

文章编号: 0258-7025(2001)09-0913-05

# 受激布里渊散射光纤陀螺中光偏振特性的研究\*

延凤平 单英 简水生

(北方交通大学光波技术研究所 北京 100044)

**提要** 从 Jones 矩阵理论出发,利用统计平均的方法,导出在受激布里渊散射光纤陀螺(SBS-FOG)敏感环中保偏光纤熔接点处偏振主轴进行  $\theta$  角旋转后,传输光的偏振度  $P$  与光纤敏感环各参数之间的函数关系。在此基础上,进一步分析了光纤敏感环中传输光偏振本征态的特性,得出当  $L_1 = L_2$ ,  $\theta = 90^\circ$  时在敏感环中的传输光不仅具有最大偏振度,而且还使其中的两个本征偏振态(ESOP)达到稳定的结论。

**关键词** 受激布里渊散射 本征偏振态 光纤陀螺

中图分类号 O 436.3 ; O 437.2 文献标识码 A

## Study on Polarization Property in Stimulated Brillouin Scattering Fiber Optic Gyros (SBS-FOG)

YAN Feng-ping SHAN Ying JIAN Shui-sheng

(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract** The relationship between polarization degree of the transmitted light and the parameters of the fiber sensing coil was deduced by using statistical average method based on the Jones matrix theory for the stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros. The characteristics of the eigen state of polarization(ESOP) of the pump light and the stimulated Brillouin scattering light in the sensing coil were theoretically analyzed, and the conclusion about stability of the ESOP was obtained.

**Key words** stimulated Brillouin scattering, eigen state of polarization(ESOP), fiber optic gyros

### 1 引言

光纤陀螺的研究进入到第三代,即受激布里渊散射光纤陀螺(SBS-FOG)。这种光纤陀螺的结构相对简单,使用的光纤器件较少,而且理论上的检测精度,特别是比例因子线性度是光纤陀螺中最优的。因此倍受人们的关注。但同时,由于这种光纤陀螺首先需要高稳定性(包括工作波长稳定和输出功率稳定)窄线宽、大功率的光源作为抽运源,才能在长度相对较短的光纤中产生受激布里渊散射(SBS)效应。并且,如果要在一定长度的普通单模光纤内产生 SBS 效应,则需要的抽运激光功率高一倍之多。另外,锁定问题也是这种光纤陀螺中必须首先解决的难题。因此,虽然人们

已经认识到它的优越性,但是始终没有取得突破性的进展<sup>[1]</sup>。现在,光纤激光器和光纤放大器技术的进步,给受激布里渊散射光纤陀螺的研究带来了契机。本文针对受激布里渊散射光纤陀螺的基本光路结构,研究了这种光纤陀螺的敏感环中抽运光和受激布里渊散射光的偏振特性,得出相关的结论,从而为进一步研究打下了理论基础。

### 2 理论分析

如图 1 所示,光纤敏感环在光纤熔接点处进行  $\theta$  角偏振主轴旋转,敏感环光纤长度为  $L$ ,敏感环被熔接点分割成的两光纤段  $L_1, L_2$  的长度分别为  $L_1, L_2$ 。当抽运光经过耦合器  $C_2$  在  $z = 0$  处进入敏感环时,由 Jones 矩阵理论可知,输出向量  $A(z =$

\* 国家自然科学基金(No. 69977002)资助项目。

收稿日期 2000-06-26;收到修改稿日期 2000-08-21

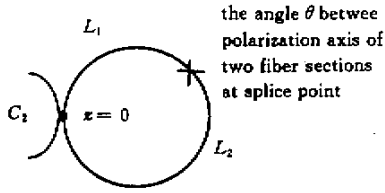


图 1 光纤敏感环的基本结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of fiber sensing coil

$L$ ) 可以认为是由输入向量  $A(0)$  左乘一个 Jones 矩阵  $M$  而形成<sup>[2]</sup>, 即

$$A(L) = MA(0) \quad (1)$$

对于由高消光比的保偏光纤所构成的敏感环, 可以只考虑两偏振模耦合的一次效应, 于是

$$M = \begin{bmatrix} \exp(-j\delta L) & j \int_0^L k(z) \exp(2j\delta z - j\delta L) dz \\ -j \int_0^L k^*(z) \exp(-2j\delta z + j\delta L) dz & \exp(j\delta L) \end{bmatrix} \exp(-j\bar{\varphi}) \quad (2)$$

