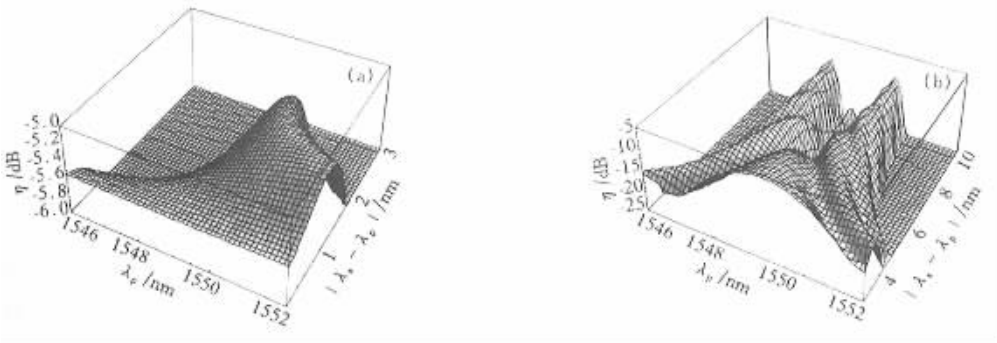


Fig. 1 Conversion efficiency of the idler light versus the pump wavelength and the wavelength separation of the signal from the pump

$\lambda_p = 1550 \text{ nm}$, 则在第一条光纤中的四波混频过程可以忽略。

一个有趣的现象是, 当 $\lambda_p = 1549 \text{ nm}$ (刚好是两条光纤的平均零色散波长) 时, 调制不稳定现象在总体上并没有显现出来(如图 2)。基于前面的分析, 可以知道在第一条光纤中的四波混频过程中 Δk 恒小于零, 故在 $-2\gamma_1 P < \Delta k < 0$ 区域有调制不稳定过程发生。但第二条光纤的零色散波长大于 λ_p ($g = i|g| \neq 0$), 在它里面发生的四波混频效率随 $|\lambda_s - \lambda_p|$ 增加而单调下降。从总体上来说, 这种下降刚好抵消了第一条光纤中的增益现象, 因而增益现象未显现出来。这说明一条光纤的平均零色散波长是一个非常特殊的点, 只有抽运光波长大于这个点时四波混频过程才出现调制不稳定现象。这个特

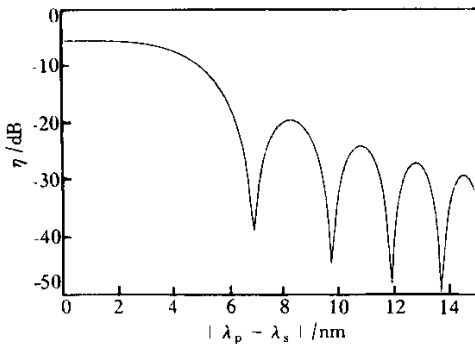


Fig.2 Conversion efficiency of the idler light versus the wavelength separation of the signal from the pump. $\lambda_p = 1549 \text{ nm}$

性可被用来测定色散位移光纤的零色散波长^[7]。

结论 研究了两段色散位移光纤连接在一起时的四波混频特性, 发现 $|\lambda_s - \lambda_p|$ 足够大时, 两条光纤可以看作是独立的, 只有满足相位匹配条件的其中一条色散位移光纤对四波混频有贡献。而在增益区及其附近, 由于两条光纤中相位失配都足够小及调制不稳定等原因, 四波混频效率三维曲线有着很复杂的形状。从这种光纤的调制不稳定的特性可以看出, 平均零色散波长是一个非常特殊的点。

参 考 文 献

- [1] Inoue K. Four-wave mixing in an optical Fiber in the zero-dispersion wavelength region. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11):1553 ~ 1561
- [2] Morioka T, Takara H, Kawanishi S *et al.*. Error-free 500 Gbit/s all-optical demultiplexing using low-noise, low-jitter supercontinuum short pulses. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(1): 833 ~ 834
- [3] Inoue K. Spectral inversion with no wavelength shift based on four-wave mixing with orthogonal pump beams. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(23):1772 ~ 1774
- [4] Kikuchi K, Lorattanasane C. Design of highly efficient four-wave mixing devices using optical fibers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1):992 ~ 994
- [5] Nowak G A, Kao Y H, Xia T J *et al.*. Low-power high-efficiency wavelength conversion based on modulational instability in high-nonlinearity fiber. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(12):936 ~ 938
- [6] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. New York: Academic, 1989. 315 ~ 355
- [7] Nishi S, Saruwatari M. Technique for measuring the distributed zero dispersion wavelength of optical fibres using pulse amplification caused by modulation instability. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(3):225 ~ 226

Effect of Longitudinal Zero-Dispersion Wavelength Variation along Dispersion-Shifted Fiber on the Four-Wave Mixing Conversion Efficiency

He Yongzhi An Honglin Lin Xiangzhi Liu Hongdu

(Mesoscopic Physics National Laboratory and Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

(Received 10 November 1999; revised 27 March 2000)

Abstract: The four-wave mixing behavior near the zero-dispersion region of the dispersion-shifted fiber is theoretically studied and the case in which several dispersion-shifted fibers with different zero-dispersion wavelengths are combined together for four-wave mixing is considered. The results show that the four-wave mixing in all the dispersion-shifted fibers contributes to the total conversion efficiency, the parametric gain is apparent and the three-dimension efficiency line is very complicated when the signal-pump wavelength separation is small enough.

Key words: dispersion-shifted fiber; four-wave mixing; wavelength conversion