

# 偏振光纤中受激四光子混频及其应用

杨天龙 高佩娟

(上海科学技术大学物理系, 上海 201800)

## 提 要

本文给出了双折射光纤中不同模式和偏振组合时受激四光子混频的频移和双折射的关系。文中对正交分泵受激四光子混频应用于光纤总色散的测量进行了实验研究。

关键词: 受激四光子混频、双折射、光纤维、色散。

受激四光子混频要求相互作用的四个光子的频率和波矢满足相位匹配条件。为了达到相位匹配, 可以利用不同的波导模, 也可利用光纤的双折射<sup>[1]</sup>。本文的目的在于考虑双折射的情况下, 给出不同偏振和模式组合条件下, 波导参量、双折射与四光子混频频移的关系, 并应用正交分泵受激四光子混频的组态, 进行偏振光纤总色散的测量。

## 一、偏振光纤中受激四光子混频的频移

为了满足动量和能量守恒条件, 对相互作用的四个光子, 其频率为  $\omega_a, \omega_s, \omega_{p_1}$  和  $\omega_{p_2}$ , 波矢为  $k_a, k_s, k_{p_1}$  和  $k_{p_2}$  应满足下列关系

$$\omega_{p_1} + \omega_{p_2} = \omega_a + \omega_s, \quad k_{p_1} + k_{p_2} = k_a + k_s, \quad (1)$$

脚标  $p_1, p_2, a$  和  $s$  分别为泵浦光 1, 泵浦光 2, 反斯托克斯光和斯托克斯光的相应参量。泵浦光 1 和泵浦光 2, 可以是频率不同, 也可以是波导模式不同。取波数  $\nu = 1/\lambda$ ,  $\lambda$  为真空中光波长, 设包层和纤芯折射率差  $\Delta n = n_2 - n_1$ , 且相对折射率差  $\Delta = (\Delta n/n) \ll 1$ , 则有

$$\left. \begin{aligned} \Delta\omega &= \omega_a - \omega_{p_1} = \omega_{p_2} - \omega_s = 2\pi c \cdot \Delta\nu, \\ \Delta\nu &= \nu_a - \nu_{p_1} = \nu_{p_2} - \nu_s. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

波导模的传输常数为

$$\beta_{j, l\mu} = 2\pi n_j \nu_j - 2\pi \Delta n (1 - b_{j, l\mu}) \nu_j, \quad (3)$$

式中下标  $j$  和  $l, \mu$  分别表征波导模的频率和模式。相应的传输常数差为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\beta &= \beta_a + \beta_s - \beta_{p_1} - \beta_{p_2} = \Delta\beta_m + \Delta\beta_w, \\ \Delta\beta_m &= 2\pi [(n_a + n_s - n_{p_1} - n_{p_2}) \nu_p + (n_a - n_s) \Delta\nu], \\ \Delta\beta_w &= 2\pi \Delta n [(b_a + b_s - b_{p_1} - b_{p_2}) \nu_p + (b_a - b_s) \Delta\nu]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $\nu_p$  为泵浦光的波数\*。设相对频移很小, 即  $|\Delta\nu/\nu| \ll 1$ , 以及所有导波模近轴传输, 则  $n_a$  和  $n_s$  可展开为

收稿日期: 1990年10月19日; 收到修改稿日期: 1991年1月10日

\* 此处实际上已将两个泵浦光的频率设为相同,  $p_1, p_2$  作为泵浦光的模式及偏振标记。

$$\left. \begin{aligned} n_s &= n_p - \frac{dn}{d\nu} \Delta\nu + \frac{1}{2} \frac{d^2n}{d\nu^2} (\Delta\nu)^2 \pm \frac{1}{2} \Delta n_B, \\ n_a &= n_p + \frac{dn}{d\nu} \Delta\nu + \frac{1}{2} \frac{d^2n}{d\nu^2} (\Delta\nu)^2 \pm \frac{1}{2} \Delta n_B, \\ \Delta n_B &= n_{\perp} - n_{\parallel}, \quad n_{\parallel} = n - (\Delta n_B/2), \quad n_{\perp} = n + (\Delta n_B/2). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