式中,  $\delta = \frac{1}{2}(\beta_x - \beta_y)$ ,  $\bar{\varphi} = \frac{1}{2}(\beta_x + \beta_y)L$ ,  $k(z)$  为随机耦合系数,  $*$  代表复数共轭。于是, 光纤敏感环中传输光的 Jones 矩阵为

$$M_D = M_2 R(\theta) M_1 = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中,  $M_1, M_2, R(\theta)$  分别为光纤段  $L_1, L_2$  及其接续点处的 Jones 矩阵。

$$M_1 = \begin{bmatrix} \exp(-j\delta L_1) & j \int_0^{L_1} k_1(z) \exp(2j\delta z - j\delta L_1) dz \\ -j \int_0^{L_1} k_1^*(z) \exp(-2j\delta z + j\delta L_1) dz & \exp(j\delta L_1) \end{bmatrix} \exp(-j\bar{\varphi}_1) \quad (4)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} \exp[-j\delta(L - L_1)] & j \int_{L_1}^L k_2(z) \exp[2j\delta z - j\delta(L - L_1)] dz \\ -j \int_{L_1}^L k_2^*(z) \exp[-2j\delta z + j\delta(L - L_1)] dz & \exp[j\delta(L - L_1)] \end{bmatrix} \exp(-j\bar{\varphi}_2) \quad (5)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

考虑到敏感环中光纤长度为 km 量级, 所以利用统计平均的方法, 在整个积分区间内, 用耦合系数的统计平均值  $k$  来逼近随机积分变量  $k_1(z) \exp(2j\delta z)$ , 即

$$\int_0^{L_1} k_1(z) \exp(2j\delta z) dz = \int_0^{L_1} k dz = kL_1 = h_1 \quad (7)$$

$$\int_{L_1}^L k_2(z) \exp(2j\delta z) dz = \int_{L_1}^L k dz = kL_2 = h_2 \quad (8)$$

将  $\beta_x, \beta_y$  及  $\delta$  在频域内作  $\omega_0$  处的一次近似, 经 Fourier 逆变换得到时域函数, 于是相干矩阵  $J$  为

$$J = E \cdot E^+ = \begin{pmatrix} E_x' E_x^* & E_x' E_y^* \\ E_y' E_x^* & E_y' E_y^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中,  $+$  表示哈密顿转置,  $\cdot$  表示时间平均。于是

$$J_{11} = aa^*(\cos^2\theta_p + h_1^2 \sin^2\theta_p) e_1 \cdot e_1^* + bb^*(h_1^2 \cos^2\theta_p + \sin^2\theta_p) e_2 \cdot e_2^* + ab^*[h_1 + j(h_1^2 - 1)\cos\theta_p \sin\theta_p] e_1 \cdot e_2^* \exp(-2j\delta_0 L_1) + a^* b[h_1 - j(h_1^2 - 1)\cos\theta_p \sin\theta_p] e_1^* \cdot e_2 \exp(2j\delta_0 L_1) \quad (10)$$

$$J_{22} = bb^*(\cos^2\theta_p + h_1^2 \sin^2\theta_p) e_3 \cdot e_3^* + aa^*(h_1^2 \cos^2\theta_p + \sin^2\theta_p) e_4 \cdot e_4^* + a^* b[h_1 + j(h_1^2 - 1)\cos\theta_p \sin\theta_p] e_3 \cdot e_4^* \exp(-2j\delta_0 L_1) + ab^*[h_1 - j(h_1^2 - 1)\cos\theta_p \sin\theta_p] e_3^* \cdot e_4 \exp(2j\delta_0 L_1) \quad (11)$$

$$J_{12} = jab^*(\cos^2\theta_p + h_1^2 \sin^2\theta_p) e_1 \cdot e_3^* \exp(-2j\delta_0 L_2) +$$

$$\begin{aligned}
 & aa^* [jh_1 + (1 - h_1^2)\cos\theta_p \sin\theta_p] e_1 \cdot e_4^* \exp[-2j\delta_0(L_1 + L_2)] + \\
 & bb^* [jh_1 + (h_1^2 - 1)\cos\theta_p \sin\theta_p] e_2 \cdot e_3^* \exp[-2j\delta_0(L_2 - L_1)] + \\
 & ja^* b(h_1^2 \cos^2\theta_p + \sin^2\theta_p) e_2^* \cdot e_4 \exp(-2j\delta_0 L_2)
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$J_{21} = J_{12}^* \tag{13}$$

