

文章编号: 0253-2239(2005)03-382-5

## 双折射光纤受激拉曼散射偏光特性的实验研究\*

李春明<sup>1</sup> 孙秀平<sup>2</sup> 张喜和<sup>2</sup> 王兆民<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)  
(<sup>2</sup> 长春理工大学理学院, 长春 130022)

**摘要:** 对椭圆芯光纤受激拉曼散射偏光特性进行了系统的实验研究。实验中观察到8级斯托克斯线和2级反斯托克斯线, 对不同偏振态的抽运光激励下各级斯托克斯线的偏振特性、拉曼频移等参量进行了分析, 并给出了经验公式。其结果与实验数据符合良好。实验表明, 双折射光纤受激拉曼谱的各级斯托克斯线的偏振状态不但与拉曼介质有关还与抽运光的偏振态有关, 入射抽运光偏振态对低阶次的斯托克斯线拉曼频移的影响较小, 而对高级斯托克斯线拉曼频移影响较大。

**关键词:** 非线性光学; 椭圆芯光纤; 受激拉曼散射; 偏振态

中图分类号: TN219; O437 文献标识码: A

## Study of Polarized Light Properties of Stimulated Raman Scattering in the Birefringence Fibers

Li Chunming<sup>1</sup> Sun Xiuping<sup>2</sup> Zhang Xihe<sup>2</sup> Wang Zhaomin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)  
(<sup>2</sup> School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

**Abstract:** The polarized light properties of stimulated Raman scattering (SRS) in elliptical core optical fiber is systematically. In experiments, eight orders of Stokes lines and two orders of anti-Stokes spectra are observed and some parameters are analyzed such as the polarization, Raman frequency-shift of each-order Stokes spectra under different polarization state of pump light, and the experience formula are also provided. The results are in good agreement with the experimental figures. Experiments indicate that each-order Stokes spectra polarization state of stimulated Raman scattering in the birefringence optical fiber is related not only with Raman medium but also with pump light polarization state. The influence of pump light polarization state on low-order Stokes frequency-shift is lower but higher on the high-order Raman Stokes frequency shift fluctuation.

**Key words:** nonlinear optics; elliptical core optical fiber; stimulated Raman scattering; polarization state

### 1 引 言

近年来随着工农业生产和科学技术的发展, 提出了对信息的高速和超高速处理的迫切要求。而在所有光信息处理和光计算中都必须有光学逻辑器件和光学记忆元件。而双折射光纤具有保偏特性, 它在相干光通信、光信息存储、光纤逻辑门等领域中引起了人们越来越大的兴趣。此外, 它在各种声光器件、传感器件(如干涉传感器)等方面也有很大的应

用潜力。它的非线性效应尤其受到关注, 是学术界感兴趣的课题。但目前研究主要集中在拉曼光谱的模式分布<sup>[1~5]</sup>、光谱结构和各级斯托克斯线间能量传输机理<sup>[6~9]</sup>等方面的研究上。

我们对石英系单模阶跃型双折射光纤的受激拉曼散射谱的偏振特性进行了系统的实验研究, 并提出了新的物理模型, 给出了一些新的经验公式, 理论数据与实验结果符合良好。

\* 吉林省教育厅科研基金(KB200122)资助课题。

作者简介: 李春明(1974~), 女, 朝鲜族, 在读博士, 主要从事全固态激光器及非线性光学方面的研究工作。

E-mail: yuedong2000@163.com。

收稿日期: 2004-03-03; 收到修改稿日期: 2004-07-03

## 2 实验结果与理论分析

### 2.1 实验装置及受激拉曼谱

实验中所用光纤为阶跃型单模椭圆芯光纤(康宁公司提供),芯材为  $\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$ ,芯径为  $6 \mu\text{m} \times 7.5 \mu\text{m}$ ,截止波长  $1.2 \mu\text{m}$ ,相对折射率为  $0.5\%$ ,光纤长度为  $70 \text{ m}$ ,光纤传输损耗小于  $3 \text{ dB/km}$  ( $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ )。实验中所用抽运光源为调 Q 倍频 Nd:YAG 激光器(波长  $532 \text{ nm}$ 、脉宽  $10 \text{ ns}$ 、重复频率  $5 \text{ Hz}$  的线偏振光)。通过调节激光器的抽运源氙灯的电压,控制激光器的输出功率。利用截断法测出耦合效率后,求得抽运光入纤峰值功率为  $108 \text{ kW}$ 。测试装置如图 1 所示。利用  $1/2$  波片的旋光作用可获得偏振方向可调、但光强不变的线偏光。再经 10 倍物镜耦合进光纤。探测系统由光谱仪、CCD 探测器组成,并通过数据采集卡与计算机连接。计算机实时给出 CCD 所探测数据的光谱图。

