

# 光纤光栅光学双稳态器件\*

张远程

张颖

(武汉大学理学院 武汉 430072) (信息产业部电信科学技术研究院通信技术发展研究中心 北京 100083)

**提要** 提出在一段掺铒光纤上制作一对光纤光栅可构成一种新型低功率高速光双稳器件。利用分布反馈耦合波理论结合掺铒光纤非线性特点分析了器件的运转和双稳阈值,表明在现有技术条件下,可实现纳秒微瓦级厘米尺寸器件的光双稳运转。

**关键词** 光学非线性, 光学双稳态, 光纤光栅, 掺铒光纤

## 1 引言

光学双稳器件(Optical Bistability Device, OBD)由于可用作全光信号放大<sup>[1]</sup>、开关<sup>[2]</sup>、数字信号再生<sup>[3]</sup>、触发和整形<sup>[4]</sup>等一系列高速信号处理而受到广泛重视。利用光纤制成的双稳器件因其体积小可直接用于光纤通信线路。近年来我们已完成一系列掺铒光纤双稳态的理论和实验研究<sup>[5-10]</sup>,在此基础上,我们提出在一段掺铒光纤两端制作一对光纤光栅,利用光栅对提高光纤谐振腔精度,利用掺铒光纤的高 Kerr 系数降低双稳阈值功率,以此来构成高速低功率可沿光纤一维集成的光双稳器件。文中利用分布反馈耦合波理论对器件原理和参数进行了分析计算,提出了器件设计原则。

## 2 光纤光栅谐振腔

图 1 为光纤光栅谐振腔,它由掺铒光纤两端各写上一只光纤光栅构成。如图选取坐标系,并设两端的正、反向行波电场分别为  $E_{Fi} = E_i, E_{Bi} = E_r, E_{F0} = E_t$  和  $E_{B0} = 0$ 。

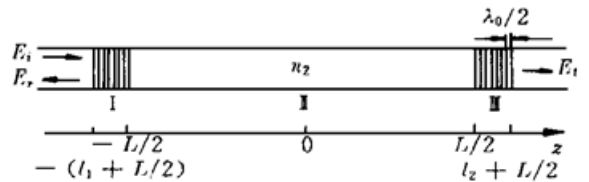


图 1 光纤光栅谐振腔

Fig. 1 Optical fiber grating resonator

这是一个分布反馈系统。H. Kogelink 等在解分布反馈半导体激光器时已给出一对分布反馈耦合波方程<sup>[11]</sup>,不过当时是用于线性系统。

这对方程可写成如下矩阵形式:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} E_F(z) \\ E_B(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\alpha + j\delta) & -jk \\ jk & (\alpha + j\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_F(z) \\ E_B(z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金高技术探索项目资助。

这里  $E_F(z)$  和  $E_B(z)$  是电场  $E(z)$  的正、反向行波的慢变振幅

$$E(z) = E_F(z) \exp(-j\beta z) + E_B(z) \exp(j\beta z) \quad (2)$$

$\beta = n\omega/c$  为相位常数,  $n = n(z)$  为光纤折射率, 它在光栅部分是如下周期调制函数

$$n(z) = n_0 + n_1 \cos 2\beta_0 z \quad (3)$$

这里,  $n_0, n_1$  分别为平均折射率和调制振幅(通常约为  $10^{-5} \sim 10^{-2}$ ),  $\beta_0$  为调制相位常数。式(1)中  $\alpha$  为光纤衰减常数,  $\delta = n(\omega - \omega_0)/c$  为频率失谐(在 Bragg 条件下  $\delta = 0$ ) 而  $\kappa = \pi n_1/\lambda_0$  为耦合常数。 $\lambda_0/2n_0$  为光栅间隔。显然, 方程(1)的特解是双曲正、余弦函数。在给定边界条件下, 不难分区求出

$$\begin{bmatrix} E_i \\ E_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{ch}\zeta & j \operatorname{sh}\zeta \\ -j \operatorname{sh}\zeta & \operatorname{ch}\zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_F(-L/2) \\ E_B(-L/2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} E_F(-L/2) \\ E_B(-L/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp\{(\alpha + j\beta)L\} & 0 \\ 0 & \exp\{-(\alpha + j\beta)L\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_F(L/2) \\ E_B(L/2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} E_F(L/2) \\ E_B(L/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{ch}\zeta & j \operatorname{sh}\zeta \\ -j \operatorname{sh}\zeta & \operatorname{ch}\zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

