

# 受激布里渊散射光纤陀螺中光纤光源的 阈值光功率研究\*

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** 从非线性受激布里渊散射产生机理出发,研究了受激布里渊散射光纤陀螺(SBS-FOG)中光纤光源的阈值光功率与光源谱宽及保偏光纤敏感环参数之间的函数关系,为进一步研究这种光纤光源的构造以及建立受激布里渊散射光纤陀螺系统打下了理论基础。

**关键词** 光纤陀螺, 布里渊散射, 保偏光纤

## 1 引 言

迄今为止,有关光纤陀螺的研究已经进入到第三代,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三种光纤陀螺中最优的,因此倍受人们的关注<sup>[1,2]</sup>。但同时,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、大功率的激光器,才能在长度较短的光纤中产生SBS效应。而如果想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要高一倍之多<sup>[3,4]</sup>。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这种光纤陀螺的优越性,但是始终没有取得突破性的进展。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,研究并导出在这种光纤陀螺的敏感环中产生受激布里渊散射效应所需要的阈值光功率与光源及光纤敏感环参数之间的函数关系,为进一步研究这种光纤陀螺的工作机理以及建立其系统打下理论基础。

## 2 理论分析

图1所示为受激布里渊散射光纤陀螺的基本光路结构。假定构成光纤敏感环的单模光纤的有效截面积为 $A_{\text{eff}}$ ,长度为 $L$ ,在抽运光波长处光纤的衰减系数为 $\alpha_p$ 。并假定抽运光在 $z=0$ 点入射,以 $+z$ 方向传输,功率为 $P_p(z)$ ,则对于连续波(或准连续波)抽运的情况,有效功率密度为<sup>[5]</sup>

$$S_p(z) = P_p(z)/A_{\text{eff}} \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金重点项目(69637020)、国家自然科学基金项目(69977002)资助。

收稿日期: 1999-04-15; 收到修改稿日期: 1999-07-11

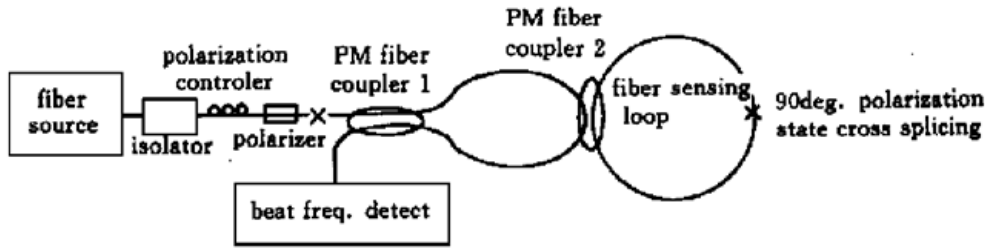


图 1 受激布里渊散射光纤陀螺的基本光路结构

Fig. 1 Basic optical circuit of the SBS-FOG

$$P_p(z) = P_p(0) \exp(-\alpha_p z) \tag{2}$$

假定抽运光的作用在媒质中足以产生受激布里渊散射效应, 则对于后向波来说在 Stokes 频率处的耦合波方程为

$$\left[ \frac{d}{dz} + \alpha_s \right] P_s(z) = \gamma S_p(z) P_s(z) \tag{3}$$

其中,  $\alpha_s$  表示在散射光波长处光纤的衰减系数,  $P_s(z)$  为对应于光纤  $z$  点的 Stokes 功率。增益系数  $\gamma$  由布里渊(Brillouin) 散射的作用过程决定, 且具有频率依赖性。

与抽运光频率相比, 由于布里渊频移很小, 故可以认为  $\alpha_s = \alpha_p = \alpha$ , 于是当考虑非线性作用, 并假设抽运光未被非线性作用过程损耗时, 有如下方程

$$\left[ \frac{d}{dz} + \alpha_s \right] P_s(z) = \gamma P_s(z) S_p(0) \exp(-\alpha z) \tag{4}$$

这里,  $S_p(0)$  为在输入端的抽运光功率密度。解方程得

$$P_s(z) = P_s(0) \exp \left[ -\alpha z + \frac{\gamma S_p(0)}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha z)] \right] \tag{5}$$