设  $\Delta n_B$  与波长无关(在小频移范围), 光纤平均折射率  $n = [(n_{\parallel} + n_{\perp})/2]$  相应于没有双折射时的折射率, 则  $n_{\perp}$  波为慢波,  $n_{\parallel}$  波为快波。将(5)式代入(4)式对几种模式和偏振组合时的传输常数差可写成下列几种表达式。

(1) 光子  $\alpha, s, p_1, p_2$  处于同一偏振, 有

$$\Delta\beta_m = A \cdot (\Delta\nu)^2, \quad A = 2\pi \left[ 2 \frac{dn}{d\nu} + \nu_p \frac{d^2n}{d\nu^2} \right]. \quad (6)$$

(2) 光子  $\alpha$  和  $s, p_1$  和  $p_2$  处于不同偏振态, 则有

$$\Delta\beta_m = A (\Delta\nu)^2 \pm B (\Delta\nu)^2, \quad B = 2\pi \Delta n_B, \quad (7)$$

其中“+”号对应于  $\alpha$  波是快波, “-”号对应于慢波。

(3)  $\alpha$  波和  $s$  波,  $p_1$  波和  $p_2$  波处于同一偏振, 但  $\alpha$  波和  $p_1$  波,  $s$  波和  $p_2$  波处于不同偏振, 此时有

$$\Delta\beta_m = A (\Delta\nu)^2 \pm B \nu_p, \quad (8)$$

此处“+”号对应于泵浦光是快波, “-”号对应于慢波。

(4)  $\alpha$  波和  $s$  波偏振相同,  $p_1$  波和  $p_2$  波偏振不同, 此时

$$\Delta\beta_m = A (\Delta\nu)^2 \pm B \nu_p, \quad (9)$$

“+”号对应于  $\alpha$  波(或  $s$  波)是快波, “-”则对应于慢波。

(5)  $\alpha$  波和  $s$  波偏振不同,  $p_1$  波和  $p_2$  波偏振相同, 则

$$\Delta\beta_m = A (\Delta\nu)^2 \pm B \Delta\nu \pm B \nu_p, \quad (10)$$

此处“+”号对应于  $p_1$  波、 $\alpha$  波为快波,  $s$  波为慢波; “-”号对应的情况则反之。

如果  $|\Delta n_B| \ll 1$ , 则光纤材料仍可看成各向同性, 上述情况(4)和(5)将不会出现。由于归一化传输常数  $b$  仅由  $\Delta n$  决定, 如果取包层和纤芯折射指数差  $\Delta n_{\parallel} \approx \Delta n_{\perp}$ , 所有导模都近轴传输, 则可以认为  $b$  与双折射无关。在将传输常数  $\beta$  的表达式(3)式中与波导有关的部分以泵浦光频率为中心作展开之后,  $\Delta\beta_w$  可写成

$$\left. \begin{aligned} (-\Delta\beta_w) &= C + D(\Delta\nu) - E(\Delta\nu)^2, \\ C &= 2\pi\nu_p \Delta n (b_{p_1} + b_{p_2} - b_{sp} - b_{ap}), \quad D = 2\pi \Delta n [d(b_{sp}V - b_{ap}V)/dV]_{\nu_p}, \\ E &= 2\pi^2 \Delta n \cdot n_1 a \sqrt{2\Delta n/n} [d^2(b_{sp}V + b_{ap}V)/dV^2]_{\nu_p}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中  $V$  代表归一化频率,  $b_{p_1}, b_{p_2}, b_{sp}, b_{ap}$  为泵浦光、斯托克斯光和反斯托克斯光在泵浦频率处的归一化传输常数。在(11)式中, 常数  $C$  可看作由归一化传输常数  $b$  决定的四光子相互作用的相位匹配的失配, 常数  $D$  和  $E$  分别与斯托克斯先和反斯托克斯光在泵浦频率处的单位长度的时延差和脉冲展宽有关。如果四光子混频过程发生在不同的模中, 则  $E \cdot (\Delta\nu)^2$  项可略。从(6)式到(11)式给出了不同的模式和偏振组合时, 满足  $\Delta\beta = 0$  条件的受激四光子混频的频移表达式。首先, 对于(7)式所表达的偏振组合, 频移为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\nu_{\perp, \alpha} &= [(D - B) + \sqrt{(D - B)^2 + 4AC}] / 2A, \\ \Delta\nu_{\parallel, \alpha} &= [(D + B) + \sqrt{(D + B)^2 + 4AC}] / 2A. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

