

非线性光纤环: 1. 光纤双稳态*

张远程 宋 骞**

(武汉大学物理系, 武汉 430072)

摘 要 利用传输矩阵统一处理各种光纤环谐振腔的线性和非线性特性, 发现各种纤环谐振腔在非线性条件下均可产生光学双稳现象。对各种非线性纤环双稳特性进行了计算, 分析和比较, 确定了器件设计原则。

关键词 光学非线性, 光学双稳性, 掺铒光纤。

1 引 言

作为一种重要的非线性光学现象, 光学双稳态不仅在非线性光学的基础研究, 如分岔、混沌, 和二级相变等领域有重要价值^[1, 2], 而且, 在全光通信和全光计算机等高科技领域也有重要应用前景^[3~5]。光纤近年来也被作为一种重要的非线性光学介质, 在很多非线性光学器件中得到广泛应用, 光纤双稳态就是一例。这主要在于它有极细而长的几何形状, 因而在一定光功率下有较明显的非线性相移。

虽然光纤双稳器件(FOBD)已首次成功地用来观测一个全光系统的分岔和混沌^[1], 但由于该实验用的是普通光纤和用普通光学镜片构成谐振腔, 所以双稳阈值高达几十至几百瓦。作者在已有光学双稳态实验工作^[2, 6, 7]的基础上, 研究具有比普通光纤高 4 个数量级非线性折射率系数^[8]的掺铒光纤和光纤耦合器组成的全光纤谐振腔的掺铒光纤双稳器件(EDFOBD), 表明其双稳阈值为毫瓦甚至远低于此值。文中利用传输矩阵统一处理各种纤环谐振腔的线性和非线性特性, 对各种掺铒光纤双稳器件的特性进行了计算, 分析和比较, 确定了器件设计原则, 有关实验工作另行报道。

2 基本光纤网络及其传输矩阵

图 1 是几种基本光纤网络。设所用光纤的振幅吸收系数和传输常数分别为 α 和 $\beta = 2n\pi/\lambda$ (n 为纤芯折射率), 以 E 表示光束的电场强度, 其字母下标表示正向(f) 和反向(b) 行波, 数字下标表示相应端口。

* 国家自然科学基金高技术探索项目资助。

** 武汉大学电子信息学院。

收稿日期: 1996 年 6 月 6 日

2.1 二端网络

对于图 1(a) 的二端网络, 显然有

$$\begin{bmatrix} E_{f1} \\ E_{b1} \end{bmatrix} = M_a \begin{bmatrix} E_{f2} \\ E_{b2} \end{bmatrix},$$

$$M_a = \begin{bmatrix} \exp [(\alpha - j\beta)L] & 0 \\ 0 & \exp [-(\alpha - j\beta)L] \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} E_{b1} \\ E_{f2} \end{bmatrix} = M'_\alpha \begin{bmatrix} E_{f1} \\ E_{b2} \end{bmatrix},$$

$$M'_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & \exp [-(\alpha - j\beta)L] \\ \exp [-(\alpha - j\beta)L] & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

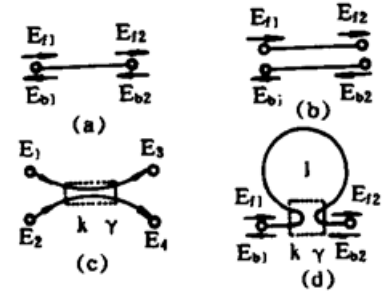


Fig. 1 Basic optical fiber networks

2.2 四端网络

对于图 1(b) 的四端网络, 同样有

$$\begin{bmatrix} E_{f1} \\ E_{b1} \end{bmatrix} = M_b \begin{bmatrix} E_{f2} \\ E_{b2} \end{bmatrix},$$

$$M_b = \begin{bmatrix} \exp [(\alpha - j\beta)L_1] & 0 \\ 0 & \exp [-(\alpha - j\beta)L_2] \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3 光纤耦合器

形如图 1(c) 所示的四端网络是由两小段剥去包层的光纤拼接或熔合而成。设其光强耦合系数和损耗率分别为 k 和 γ , 则容易发现

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = M_c \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad M_c = \sqrt{1 - \gamma} \begin{bmatrix} \sqrt{1 - k} & j\sqrt{k} \\ j\sqrt{k} & \sqrt{1 - k} \end{bmatrix} \quad (4)$$

或

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_3 \end{bmatrix} = M'_c \begin{bmatrix} E_2 \\ E_4 \end{bmatrix}, \quad M'_c = \frac{1}{j\sqrt{k(1 - \gamma)}} \begin{bmatrix} 1 & -\sqrt{(1 - \gamma)(1 - k)} \\ \sqrt{(1 - \gamma)(1 - k)} & -(1 - \gamma) \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.4 纤环反射镜(FM)