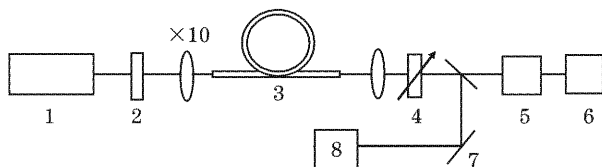


图 1 单模椭圆光纤受激拉曼谱偏振特性研究实验装置图。1: Nd:YAG 调 Q 绿激光器; 2:  $1/2$  波片; 3: 光纤; 4: 检偏器; 5: 探测系统; 6: 计算机; 7: 光栅; 8: 摄像系统

Fig. 1 The figure of experimental setup for study of polarized light properties of stimulated Raman scattering in the single mode birefringence fiber. 1: Nd:YAG Q-switched green laser; 2: half-wave plate; 3: optical fiber; 4: polarizer; 5: detecting system; 6: computer; 7: grating; 8: video recording system

为了测试光纤受激拉曼散射光的偏振态,在出纤端放置了消光比为  $98\%$ ,并在可见光区域具有高平滑带的检偏器。检偏器每旋转  $30^\circ$  由光谱仪测一次光谱,经计算机软件处理后给出光谱图。测试各级斯托克斯光的偏振态的方法是:利用上面测得的光谱图得到各级斯托克斯光在各偏振方向上光强分布数据,依此进一步确定各级斯托克斯光的偏振态。实验中观察到 8 级斯托克斯线和 2 级反斯托克斯线,并且观测到 1 级斯托克斯线出现了双峰结构(表示为 1a 级斯托克斯线和 1b 级斯托克斯线)。对于拉曼光谱中  $\lambda = 532.0 \text{ nm}$  的光称作 0 级斯托克斯线。图 2 给出了实验获得的椭圆光纤受激拉曼散射光谱图。

为了清楚地表示拉曼级和频移间关系,我们把一级斯托克斯线的两个峰值取平均值作为一级斯托克斯线的频移,并在图 3 中给出了拉曼频移与拉曼级数之间的关系曲线。这是一个很好的线性关系,可以用如下的关系表示:

$$\Delta\nu = A + Bn, \quad (1)$$

$\Delta\nu$  为拉曼频移,  $n$  为斯托克斯级数。  $A, B$  是与光纤材料及抽运光偏振态有关的参量。

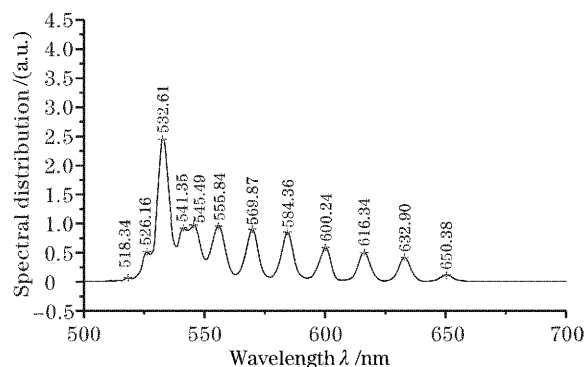


图 2 双折射光纤受激拉曼散射谱  
Fig. 2 Stimulated Raman scattering spectrum in birefringence optical fiber