对于由(8)式表达的偏振组合, 频移为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\nu_{\perp,a} &= [D + \sqrt{D^2 + 4A(C - 2B\nu_p)}] / 2A, \\ \Delta\nu_{\parallel,a} &= [D + \sqrt{D^2 + 4A(C + 2B\nu_p)}] / 2A. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

在(12)式和(13)式中,  $\Delta\nu_{\perp,a}$  和  $\Delta\nu_{\parallel,a}$  代表相应于慢波和快波反斯托克斯光子的频移。

## 二、几种特殊的模式和偏振组合的频移差

(1)  $C=0, D>0$ , 由(12)式, 给出( $\perp, a$ )波和( $\parallel, a$ )波的频移差为

$$\delta(\Delta\nu)_{\perp,\parallel,a} = \frac{2B}{A}, \quad (14)$$

此处  $\delta(\Delta\nu)_{\perp,\parallel,a} = \Delta\nu_{\perp,a} - \Delta\nu_{\parallel,a}$  此外, ( $\perp, a$ )波和( $\parallel, a$ )波对于  $B=0$ , 即无双折射效应时的频移差为

$$\delta(\Delta\nu)_{\perp,\parallel,a} = -\delta(\Delta\nu)_{\parallel,\perp,a} = -\frac{B}{A}. \quad (15)$$

由(12)式,  $B=0$  时的  $\Delta\nu_0 = (D/A)$ 。

(2)  $C=0, D>0$ , 由(13)式可得

$$\left. \begin{aligned} \delta(\Delta\nu)_{\perp,\parallel,a} &= \frac{1}{2} \left[ \sqrt{(\Delta\nu_0)^2 + \frac{8B\nu_p}{A}} - \sqrt{(\Delta\nu_0)^2 - \frac{8B\nu_p}{A}} \right], \\ \delta(\Delta\nu)_{\parallel,\perp,a} &= \frac{\Delta\nu_0}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{8B\nu_p}{(\Delta\nu_0)^2}} \right], \quad \delta(\Delta\nu)_{\parallel,\perp,a} = \frac{\Delta\nu_0}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 + \frac{8B\nu_p}{(\Delta\nu_0)^2}} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

在(16)式中,  $\Delta\nu_0 = (D/A)$ , 为  $B=0$  时的频移。

(3)  $C>0, D=0$ , 由(12)式可得

$$\left. \begin{aligned} \delta(\Delta\nu)_{\perp,\parallel,a} &= (B/A), \\ \delta(\Delta\nu)_{\perp,\parallel,a} &= \Delta\nu_0 \left[ \sqrt{1 + \frac{B^2}{4A^2(\Delta\nu_0)^2}} - 1 \right] - \frac{B}{2A}, \\ \delta(\Delta\nu)_{\parallel,\perp,a} &= \Delta\nu_0 \left[ \sqrt{1 + \frac{B^2}{4A^2(\Delta\nu_0)^2}} - 1 \right] + \frac{B}{2A}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中  $\Delta\nu_0 = (C/A)^{1/2}$ , 为  $B=0$  时的频移。

(4)  $C>0, D=0$ , 由(13)式得到的频移差是

$$\left. \begin{aligned} \delta(\Delta\nu)_{\perp,\parallel,a} &= \Delta\nu_0 \left[ \sqrt{1 + \frac{2B\nu_p}{A(\Delta\nu_0)^2}} - \sqrt{1 - \frac{2B\nu_p}{A(\Delta\nu_0)^2}} \right], \\ \delta(\Delta\nu)_{\perp,\parallel,a} &= \Delta\nu_0 \left[ \sqrt{1 - \frac{2B\nu_p}{A(\Delta\nu_0)^2}} - 1 \right], \quad \delta(\Delta\nu)_{\parallel,\perp,a} = \Delta\nu_0 \left[ \sqrt{1 + \frac{2B\nu_p}{A(\Delta\nu_0)^2}} + 1 \right], \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中  $\Delta\nu_0 = (C/A)^{1/2}$ , 为  $B=0$  时的频移。