以上考虑到在光纤光栅实际运用中总有  $\alpha \ll \beta, \delta \ll \beta$ 。 $\zeta = \kappa l_i = \pi n_1 l_i/\lambda_0$  ( $l_i$  为光栅区长度,  $i = 1, 2$ ) 是光栅结构参数。

综合以上三式, 就得到器件的调制特性

$$T_M(\varphi) = \left| \frac{E_t}{E_i} \right|^2 = \left| \frac{\operatorname{sh}\zeta \operatorname{sh}\zeta}{\exp[-(\alpha - j\beta)L] + \operatorname{cth}\zeta \operatorname{cth}\zeta \exp[(\alpha + j\beta)L]} \right|^2 = \frac{T_0}{\{1 + F \sin^2[(\varphi - \pi/2)/2]\}} \quad (7)$$

式中  $\varphi = 2\pi m L/\lambda$  为单程相移, 峰值透射率

$$T_0 = (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \exp(-2\alpha L)/(1 - R)^2 \quad (8)$$

谐振腔精度因子

$$F = 4R/(1 - R)^2 \quad (9)$$

以上  $\eta_i = \operatorname{th}^2 \zeta$  为光栅谐振反射率,  $R = \sqrt{R_1 R_2}$  为光腔有效反射率, 而  $R_i = \eta_i \exp(-2\alpha L)$  为光栅有效反射率。

### 3 光纤光栅双稳态

众所周知, 掺铒光纤有比普通光纤大得多的非线性折射率系数  $n_2^{[12]}$ , 又由于光纤芯有效截面积  $A_{\text{eff}}$  甚小, 故在一段不长的光纤上会有显著非线性相移。不难计算图 1 中 I 区的非线性相移  $\mathcal{Q}_L$

$$\mathcal{Q}_L = \varphi - \mathcal{Q} = 4\pi n_2 \exp(2\alpha L) (1 + R_2) I_T / [\lambda (1 - \eta_2) L_{\text{eff}}] \quad (10)$$

这里  $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-2\alpha L)]/2\alpha$  是掺铒光纤有效长度。 $I_T \equiv |E_t|^2$  是透射光强,  $\mathcal{Q} = 2\pi n_0/\lambda$  是初始相移,  $n_0$  为纤芯低光强折射率,  $n_2$  为非线性折射系数(Kerr 系数)。

由上式得到如下的直线反馈特性

$$T_F(\varphi) = |E_t/E_i|^2 = K(\varphi - \mathcal{Q}) \quad (11)$$

直线斜率反比于输入光强  $I_i = |E_i|^2$

$$K = \lambda (1 - \eta_2) \exp(-2\alpha L) / \{4\pi n_2 (1 + R_2) L_{\text{eff}} I_i\} \quad (12)$$

由常用色散型光学双稳态的图解法不难分析其运转。调制特性  $T_M(\varphi)$  和反馈特性  $T_F(\varphi)$  的交点确定了系统的状态,这在原则上和普通的镜面反射率分别为  $R_1$  和  $R_2$  的非线性 F-P 器件一样。最低双稳阈值光强  $I_{thm}$  取决于  $T_M(\varphi)$  的最大斜率  $K_m^{[7]}$ ,

$$K_m = FT_0 \sqrt{X(1-X)} / (1+Fx)^2 = K_m' T_0 \tag{13}$$

这里

$$X = \sin^2 \varphi_m / 2 = [(3F+2) - \sqrt{(3F+2)^2 - 8F}] / (4F) \tag{14}$$

$\varphi_m$  为  $T_M(\varphi)$  的拐点相移。于是有最低双稳阈值光功率  $P_{thm} = A_{eff} I_{thm}$ , 为

$$P_{thm} = \frac{\lambda A_{eff}}{4\pi n_2 L_{eff}} \frac{(1-R)^2}{(1+R_2)(1-\eta_1)} \frac{1}{K_m'} \tag{15}$$