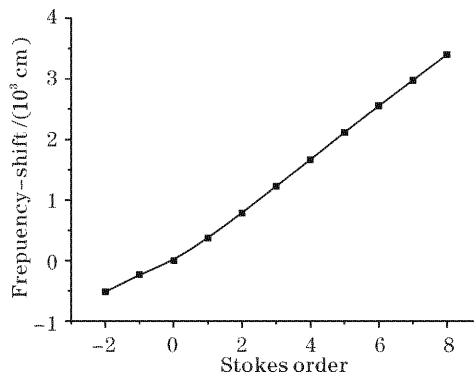


图 3 拉曼频移和拉曼级关系曲线(实线为拟合曲线)  
Fig. 3 The relationship between frequency shift and Raman Stokes order (solid line is fitted curve)

对于  $60^\circ$  入纤偏振光,反斯托克斯部分:  $A = 9.5 \text{ cm}^{-1}, B = 258.5 \text{ cm}^{-1}$ ; 斯托克斯部分:  $A = -45.0 \text{ cm}^{-1}, B = 430.4 \text{ cm}^{-1}$ 。

### 2.2 受激拉曼谱偏振态研究

#### 2.2.1 不同偏振方向的抽运光对拉曼频移的影响。

图 4 给出了抽运光取不同偏振方向时,双折射光纤中受激拉曼散射各级斯托克斯线的频移。从图 4 中可以看出,抽运光的偏振状态对不同拉曼级的影响并不相同,对于低级的斯托克斯线,抽运光偏振状态对拉曼频移的影响很小,但拉曼级越高则影响越大。其原因可以认为与拉曼谱能量耦合机制有

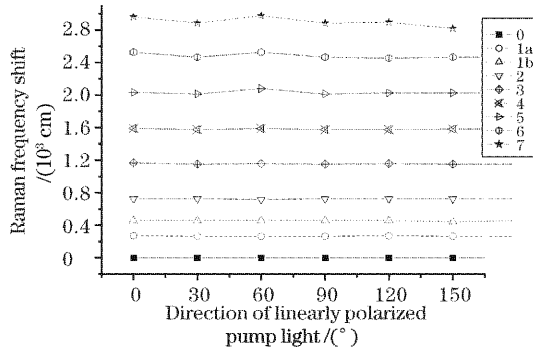


图 4 抽运光偏振方向与受激拉曼散射各级斯托克斯频移关系

Fig. 4 Relationship between polarization direction of pump light and each order stimulated Raman scattering Stokes frequency shift

关。因为斯托克斯线能量虽然来自前面各级谱线,但主要的来自近邻级,而且这种能量转移过程,级次越高,达到平衡分布的时间越长<sup>[6]</sup>,这将影响到受激声子和受激光子的作用,从而影响到拉曼频移。

2.2.2 各级斯托克斯线的偏振情况

实验证明双折射光纤受激拉曼谱的各级斯托

克斯线的偏振状态并不完全相同,它不但与拉曼介质有关还与抽运光的偏振态有关。图 5 给出了对应于不同抽运光偏振方向的各级斯托克斯偏振态的几种典型情况。

从图 5 中可以看出:1) 入纤抽运光偏振方向为 120°时,0 级斯托克斯线和各级斯托克斯线都是线偏振光,且偏振方向为 30°方向。这与保偏光纤的偏振传输理论完全吻合; 2) 抽运光偏振方向为 150°时,拉曼散射各级斯托克斯线也为线偏光且都是 30°线偏方向,但 0 级斯托克斯光却是椭圆偏振光; 3) 在入纤抽运光偏振方向为 0°和 60°时,拉曼谱的 0 级斯托克斯光为圆偏振而其它各级斯托克斯线的偏振情况各不相同:偏振方向为 0°的抽运光激励下,拉曼谱 1、2、3 级为椭圆偏振光且方向角相同,而高级的斯托克斯线则近似圆偏振光;偏振方向为 60°的抽运光的激励下,受激拉曼散射的各级斯托克斯均为椭圆偏振光,但 1、2 级偏振态与其它级的偏振态方向角大致正交。此外,我们观察到的第一级斯托克斯线双峰结构中,1b 级较 1a 级对抽运光的偏振状态更加敏感。