(5)  $D=0, C=0$ , 这种情况可对应于四个相互作用的光子在同一种波导模中时的四光子混频过程。此时的模式色散仅由偏振决定。由(7)式和(11)式可得相应的频移为

$$\Delta\nu_{\parallel,a} = -\Delta\nu_{\perp,a} = [B/(A+E)]. \quad (19)$$

由于负频移相当于  $s$  波, 因此(19)式表示只存在一对  $s$  波和  $a$  波, 而且  $a$  波应是快波。此外, 由(8)式和(11)式, 对  $s$  波和  $a$  波同偏振时的频移为

$$\Delta\nu_{f,a} = [2B\nu_p / (A + E)]^{1/2} \quad (20)$$

此时亦要求反斯托克斯光是快波, 亦即泵浦光是慢波。

从(15)~(20)式可看出, 实验可测量得四光子混频的频移、频移差和模式组合与材料色散, 波导色散和双折射的关系。特别简单和很有用的情况是(14)式、(15)式、(17)和(19)式, 其时频移是双折射率  $B$  成正比, 与泵浦频率无关, 也与  $B=0$  时的  $\Delta\nu_0$  无关。

### 三、四光子混频用于光纤总色散的测定

对阶跃或方幂折射率分布的光纤, 与脉冲加宽有关的“特征色散”可写成

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_w, \quad \sigma_m = \left( \frac{\lambda^2}{c} \right) \frac{d^2 n}{d\lambda^2}, \quad \sigma_w = \frac{n_1 - n_2}{c} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad (21)$$

当信号脉冲通过光纤时, 由于光源单色程度导致的脉冲加宽可写成

$$\tau = \sigma(\delta\lambda/\lambda) \quad (22)$$

式中  $(\delta\lambda/\lambda)$  为光信号的相对带宽, 并称  $\sigma$  为总色散。在四光子混频的特殊情况(19)式和(20)式中, 决定频移的两个波导参量  $A$  和  $E$  与特征色散的关系是

$$\sigma_m = A/2\pi c\lambda, \quad \sigma_w = E/2\pi c\lambda \quad (23)$$

对特别简单的(19)式, 它代表偏振分泵,  $a$  波和  $s$  波的偏振互相垂直的四光子混频过程。此时, 总色散和频移的关系是

$$\sigma = B/2\pi c\lambda\Delta\nu \quad (24)$$

显然, 由于  $B$  和  $\Delta\nu$  都可由实验测定, 总色散就可以由四光子混频法来求得。

### 四、实 验

测定光纤中四光子混频的频移和模式的实验系统如图 1 所示。从调 Q 的 Nd:YAG 激光器发射的激光, 通过 KDP 晶体倍频器倍频成波长  $0.53 \mu\text{m}$  的绿光, 然后经过透镜注入到被测光纤中作为泵浦光。四光子混频辐射经过透镜, 棱镜之后在远处平面屏上形成色散开的光纤端面辐射模式象, 并被照相纪录, 去掉色散棱镜, 将准直了的四光子混频辐射通过一

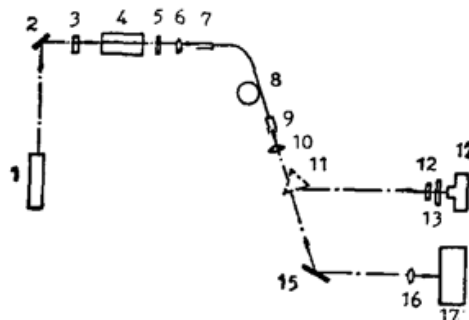


Fig. 1 The experimental set-up for measuring the frequency shift and pattern of the SFPM  
 1. Nd:Yag laser with Q-switching; 2. The mirror of  $1.06 \mu\text{m}$  total reflection; 3. The filter of  $0.53 \mu\text{m}$ ; 4. KDP crystal doubler; 5. The filter of  $1.06 \mu\text{m}$ ; 6. The lens for focusing; 7, 9. The clips for holding the optical fiber; 8. The optical fiber tested; 10. The lens for collimating; 11. The prism for dispersing; 12. The analyzer; 13. The screen; 14. The camera; 15. The total reflection mirror; 16. The cylinder lens; 17. The spectrograph