(5) 式是假定 Stokes 波在  $z = 0$  处入射得到的。事实上, 并无 Stokes 波被入射。部分呈现于输出端的 Stokes 功率将被放大的自发辐射散射, 并存在与整个光纤内。研究表明, 沿整个光纤长度所有的自发辐射与它自身净增益的加权和等效于光纤每一个模式的一个声子在  $z = 0$  处的输入功率。于是, 在  $z = L$  处总的 Stokes 功率由下式给出

$$P_s(L) = \left[ \sum \int d\nu (h\nu) \exp \left[ -\alpha L + \frac{S_p(0)\gamma_0}{\alpha} \right] \right] B_{\text{eff}} \tag{6}$$

在这里,  $\gamma_0$  为峰值增益系数,  $B_{\text{eff}}$  为有效带宽或纵模数量, 求和是对所有传导模式进行的。于是

$$B_{\text{eff}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{\Delta\nu_{\text{FWHM}}}{[S_p(0)\gamma_0/\alpha]^{1/2}} \tag{7}$$

有效的输入 Stokes 功率为

$$P_s(0) |_{\text{eff}} = (h\nu_s) (B_{\text{eff}}) \tag{8}$$

对于后向波过程, 临界功率被定义为在  $z = 0$  处反向受激 Stokes 功率等于输入抽运光功率时的输入功率。对于低损耗单模光纤, 与 Brillouin 散射有关的参量取典型值, 则临界功率可近似表示为<sup>[5]</sup>

$$P_{\text{crit}}^{\text{Brillouin}} \approx 21 \frac{A_{\text{eff}} L_{\text{eff}}}{\gamma_0} \tag{9}$$

$$\gamma_0 = \frac{2\pi n_1^7 p_{12} K}{C \lambda^2 \rho_0 v_a \Delta\nu_B} \tag{10}$$

$$K = \frac{10^{\eta/10}}{1 + 10^{\eta/10}} \quad (11)$$

其中  $L_{\text{eff}} = \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha l})$  表示长度为  $l$  的光纤的有效作用长度,  $n_1$  为光纤纤芯折射率,  $\rho_0$  为材料密度,  $p_{12}$  为纵向弹光系数,  $\lambda$  为抽运波长,  $v_a$  为声速,  $\Delta\nu_B$  为受激布里渊散射线宽,  $\frac{1}{2} \leq K \leq 1$  由  $\eta$  决定,  $\eta$  (dB) 为保偏光纤的消光比。当  $\eta > 20$  dB 时,  $K \approx 1$ 。有效纤芯截面积  $A_{\text{eff}}$  定义为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^4 dx dy} \quad (12)$$

式中  $F(x, y)$  为光纤基模的分布函数, 通常采用高斯形表示

$$F(x, y) = \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{w^2}\right] \quad (13)$$

式中  $w$  为高斯束宽度参量, 即光纤的模场半径。将式(13)代入式(12)中得

$$A_{\text{eff}} = \pi w^2 \quad (14)$$

对于高斯场分布情况, 若折射率分布系数  $g = \infty$ , 即阶跃型折射率分布, 则<sup>[6]</sup>

$$w^2 = \frac{2a^2}{\ln(2\Delta a^2 n_1^2 k_0^2)} \quad (15)$$

若折射率分布系数为平方率型折射率分布, 则<sup>[6]</sup>

$$w^2 = \frac{\sqrt{2}a}{k_0 n_1 \sqrt{\Delta}} \quad (16)$$

其中,  $a$  为光纤纤芯半径,  $\Delta$  为光纤的相对折射率差,  $k_0$  为真空中的波数。

在考虑抽运光谱线宽度  $\Delta\nu_p$  的情况下, 受激布里渊散射峰值增益系数  $\mathcal{Y}_B$  可表示为

$$\mathcal{Y}_B = \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_B + \Delta\nu_p} \mathcal{Y}_0 \quad (17)$$

对于折射率分布呈平方率(即  $g = 2$ ) 的均匀保偏光纤( $\eta \geq 20$  dB), 阈值功率表示式为

$$P_{\text{th}}^{\text{Square}} = \frac{21 \sqrt{2} c \rho_0 \alpha \lambda^3 v_a \Delta\nu_B a}{4\pi n_1^8 p_{12}^2 \sqrt{\Delta} \cdot (1 - e^{-\alpha l})} \cdot \frac{\Delta\nu_B + \Delta\nu_p}{\Delta\nu_B} \quad (18)$$