利用信号的能量守恒,即在时间轴上取信号的平均功率与在频域上信号功率谱的积分一致的性质,可以得到

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T e_i(t) e_i(t)^* dt = 4\pi \int_0^\infty |\chi(\omega)|^2 d\omega = A_0 \tag{14}$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T e_i(t) e_j(t)^* dt = 4\pi \int_0^\infty |\chi(\omega)|^2 \exp[j(\omega - \omega_0)\delta_{\tau_g} z] d\omega = A_{ij}(z) \tag{15}$$

引进相干度函数

$$r(z) = \frac{A_{ij}(z)}{A_0} = \frac{\int_0^\infty |\chi(\omega)|^2 \exp[j(\omega - \omega_0)\delta_{\tau_g} z] d\omega}{\int_0^\infty |\chi(\omega)|^2 d\omega} \tag{16}$$

对于常见的矩形、高斯型和洛仑兹型光源谱,相干度函数分别为:

(1) 矩形谱:

$$r(z) = \frac{\sin\alpha}{\alpha} \exp(-j\sigma)$$

(2) 高斯型谱:

$$r(z) = \exp\left[-\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{\ln 2}}\right)^2\right] \exp(-j\sigma)$$

(3) 洛仑兹型:

$$r(z) = \exp(-\alpha) \exp(-j\sigma)$$

其中,  $\alpha = \pi\Delta\nu\delta_{\tau_g} z$ ,  $\sigma = 2\pi\nu\delta_{\tau_g} z$ ,  $\delta_{\tau_g} = \Delta\beta/\omega = \frac{\lambda}{c \cdot L_p}$ ,  $\Delta\nu$  为光源谱线宽度,  $\nu$  为光源中心频率,  $L_p$  为保偏光纤的拍长,  $z$  为保偏光纤的长度。三种光源谱所对应的相干度函数如图 2 所示。

当  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$ ,  $L_p = 2.5 \text{ mm}$  时,  $\alpha \approx 19.32 \cdot z$ ,  $\sigma \approx 25.13 \times 10^2 \cdot z$ , 由图 2 可知,对于矩形谱光源,只有当  $\alpha = N \cdot \pi$  ( $N$  为整数),即  $z = 0.081 \cdot N(\text{m})$  时,  $r(z) = 0$ 。但是这种光源只适合于短波长的红光激光器,因此这里不作详细讨论。

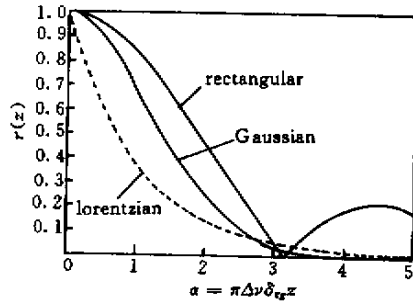


图 2 三种不同的光源谱所对应的相干度函数曲线  
Fig. 2 Corresponding function for the coherence degree to the sources with three kind of band shape spectra

对于高斯型和洛仑兹型谱,理论上说,只有当  $\alpha \rightarrow \infty$  时,才能使  $r(z) = 0$ 。但是,当  $\alpha = 6.908$ ,即  $z = 0.358 \text{ m}$  时,  $r(\alpha) \ll 0.001$ ,可认为  $r(z) \approx 0$ 。由此可得,当合理选取光纤段  $L_1, L_2$  的长度  $L_1, L_2$ ,使  $L_1, L_2, L_1 + L_2, L_1 - L_2$  均大于或等于  $0.358 \text{ m}$  时,可以做到  $r(L_1), r(L_2), r(L_1 + L_2), r(L_1 - L_2)$  均为零<sup>[31]</sup>,于是,由相干矩阵得到的偏振度为

$$\begin{aligned}
 P &= [1 - 4\det J(\text{tr} J)^2]^{1/2} = \\
 & \left\{ 1 - 4 \cdot \frac{\left[1 - \frac{1}{2} \sin^2(2\theta_p)\right] \left[(h_1^2 + h_2^2)(h_1^2 h_2^2 + 1) \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2(2\theta)\right)\right] + \frac{1}{4} [(1 + h_1^4)(1 + h_2^4) + 4h_1^2 h_2^2] \sin^2(2\theta)}{(1 + h_1^2)(1 + h_2^2)} \right. \\
 & \left. - \frac{\sin^2(2\theta_p) \left\{ (h_1^2 + h_2^2)(h_1^2 h_2^2 + 1) \sin^2(2\theta) + [(1 + h_1^4)(1 + h_2^4) + 4h_1^2 h_2^2] \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2(2\theta)\right) \right\}}{(1 + h_1^2)(1 + h_2^2)} \right\}^{1/2} \tag{17}
 \end{aligned}$$