圆柱透镜成焦在光栅摄谱仪的输入狭缝上, 进行光谱纪录。

被测光纤的长度约 400 cm, 其标称单模波长是  $0.632 \mu\text{m}$ , 芯径  $2.5 \mu\text{m}$ , 包层直径  $100 \mu\text{m}$ , 折射率差 0.006。在  $0.63 \mu\text{m}$  处, 其拍长为 1.5 mm, 损耗 7 dB/km。光纤松绕在周长 100 cm 的圆筒上, 两端留出各约 50 cm。

摄谱仪光栅 1200 l/mm, 闪耀波长 570 nm, 线色散为  $0.8 \text{ nm/mm}$ , 狭缝  $0.02 \text{ mm}$ 。实验中观察到的受激四光子混频的辐射模斑如图 2 所示。图 2(a) 是包括泵浦光, 斯托克斯光(左边)和反斯托克斯光(右边)的模斑照片。在图 2 照片中靠左边的是受激喇曼散射的宽带光斑。调节检偏器, 可观测到只有斯托克斯和泵浦光的模斑, 如图 2(b) 所示, 此时将检偏器转过  $90^\circ$  角, 则可以观测到仅有泵浦光和反斯托克斯的模斑, 如图 2(c) 所示。此结果表明, 泵浦光应是分布在互相垂直的线偏振状态中, 而斯托克斯和反斯托克斯光不仅是线偏振的, 且它们的偏振互相垂直。此外, 受激喇曼散射在实验观测中不能通过转动检偏器而消失, 说明它不是线偏振的, 为了获得有效的正交分泵受激四光子混频, 必需使光纤折射率主轴与入射的泵浦光的偏振方向有适当的相对配置。图 3 给出四光子混频的光谱, 光谱结果表明, 斯托克斯或反斯托克斯光的频移  $\Delta\nu = 102 \text{ cm}^{-1}$ 。为了用 (21) 式, (23) 式来估测光纤总色散, 实验取光纤材料在  $0.532 \mu\text{m}$  处的材料色散  $\lambda^2(d^2n/d\lambda^2) = 0.072^{[2]}$ , 由此和根据本文实验结果, 可导得被测光纤的色散特性列于表 1。在表 1 中, 作为比较, 给出了在  $0.85 \mu\text{m}$  和  $0.95 \mu\text{m}$  波长处由光纤的弱导理论导得的  $\sigma_m$  和  $\sigma_w$ 。由此可看出本文的实验结果与

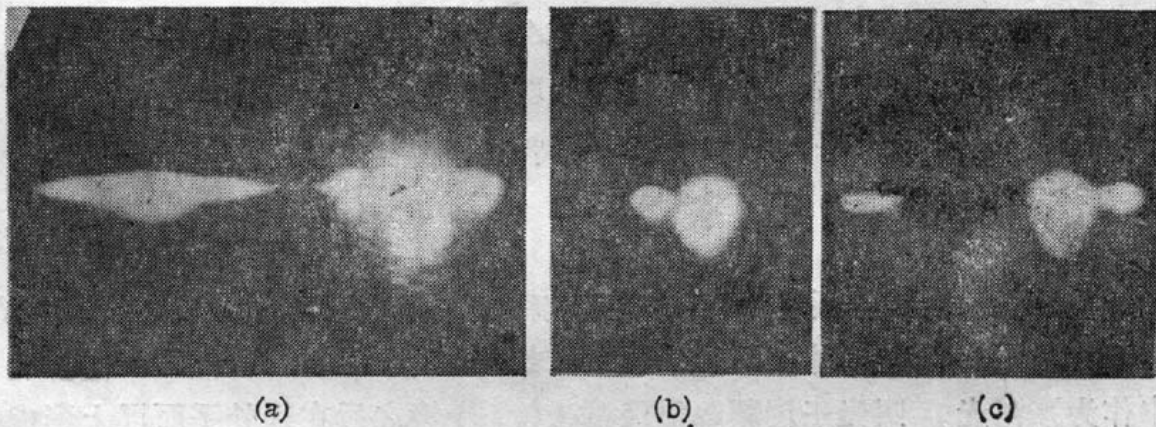


Fig. 2 The photos of SFPM mode-pattern

- (a) The mode-pattern untested with the analyzer;
- (b) The mode-pattern of Stokes and pumping light tested with the analyzer;
- (c) The mode-pattern of anti-Stokes and Pumping tested with the analyzer turning with a  $90^\circ$  angle