对于折射率分布呈阶跃型(即  $g = \infty$ ) 的均匀保偏光纤( $\eta \geq 20$  dB), 阈值功率表示式为

$$P_{\text{th}}^{\text{Step}} = \frac{21 a^2 c \lambda^2 \rho_0 v_a \Delta\nu_B a}{n_1^7 p_{12}^2 (1 - e^{-\alpha l}) \ln(2\Delta a^2 n_1^2 k_0^2)} \cdot \frac{\Delta\nu_B + \Delta\nu_p}{\Delta\nu_B} \quad (19)$$

由于  $\Delta\nu_B \propto \frac{1}{\lambda_p^2}$ , 因此  $\mathcal{Y}_0$  几乎与抽运波长无关。将熔融石英的典型参数代入之, 并假设  $\lambda_p = 1.55$

$\mu\text{m}$ , 则  $\mathcal{Y}_0 \approx 5 \times 10^{-11}$  m/W, 令  $\Delta = 1\%$ ,  $s = \frac{\Delta\nu_B + \Delta\nu_p}{\Delta\nu_B}$  表示抽运光源谱宽引入因子, 于是对于如图 1 所示的 SBS-FOG 基本光路结构, 假设光纤敏感环使用总长度为  $2l$  的保偏光纤( $\eta = 30$  dB)并在中间位置进行  $90^\circ$  偏振交叉熔接, 则在 A 点输入的抽运光功率阈值为

$$P_{\text{th}}^{\text{Square}}|_A \approx 1.296 \times 10^7 \frac{a \cdot s}{\frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha l})} \quad (20)$$

$$P_{\text{th}}^{\text{Step}}|_A \approx 1.077 \times 10^{13} \frac{a^2 \cdot s}{\ln(0.691 \times 10^{12} \times a^2) \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha l})} \quad (21)$$

讨论: 1) 令  $a, \alpha, s$  为常数, 则  $P_{th}^{Brillouin}(P_{th}^{Square}, P_{th}^{Step})$  与  $l$  的关系如图 2 所示。由此可见, 当其他参量取常数的情况下, 阈值光功率随构成光纤敏感环的光纤长度的增加而降低, 其变化率在光纤长度小于 4 km 的情况下比较明显, 此后的变化趋势逐渐趋于缓和。

2) 令  $l, \alpha, s$  为常数, 则  $P_{th}^{Brillouin}(P_{th}^{Square}, P_{th}^{Step})$  与  $a$  的关系如图 3 所示。由此可见, 当其他参量取常数的情况下, 阈值光功率随构成光纤敏感环的光纤纤芯半径的增加而增加。只是在  $g = \infty$  (即光纤纤芯折射率分布呈阶跃型) 的情况下, 对于某一尺寸(图中约为  $0.8 \mu\text{m}$ ) 的光纤纤芯半径, 阈值光功率呈现一个异常的尖峰; 而当光纤纤芯半径大于另一个值(图中为  $2 \mu\text{m}$ ) 之后, 变化趋势恢复正常。

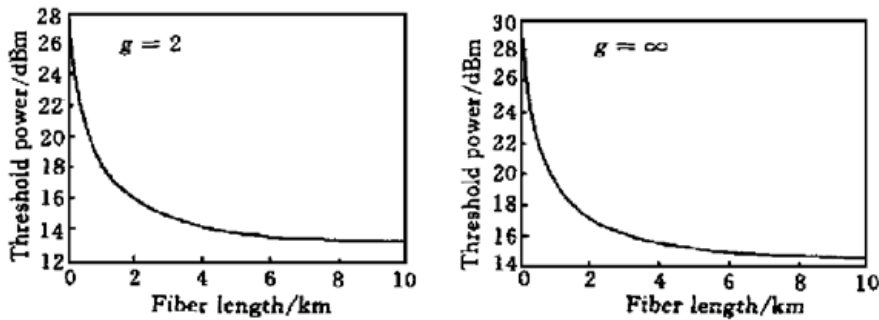


图 2  $P_{th}^{Brillouin}$  与  $l$  的关系曲线

Fig. 2 The curves of the  $P_{th}^{Brillouin}$  with  $l$  ( $s = 1.01$ ,  $\alpha = 1.8 \text{ dB/km}$ ,  $a = 4.0 \mu\text{m}$ ,  $\eta = 30 \text{ dB}$ )