### 3 讨论

#### 3.1 P 与偏振主轴取向角 $\theta, \theta_p$ 的关系

由式(17)可见,当  $k, L_1, L_2$  一定时,  $P$  为  $\theta$  与  $\theta_p$

的周期为  $\pi/2$  的函数(如图 3 所示),且在一个周期之内,当  $\theta = 0^\circ$  或  $\theta = 90^\circ$  时,  $P$  为最大,当  $\theta = 45^\circ$  时,  $P$  为最小。

当偏振主轴旋转不严格为  $90^\circ$  或者线偏振光入射时其取向相对于光纤主轴偏离  $0^\circ$  或者  $90^\circ$ , 即  $\theta = 90^\circ + \Delta\theta$  或者  $\theta_p = 0^\circ + \Delta\theta_p$  时, 由分析可知, 随着这种偏差的增加, 光纤敏感环中传输光的偏振度会显著减小, 也就是说, 其偏振特性会显著变差。上述结果与参考文献 3 的结论相近, 由此说明本文的分析是正确的。

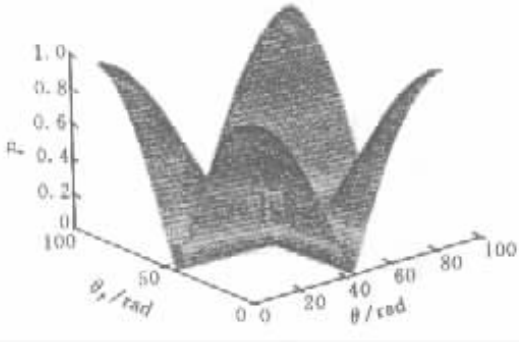


图3  $P$  和  $\theta, \theta_p$  的关系曲线 ( $k = 6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ )  
Fig.3 Relationship between  $P$  and  $\theta, \theta_p$   
( $k = 6 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ )

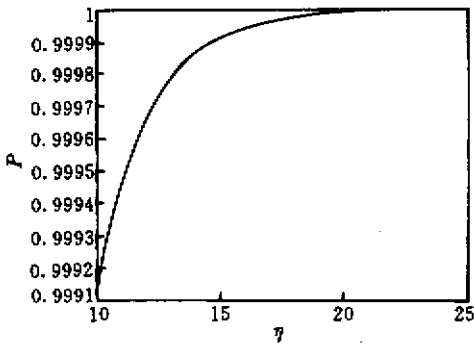


图4  $P$  和  $\eta$  的关系曲线 ( $\theta = 90^\circ, \theta_p = 0^\circ$  或  $90^\circ$ )  
Fig.4 Relationship between  $P$  and  $\eta$   
( $\theta = 90^\circ, \theta_p = 0^\circ$  or  $90^\circ$ )

### 3.2 $P$ 与消光比 $\eta$ 的关系

当  $\theta = 90^\circ$  且  $\theta_p = 0^\circ$  或  $\theta_p = 90^\circ$  时, 线偏振光

沿  $x$  轴或  $y$  轴入射, 此时

$$P = \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{[\alpha \tanh(10^{-\frac{\eta}{10}})]^2 [\alpha \tanh(10^{-\frac{\eta}{10}})]^2 + 1}{[\alpha \tanh(10^{-\frac{\eta}{10}})]^2 + 1}} \quad (18)$$

传输光的偏振度  $P$  与保偏光纤的消光比  $\eta$  之间的关系如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 偏振度  $P$  随消光比  $\eta$  增加而增大, 当  $\eta \leq 16 \text{ dB}$  时, 呈线性增加趋势, 当  $\eta \geq 16 \text{ dB}$  时, 增加趋势趋于缓和, 当  $\eta \approx 20 \text{ dB}$  时, 偏振度  $P$  近似为 1。所以在高消光比的保偏光纤 ( $\eta \geq 40 \text{ dB}$  每单位  $\text{km}$ ) 构成的敏感环中, 当在熔接点处对偏振主轴进行  $90^\circ$  交叉旋转且线偏振光在光纤入射点处沿  $x$  轴或  $y$  轴入射时, 偏振度将达到 1, 由此保证 SBS-FOG 中传输光会获得优良的偏振特性。