我们在不同的光栅参数  $n_1 l$  和掺铒光纤衰减系数  $\alpha L$  下计算了  $P_{thm}$ , 如图 2 所示, 这里根据文献[12] 取  $n_2 = 6.9 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$ ,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $A_{eff}$  依据武汉邮电科学研究院掺铒光纤模场半径  $5.5 \mu\text{m}$  算出。

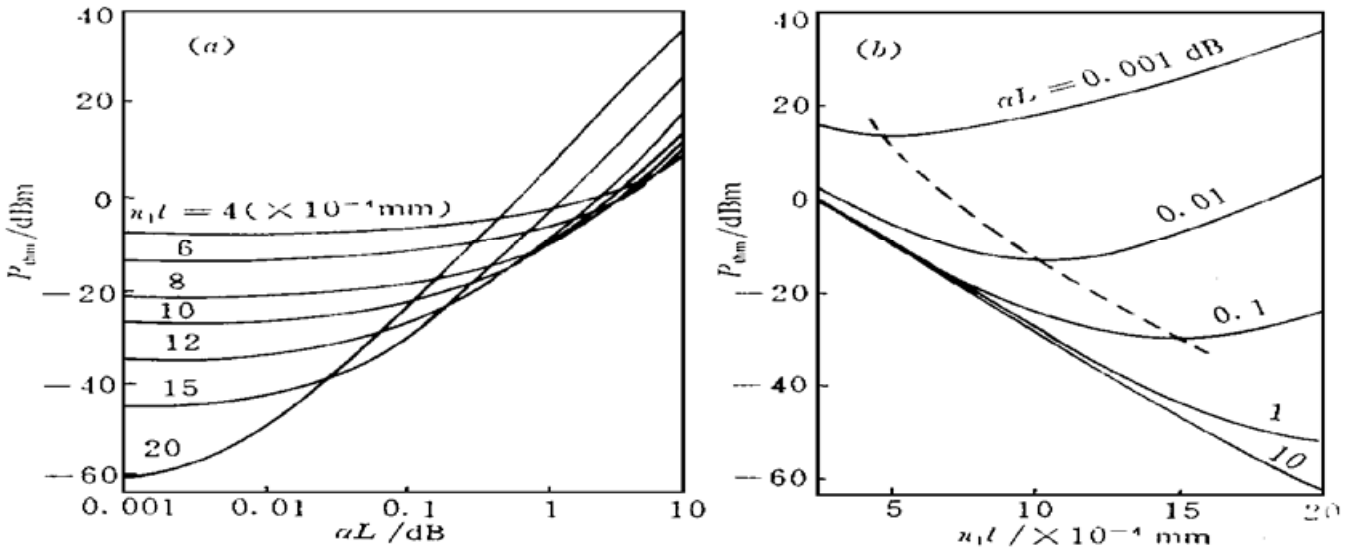


图 2 掺铒光纤光栅双稳态阈值特性

Fig. 2 Optical bistability threshold of an Er-doped fiber grating

### 4 结 论

由以上讨论和计算, 可得出如下结论:

(1) 光纤光栅掺铒光纤双稳器件完全可以在  $\mu\text{W}$  功率水平上工作, 表明它可作为光纤通信线路上的—种光信号处理元件;

(2) 适当设计的器件可以只具有厘米乃至毫米量级的尺寸, 考虑到 OBD 可用作全光信号放大、脉冲整形和脉宽压缩, 这种微型器件可沿光纤—维集成, 实现光纤通信的全光中继;

(3) 因该器件全部由光纤组成, 而作为光纤基质的石英的非线性响应时间极低, 所以器件完全可以在 THz 频率上高速运转;