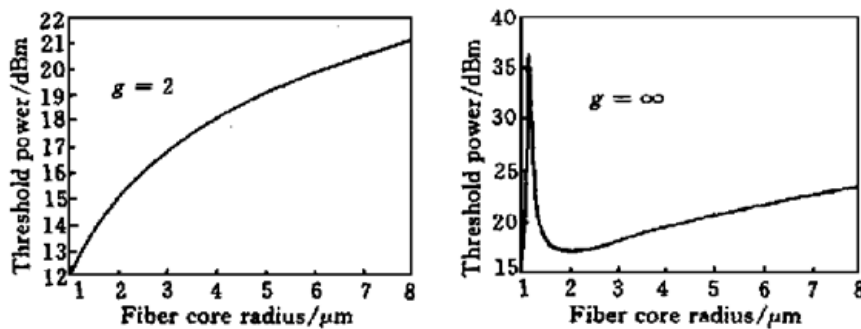


图 3  $P_{th}^{Brillouin}$  与  $a$  的关系曲线

Fig. 3 The curves of the  $P_{th}^{Brillouin}$  with  $a$  ( $s = 1.01$ ,  $\alpha = 1.8 \text{ dB/km}$ ,  $l = 1.0 \text{ km}$ ,  $\eta = 30 \text{ dB}$ )

参考文献[4]中有在普通单模光纤中产生受激布里渊散射效应实验介绍。其中使用谱线宽度约为 20 MHz 的窄谱激光器抽运很长的常规单模光纤(有效长度约为 20 km), 则产生受激布里渊散射效应的阈值光功率约为 1 mW, 即 0 dBm。这与本文分析的结果很接近。

### 3 结 论

本文从非线性的受激布里渊散射产生机理出发, 研究了 SBS-FOG 中光纤光源的阈值光功率与光纤敏感环参数之间的函数关系, 并分别就纤芯折射率呈平方率型和阶跃型分布的两种保偏光纤的情况进行了数值模拟和图形表示。结果认为在光纤光源的线宽小于 MHz 量级(即布里渊增益线宽)的情况下, SBS-FOG 的阈值光功率主要与光纤的半径、长度、衰减系数和消光比等因素有关。并且当光纤长度超过一定值(在这里约为 6 km)以后, 随着光纤长度的进

一步增加, 阈值光功率基本上不发生变化。

### 参 考 文 献

- 1 J. L. Wagener, M. J. F. Digonnet, H. J. Shaw. A high-stability fiber amplifier source for the fiber optic gyroscope. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(9): 1689~ 1694
- 2 R. Feced, T. R. Parker, M. Farhadiroushan *et al.*. Power measurement of noise-initiated Brillouin scattering in optical fibers for sensing applications. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(1): 79~ 81
- 3 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
- 4 G. Y. Lyu, S. S. Lee, D. H. Lee *et al.*. Simultaneous measurement of multi-channel laser linewidths and spacing by use of stimulated Brillouin scattering in optical fiber. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11): 873~ 875
- 5 G. P. Agrawa. *Nonlinear Fiber Optics*. Boston: Academic Press, 1989
- 6 Yan Fengping, Zhang Liangzhong, Shan Ying *et al.*. Numerical analysis of the mode field radius for the square law and step index fiber. *Optics Technology* (光学技术), 2000, **26**(1): 66~ 67, 70 (in Chinese)

## Study on Threshold Power of the Fiber Source for the Stimulated Brillouin Scattering Fiber Optic Gyros (SBS-FOG)

Yan Fengping    Shan Ying    Jian Shuisheng

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

**Abstract** In this paper, the relationship of the threshold power of the fiber source as a function of spectral width of this fiber source and parameters of the polarization maintaining fiber sensing coil was studied based on non-linear stimulated Brillouin scattering theory for the stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros (SBS-FOG), which established theoretical foundation for investigating such fiber source conformation and constructing the system of the SBS-FOG.

**Key words** fiber optic gyros (FOG), Brillouin scattering, polarization maintaining fiber