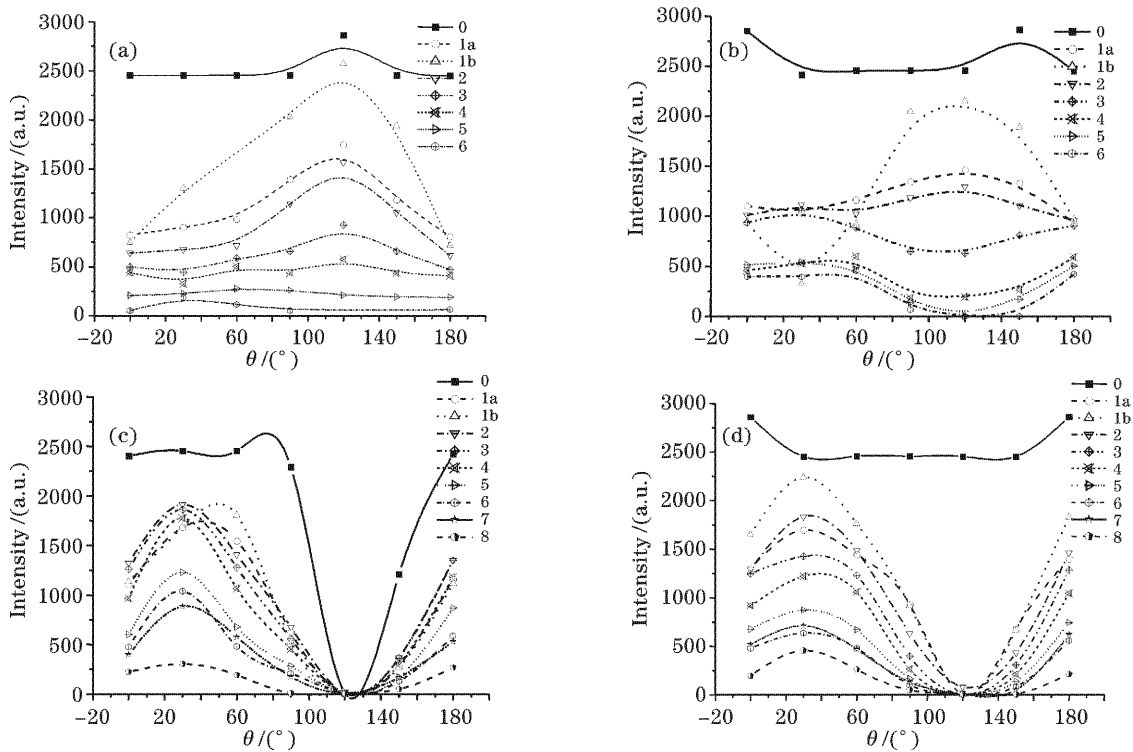


图 5 不同偏振方向的抽运光激励下各级斯托克斯线光强在不同方向上的分布情况。

(a) 抽运光 0°线偏振, (b) 抽运光 60°线偏振, (c) 抽运光 120°线偏振, (d) 抽运光 150°线偏振

Fig. 5 The intensity distribution in different directions about each order Stokes line stimulated under pump light in different polarization directions. (a) 0° direction of linearly polarized pump light, (b) 60° direction of linearly polarized pump light, (c) 120° direction of linearly polarized pump light, (d) 150° direction linearly polarized pump light

### 2.3 理论分析

当一束弱光入射到光纤中时,光的传输特性及偏振特性完全由光纤中的固有结构决定。但是当强光入射到光纤中时,将要引起光学克尔效应、自聚焦效应、自相位调制等非线性效应,并引起光纤折射率的变化,产生感生折射率。上述实验说明这种改变与传输光的频率有关,还与光场的偏振态有关。这使光纤在  $x, y$  方向上(即光纤的快轴和慢轴)产生的感生折射率不同,从而引起克尔相移,这必然产生附加程差,改变光的偏振方向,同时引起  $x, y$  方向上的空间传播常量  $\beta_x$  和  $\beta_y$  的变化,从而改变光纤的拍长。如果光纤折射率的改变量为  $n'_x, n'_y$ 。则有

$$n'_x(p) = \chi \left( p_x + \frac{2}{3} p_y \right), \quad (2)$$

$$n'_y(p) = \chi \left( p_y + \frac{2}{3} p_x \right), \quad (3)$$

式中  $p_x, p_y$  分别为抽运光在  $x, y$  轴方向的光强,而  $\chi$  为

$$\chi = \frac{4\pi n_2 \times 10^7}{ncA_{\text{eff}}}, \quad (4)$$

$n_2$  为光纤非线性自聚焦系数,  $n$  为光纤芯子的线性折射率,这里为石英的折射率。Heisenberg 给出了一个熔融石英折射率与光波波长的经验公式<sup>[10]</sup>:

$$n^2 = A + BL + CL^2 + D\lambda^2 + E\lambda^4, \quad (5)$$

其中波长  $\lambda$  的单位为  $\mu\text{m}$ 。

$$L = (\lambda^2 - 0.028)^{-1}, \quad A = 1.44902000,$$

$$B = 0.00460400, \quad C = -0.00038100,$$

$$D = -0.00252680, \quad E = -0.00007722,$$

自聚焦系数  $n_2$  取  $1.1 \times 10^{-13} \text{ mW/cm}^2$ 。  $A_{\text{eff}}$  为光纤的有效入射截面,取

$$A_{\text{eff}} = 1.3\pi ab, \quad (a, b \text{ 为光纤的长,短半轴}) \quad (6)$$

光纤两主轴折射率改变所引起的克尔相移为<sup>[11]</sup>

$$\phi = \frac{2\pi\chi L_{\text{eff}}}{3\lambda} (p_x - p_y) = \left( \frac{2\pi\chi L_{\text{eff}}}{3\lambda} \right) p_0 \cos \theta + f(\omega_s), \quad (7)$$

$$\text{式中 } L_{\text{eff}} = \frac{1}{\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)], \quad (8)$$

$L_{\text{eff}}$  为光纤的有效长度,本实验中光纤实际长度为  $70 \text{ m}$ 。  $\alpha_p$  为抽运光传输损耗系数,它与入射光的偏振态有关。  $\theta$  为抽运光与  $x$  轴的夹角。式中引入了与斯托克斯光频率有关的拟合函数  $f(\omega_s)$ ,它反映了克尔相移与传输光频率间的关系。

图 6 为本实验中所用光纤在传输弱光时的损耗与入纤光偏振关系实测曲线。

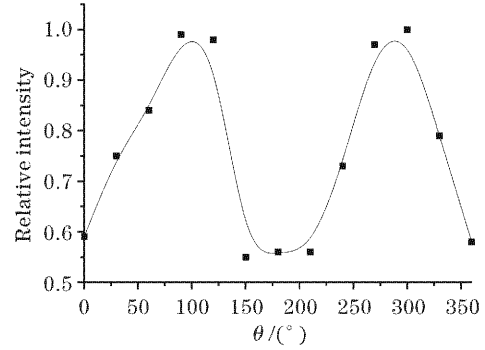


图 6 双折射光纤传输光强度与入射光偏振态关系曲线  
Fig. 6 Relationship between transmitted beam intensity and incident light polarization state in birefringence optical fiber

从克尔相移和实验图 6 就可确定各级斯托克斯线的偏振状态。

强光作用下光纤的非线性作用,不但引起了克尔相移,改变了光的偏振方向,而且自相位调制增加了群速度色散,使得脉冲频率加宽。

$$\delta_\omega = 0.86\phi_{\text{spm}}\Delta\tau\omega, \quad (9)$$

式中  $\delta_\omega$  为自相位调制引起的频率展宽,  $\Delta\tau\omega$  为初始脉宽,  $\phi_{\text{spm}}$  为产生自相位调制的峰值相移,它与克尔相移  $\phi$  之间的关系为

$$\phi_{\text{spm}} = \frac{3\phi}{\cos 2\theta} = \frac{2\pi\chi p_0 L_{\text{eff}}}{\lambda_n}, \quad (10)$$

引起的时间域宽度为

$$\Delta t \approx \frac{1}{\delta_\omega} = \frac{1}{0.86\phi_{\text{spm}}\Delta\tau\omega}, \quad (11)$$