图 1(d) 的纤环反射镜是由一小段光纤和一只光纤耦合器组成, 在(2)式中令 $L = l$, 有

$$\begin{bmatrix} E_{b1} \\ E_{f2} \end{bmatrix} = M'_d \begin{bmatrix} E_{f1} \\ E_{b2} \end{bmatrix},$$

$$M'_d = M_c M'_a M_c = (1 - \gamma) \exp [-(\alpha - j\beta)l] \begin{bmatrix} 2j\sqrt{k(1 - k)} & (1 - 2k) \\ (1 - 2k) & 2j\sqrt{k(1 - k)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

或

$$\begin{bmatrix} E_{f1} \\ E_{b1} \end{bmatrix} = M_d \begin{bmatrix} E_{f2} \\ E_{b2} \end{bmatrix},$$

$$M_d = \frac{1}{(1 - \gamma)(1 - 2k)} \begin{bmatrix} \exp [(\alpha - j\beta)l] & -2j(1 - \gamma)\sqrt{k(1 - k)} \\ 2j(1 - \gamma)\sqrt{k(1 - k)} & (1 - \gamma)^2 \exp [-(\alpha - j\beta)l] \end{bmatrix} \quad (7)$$

3 线性纤环谐振腔

上述基本光纤网络可构成各种纤环谐振腔,如图2所示。其传输特性可由它们各成分的传输矩阵求出。特约定,各传输矩阵的下标新加一个数字,表示各矩阵元中参数(k, γ)的相应脚码。此外,众所周知,光强比等于电场强度比的模平方。

3.1 直耦纤环谐振腔[DFRR, 图2(a)]

简单的推导表明,当

$$k = k_{cd} = 1 - (1 - \gamma) \exp(-2\alpha L)$$

时可形成如下共振调制特性(令 $I_1 = I_t, I_4 = I_r$)

$$T_M(\varphi) \equiv \frac{I_r}{I_t} = \frac{T_0}{1 + F \sin^2 \varphi/2}, \quad \varphi = \beta L \quad (8)$$

$$\text{式中 } T_0 = (1 - \gamma)/(1 - R), \quad F = 4R/(1 - R)^2, \quad R = (1 - \gamma) \exp(-2\alpha L) \quad (9)$$

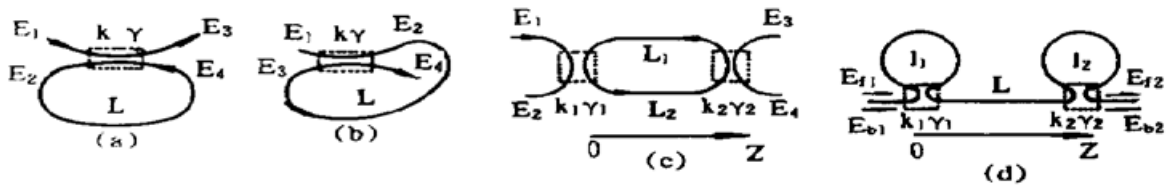


Fig. 2 Optical fiber ring resonators

3.2 互耦纤环谐振腔[CFRR, 图2(b)]

类似地,当

$$k = k_{cc} = (1 - \gamma) \exp(-2\alpha L)$$

时,共振调制特性是(令 $I_1 = I_t, I_3 = I_r$)

$$T_M(\varphi) = T_0/\{1 + F \sin^2[(\varphi - \pi)/2]\} \quad (10)$$

式中 T_0, F, R 同(9)式。两者的调制特性除相位差 π 外其他相同,必须注意 $k_{cd} = 1 - k_{cc}$ 。

3.3 双耦纤环谐振腔[TFRR, 图2(c)]

若两只光纤耦合器的参数分别为 k_1, γ_1 和 k_2, γ_2 , 其传输矩阵不难由(2)式、(5)式导出

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = M_T \begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix}, \quad M_T = M'_{c1} M_b M'_{c2} \quad (11)$$

令 $E_1 = E_t, E_3 = E_r, E_4 = 0$, 上式给出其调制特性

$$T_M(\varphi) = T_0/(1 + F \sin^2 \varphi/2), \quad \varphi = \beta(L_1 + L_2) \quad (12)$$

$$\text{式中 } T_0 = T_1 T_2 \exp(-2\alpha L_1)/(1 - R)^2, \quad F = 4R/(1 - R)^2, \quad R = \sqrt{R_1 R_2} \quad (13)$$

$$T_i = k_i(1 - \gamma_i), \quad R_i = (1 - \gamma_i)(1 - k_i) \exp(-2\alpha L_i), \quad (i = 1, 2) \quad (14)$$

3.4 纤镜光纤谐振腔[FMR, 图2(d)]

与前三种行波型纤环谐振腔不同,纤镜光纤谐振腔是驻波型纤环谐振腔。由基本传输矩阵[(1)、(7)式],有

$$\begin{bmatrix} E_{f1} \\ E_{b1} \end{bmatrix} = M_F \begin{bmatrix} E_{f2} \\ E_{b2} \end{bmatrix}, \quad M_F = M_{d1} M_\alpha M_{d2} \quad (15)$$