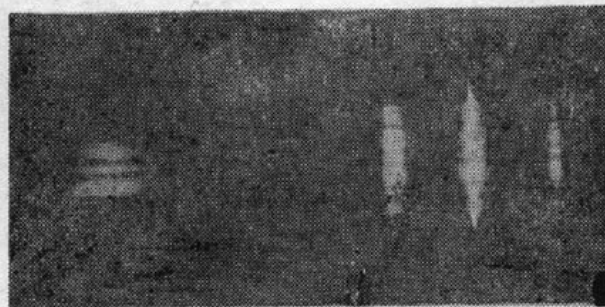


Fig. 3 The spectral photos of the SFPM

The middle sharp line is of pumping light, the line on the right is of anti-Stokes light, the line on the left is of Stokes light, and the broad line on the far left is of stimulated Raman scattering light

Table 1 The dispersion characteristics of a tested optical fiber

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$B$	$A(\text{cm})$	$E(\text{cm})$	$\sigma_m(\text{s/cm})$	$\sigma_w(\text{s/cm})$	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$	$\tau_m(\text{ps/km})$	$\tau_w(\text{ps/km})$	$\tau(\text{ps/km})$
0.532	$2.6 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6}$	$2.4 \times 10^{-12}$	$2 \times 10^{-13}$	$10^{-3}$	240	20	260
0.850 <sup>[3]</sup>				$6.7 \times 10^{-13}$	$10^{-13}$				
0.900 <sup>[3]</sup>				$5.4 \times 10^{-13}$	$10^{-13}$				

弱导理论预言的  $\sigma = \sigma_m + \sigma_w$  的量级一致, 随波长变化的趋势相符合。此外, 由表 1 结果还可知, 波导色散远小于材料色散。为了估计双折射参量  $B$ , 可在(19)式中略去波导色散参量  $E$ , 于是由(24)式用四光子混频法可推得双折射参量  $B$  和拍长  $L_B$  的表达式为

$$B = 2\pi c \lambda \sigma_m \cdot \Delta\nu, \quad L_B(0.63\mu\text{m}) = (2\pi\lambda/B), \quad (25)$$

根据本文结果, 算得  $B$  和拍长  $L_B = 0.16 \text{ cm}$ , 此结果与被测光纤的标称拍长相近。

结论: 本文给出了具有双折射的光纤中, 受激四光子混频频移在各种模式和偏振组合时的分析表达式, 在实验上给出了正交分泵受激四光子混频的模式和频移, 并用本文的理论推测了根据实验结果的光纤总色散。结果表明, 在泵浦波长处光纤的材料色散比波导色散大一个量级, 从而提出了可用正交分泵受激四光子混频来估测光纤的拍长。此外, 因材料色一般可以由计算得到, 从而用总色散的测定也可求得波导色散。如能改变激发的泵浦波长, 则可用光纤四光子混频频移的变化来测定总色散谱, 这无论在光纤理论探索和实验研究方面都具有很大意义。再之, 如能有效改变光纤的双折射, 则可以用正交分泵四光子混频法获得线偏振可调谐相干辐射源, 这无疑将在某些方面具有应用意义。

### 参 考 文 献

- [1] H. H. Stolen, M. A. Bosch *et al.*; *Opt. Lett.*, 1981, **6**, No. 5, 213~214.  
 [2] S. J. Garth, C. Pask *et al.*; *Opt. & Quant. Electron.*, 1988, **20**, No. 1, 79~86.  
 [3] Takanari Okashi; *Optical Fiber*, (Academic Press, New York, 1982), 73~81.

## Stimulated four-photon mixing in a birefringence optical fiber and it's applications

YANG TIANLONG AND GAO PEIJUAN

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)

(Received 19 October 1990; revised 10 January 1991)

### Abstract

The relations between the frequency shift of four-photon mixing and the birefringence of optical fiber are analysed for several cases of mode and polarization combinations.

An experimental study of using the crossed pump-dividing stimulated four-photon mixing (SFPM) to measure the total dispersion of optical fiber is reported.

**Key words:** FWMF, birefringence, optical fiber, dispersion.