更进一步的理论分析,将在以后文章中给出。

### 3 结 论

通过对单模椭圆光纤受激拉曼光谱偏振态的系统研究,可以得出以下结论:入射抽运光偏振态对低阶次的斯托克斯线拉曼频移的影响较小,而对高级斯托克斯线拉曼频移影响较大,这可能与能量转移过程和模式间耦合作用有关。由于入射抽运光能量密度很大,因此在光纤中将产生自聚焦效应、自相位调制等非线性过程,它将引起克尔相移,从而改变各级斯托克斯线的偏振态。这种改变不但与抽运光的偏振状态有关,而且与各级斯托克斯线的频率、光纤介质折射率分布、光纤结构参量等因素有关。由于一级斯托克斯线是由非相干声子和相干光子的相互作用引起,而非相干声子分布实质上是一种热平衡分布,具有随机性,非相干声子受相干光子的

影响要远大于相干声子,且非相干声子和相干声子的相位匹配条件也不相同,因此抽运光的偏振状态尤其对一级斯托克斯线的影响更大。可见对双折射光纤受激拉曼散射偏光特性的研究对于研究光和物质的相互作用以及对于光纤传感、光纤逻辑开关、光信息记忆存储与再现等方面的研究都很有意义。

### 参 考 文 献

- 1 Kin S. Chiang. Stimulated Raman scattering in a multimode optical fiber: evolution of modes in Stokes waves[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(5): 352~354
- 2 Kin S. Chiang. Stimulated Raman scattering in a multimode fiber: self-focusing or mode competition [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **95**(4~6): 235~238
- 3 Wang Zhaomin, Gu Chunming, Lin Jingquan. Stimulated Raman scattering mode in highly elliptical-core optical fiber[J]. *Science in China (E)*, 1995, **30**(1): 84~91
- 4 Gu Chunming, Lin Jingquan, Zheng Xueyan *et al.*. Experimental study of transmitted modes on stimulated Raman scattering in silicon-single mode maintaining polarization optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(6): 751~754 (in Chinese)  
顾春明,林景全,郑学彦等. 石英系单模保偏光纤的受激拉曼散射传输模式的实验分析[J]. *光学学报*, 1996, **16**(6): 751~754
- 5 Wang Zhaomin, Zheng Xueyan, Gu Chunming *et al.*. Study of the stimulated Raman scattering mode in single mode birefringence[J]. *Science in China*, 1996, **26**(1): 32~38 (in Chinese)  
王兆民,郑学彦,顾春明等. 单模双折射光纤受激 Raman 散射模式研究[J]. *中国科学*, 1996, **26**(1): 32~38
- 6 Zhang Xihe, Yao Zhihai, Li Xiaoying *et al.*. Study of the spectral characters of stimulated Raman scattering in highly elliptical-core optical fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(4): 2193~2196 (in Chinese)  
张喜和,姚治海,李晓英等. 高保偏光纤前方受激拉曼散射光谱特性的研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(4): 2193~2196
- 7 Gu Huaimin, Xing Da, Xu Jianqiu *et al.*. Experimental study on broadband SRS in fused silica fibers excited by single-frequency laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(7): 609~612 (in Chinese)  
谷怀民,邢达,徐剑秋等. 单频激光抽运的石英光纤宽带受激拉曼散射实验研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(7): 609~612
- 8 Lou Qihong, Ning Dong, Dong Jingxing *et al.*. The influence of pump beam quality on stimulated Raman scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8): 1020~1024 (in Chinese)  
楼祺洪,宁东,董景星等. 泵浦光束质量对受激拉曼散射的影响[J]. *光学学报*, 1998, **18**(8): 1020~1024
- 9 Li Shizheng, Liu Chenhong, Yu Zhongqiu. Formation of SRS spectrum and its energy transformation in silica fiber [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1999, **20**(2): 97~100 (in Chinese)  
李世铮,刘承红,余仲秋. 石英光纤中受激拉曼散射光谱形成及其能量转换[J]. *半导体光电*, 1999, **20**(2): 97~100
- 10 Takuhuji Eei. *The Graphics of Properties of Fundamental Matter*[M]. Tokyo: Kyouritsu Publishing Stock Ltd., 1982. 254 (in Japanese)
- 11 Wang Zhaomin, Zhang Xihe, Ren Jianhua. Kerr effect in birefringence and optic logic gate[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(2): 222~224 (in Chinese)  
王兆民,张喜和,任建华. 双折射光纤中克尔效应及光纤-光学逻辑门[J]. *光学学报*, 1994, **14**(2): 222~224