## 4 敏感环中传输光的偏振稳定性

当考虑敏感环中保偏光纤的双折射效应时, 通过分析光纤敏感环中传输光(抽运光和受激布里渊散射光)的本征偏振态的特征, 可得到有关传输光偏振稳定性的结论。首先对每个偏振主轴建立抽运光与 SBS 光的模式耦合方程, 然后求解方程, 从中得出抽运光与 SBS 光的传输矩阵, 进而得出各自相应的本征偏振态 (ESOP) 的特征。由于抽运光与 SBS 光在光纤敏感环中的偏振特性完全相同, 因此本文仅分析有关 SBS 光的本征偏振态 (ESOP) 的特征。

假设保偏光纤两个主轴之间的串扰可以忽略, 则从  $z = z_1$  到  $z = z_2$  的 SBS 传输矩阵为

$$C \Big|_{z_1}^{z_2} = \begin{bmatrix} C_{Bx} & 0 \\ 0 & C_{By} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$C_{Bi} \Big|_{z_1}^{z_2} = \exp \left\{ \left[ \alpha - \frac{g_i I_p(0)}{4} + j\beta_{Bi} \right] (z_2 - z_1) \right\} \quad (i = x, y) \quad (20)$$

因此, 当  $\theta = 90^\circ$  时, 沿反时针方向 ( $0 < z < L_1$ ) 传播的 SBS 光绕敏感环一周的传输矩阵为

$$T_{\text{cwb}} = \sqrt{(1 - \kappa)(1 - \gamma)} \times C_B \Big|_{L_1}^z R(-90^\circ) C_B \Big|_L^{L_1} C_B \Big|_z^0 = \sqrt{(1 - \kappa)(1 - \gamma)} \exp \left\{ \left[ -\alpha - j\beta_{\text{wb}} + \frac{G_{\text{wb}}}{4} I_p(0) \right] \cdot L \right\} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \exp \left\{ - \left[ j\Delta\beta_B - \frac{\Delta G}{4} I_p(0) \right] \left( \frac{\Delta L}{2} - z \right) \right\} \\ - \exp \left\{ \left[ j\Delta\beta_B - \frac{\Delta G}{4} I_p(0) \right] \left( \frac{\Delta L}{2} - z \right) \right\} & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中  $\Delta\beta_B = \beta_{Bx} - \beta_{By}$ ,  $\Delta G = g_x - g_y$ ,  $\beta_{avB} = (\beta_{Bx} + \beta_{By})/2$ ,  $G_{av} = (g_x + g_y)/2$ ,  $T_{ccwB}$  的本征值为

$$\lambda_{B1} = j\sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa)} \times \exp\left\{-\left[\alpha + j\beta_{avB} - \frac{G_{av}}{4}I_p(0)\right]L\right\} \quad (22)$$

$$\lambda_{B2} = -j\sqrt{(1-\gamma)(1-\kappa)} \times \exp\left\{-\left[\alpha + j\beta_{avB} - \frac{G_{av}}{4}I_p(0)\right]L\right\} \quad (23)$$

于是  $\lambda_{B2} = \lambda_{B1}\exp(j\pi)$  (24)

中传输光的本征偏振态达到稳定。

式(24)表明, SBS 光 ESOP 的两个本征值之间的相位差为  $\pi$ , 外界环境因素的变化不会导致二者彼此靠近而产生相互作用, 由此保证 SBS 光具有稳定的偏振特性。

## 5 结 论

本文分析表明, 当输入线偏振光的偏振方向沿着与保偏光纤的偏振主轴一致的方向进入敏感环时, 在光纤敏感环的长度“中点”处进行偏振主轴一致( $\theta = 0^\circ$ )或交叉( $\theta = 90^\circ$ )连接, 可使传输光的偏振度  $P$  达到最大。进一步分析表明, 当  $\theta = 90^\circ$  时, 可以使敏感环

## 参 考 文 献

- 1 Yan Fengping, Shan Ying, Jian Shuisheng. Study on mechanism of the stimulated Brillouin scattering for the stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros (SBS-FOG). *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2000, **11**(1) 32~35 (in Chinese)
- 2 A. Kung, L. Thevenaz, P. A. Robert. Polarization analysis of Brillouin scattering in a circularly birefringent fiber ring resonator. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6) 977~982
- 3 F. P. Yan, Y. Yao, S. S. Jian. Characteristics of lyot optical fiber depolarizer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(6): 848~852 (in Chinese)