(4) 达到以上水平所需光栅结构参数  $n_1 l$  约在  $(4 \sim 15) \times 10^{-4} \text{ mm}$  范围, 是国内现有水平可以实现的。而且, 进一步的分析表明, 并不是  $n_1 l$  越大(光纤光栅峰值反射率越大) 双稳阈值越低, 即对于特定的腔耗  $\alpha L$ , 有一最佳  $\zeta$  值, 如图 2(b) 中虚线所示;

(5) 图 2 中的计算曲线是按对称腔求出的, 即计算中已令  $\eta_1 = \eta_2, \zeta_1 = \zeta_2, R_1 = R_2 = R$ 。

由式(15)可以看出,将两只光栅作不对称设计,即 $R_1(\eta_1)$ 小, $R_2(\eta_2)$ 大,可进一步降低双稳阈值功率。

### 参 考 文 献

- 1 F. A. P. Tooley, S. D. Smith, C. T. Seaton. High gain signal amplification in an InSb transphaser at 77 K. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(9): 807~ 809
- 2 J. He, M. Cada, M. -A. Dupertuis *et al.*. All-optical bistable switching and signal regeneration in semiconductor layered distributed-feedback/Fabry-Perot structure. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(7): 866~ 868
- 3 K. Nonaka, Y. Noguchi, H. Tsuda *et al.*. Digital signal regeneration with side-injection-light-controlled bistable laser diode as a wave converter. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1995, **7**(1): 29~ 31
- 4 J. Jacquet, F. Serre, E. Gaumont-Goarin *et al.*. 2.5 Gbit/s optical triggering with signal reshaping using bistable laser with proton bombarded salurable absorber, ECOC'93 19th European Conf. on Opt. Commum. Proceedings, 1993, **2**: 293~ 296
- 5 Song Qian, Zhang Yuancheng, Zhang Ying. All-optical repeater amplifier using a Er-doped fiber OBD. *Proceedings of Seventh National Conference on Optical Fiber Communications* (全国第七次光纤通信学术论文集), 1995. 237 (in Chinese)
- 6 Zhang Yuancheng, Song Qian. Optical Switching by Er-doped fiber optical bistability. *Proceedings of Seventh National Conference on Optical Fiber Communications* (全国第七次光纤通信学术论文集), 1995. 685 (in Chinese)
- 7 Zhang Yuancheng, Song Qian, Nonlinear optical fiber resonator: Optical fiber bistability. *Wuh. Univ. J. Nat. Sci.*, 1996, **1**(2): 187
- 8 Song Qian, Zhang Yuanlong, Li Jixing *et al.*. Er-doped Fiber Optical Bistability by Ar-laser. *Wuh. Univ. J. Nat. Sci.*, 1996, **1**(2): 203
- 9 Song Qian, Zhang Yuancheng, Li Jixing *et al.*. Optical bistability of an  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber under  $\text{Ar}^+$ -laser irradiation. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(8): 719~ 721 (in Chinese)
- 10 Song Qiang, Zhang Yuancheng, Li Jixing *et al.*. Digital optical signal amplifier using an Er-doped fiber optical bistable device. *Wuh. Univ. J. Nat. Sci.*, 1997, **2**(1): 45
- 11 H. Kogelnik, C. V. Shank. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(5): 2327~ 2335
- 12 R. A. Betts, T. Tjugiarto, Y. L. Xue *et al.*. Nonlinear refractive index in Erbium doped fiber: theory and experiment. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(4): 908~ 913

## Optical Bistability Devices with Fiber-optical Gratings

Zhang Yuancheng

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

Zhang Ying

(The R & D Center of Telecom Technique, CATT, M. I. T., Beijing 100083)

**Abstract** It is proposed that a segment of an Er-doped fiber with a couple of fiber gratings on the ends may be used as a novel optical bistability device with low power and high speed. Operation and bistability threshold of the device are analysed in accordance with the distributed feedback couple-mode theory and the nonlinear characteristic of the Er-doped fiber. It is shown that a nanoseconds microwatts bistable operation of a centimeters-sized device is realizable under nowadays technological conditions.

**Key words** optical nonlinearity, optical bistability, optical fiber grating, Er-doped optical fiber