令 $E_{f1} = E_t, E_{f2} = E_r, E_{b2} = 0$, 可得如下调制函数

$$T_M(\varphi) = T_0/\{1 + F \sin^2[(\varphi - \pi)/2]\}, \quad \varphi = \beta(l_1 + 2L + l_2) \quad (16)$$

$$\text{式中 } T_0 = T_1 T_2 \exp(-2\alpha L)/(1 - R)^2, \quad F = 4R/(1 - R)^2, \quad R = \sqrt{R_1 R_2}$$

$$\begin{aligned} T_i &= (1 - 2k_i)^2(1 - \gamma_i)^2 \exp(-2\alpha l_i), \\ R_i &= 4k_i(1 - k_i)(1 - \gamma_i)^2 \exp(-2\alpha L), \quad (i = 1, 2) \end{aligned} \quad (17)$$

这一调制特性与(12)式也差一个相位 π 。

4 非线性纤环谐振腔

在光学非线性条件下, 纤芯折射率将产生非线性增量

$$\Delta n_{NL} = n - n_0 = n_2 I_c(z) \quad (18)$$

式中 n_0 为纤芯弱光折射率, n_2 为纤芯克尔系数, z 为腔内光纤长度坐标, $I_c(z)$ 为该点腔内光强。因而一小段光纤 dz 上会产生相应非线性相移

$$d\Phi_L = (2\pi/\lambda) \Delta n_{NL} dz = (2\pi n_2/\lambda) I_c(z) dz \quad (19)$$

在整个环腔的积分造成了各种纤环谐振腔的非线性特性。非线性条件可以是: 1) 采用较强光源, 或更细的光纤芯径, 以增大 $I_c(z)$; 2) 采用克尔系数 n_2 高的特种光纤, 如掺铒光纤; 3) 提高腔内光纤长度, 以此提高环腔总相移。不过, 其代价是需相应提高光源相干性, 以保持腔内远小于光源相干长度的要求。

4.1 直耦纤环谐振腔和互耦纤环谐振腔

对于直耦纤环谐振腔, 由于 $I_c(z) = I_4 \exp(-2\alpha z)$, 所以

$$\Delta\Phi_L = \Phi - \Phi_0 = (2\pi/\lambda) \int_0^L I_c(z) dz = \pi n_2 [1 - \exp(-2\alpha L)] / (\lambda\alpha) \quad (20)$$

由此反解出 $I_T = I_4$, 并除以 $I_I = I_1$, 可得一反馈特性

$$T_F(\Phi) \equiv I_T/I_I = K(\Phi - \Phi_0) \quad (21)$$

其中

$$K = \lambda\alpha / \{ \pi n_2 [1 - \exp(-2\alpha L)] I_1 \} \quad (22)$$

对于互耦纤环谐振腔, 只需将以上各式中 I_4 改为 I_3 , 结果不变。

4.2 双耦纤环谐振腔

如图 2(c), 从 z 点向右看出是一个四端光纤网络(分别以 $L_1 - z$ 和 $L_2 - z$ 取代其 L_1 和 L_2 其传输矩阵记作 $M_b(Z)$) 与第二个光纤耦合器的组合。令 $E_1 = E_I$, $E_2 = E_T$, $E_4 = 0$, 由(2)式, (5)式有

$$\begin{bmatrix} E_{ef}(z) \\ E_{cb}(z) \end{bmatrix} = M_b(z) M_{c2}' \begin{bmatrix} E_T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

故腔内循环光强分段为

$$\begin{bmatrix} I_{ef}(z) \\ E_{cb}(z) \end{bmatrix} = \frac{I_T}{T_2} \begin{bmatrix} \exp[2\alpha(L_1 - z)] \\ (1 - \gamma_2)(1 - k_2) \exp[-2\alpha(L_2 - z)] \end{bmatrix} \quad (24)$$

注意到(2)式, 非线性相移须计及 L_1 和 L_2 上之积分和, 有

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_L = \Phi - \Phi_0 &= (2\pi n_2/\lambda) \left[\int_0^{L_1} I_{ef}(z) dz + \int_0^{L_2} I_{cb}(z) dz \right] \\ &= n_2 \pi L_T (1 + R\eta) [\exp(2\alpha L_1) - 1] / (\lambda\alpha T_2) \end{aligned} \quad (25)$$

式中

$$\eta = [\exp(2\alpha L_1) - 1] / [\exp(2\alpha L_2) - 1] \quad (26)$$

于是可得反馈特性亦如(21)式, 不过

$$K = \lambda\alpha T_2 / \{ \pi n_2 (1 + R_2\eta) [\exp(2\alpha L_1) - 1] I_1 \} \quad (27)$$

4.3 纤镜光纤谐振腔

如图 2(d), 从 z 点向右看去的光纤网络由长为 $L - z$ 的二端网络(其传输矩阵记作 $M_a(z)$) 与第二个光纤镜组合, 令 $E_{f1} = E_I$, $E_{f2} = E_T$, $E_{b2} = 0$, 由(1)、(7)式有

$$\begin{bmatrix} E_{cf}(z) \\ E_{cb}(z) \end{bmatrix} = M_a(z) M_{d2} \begin{bmatrix} E_T \\ 0 \end{bmatrix} \tag{28}$$

于是腔内正、反两行波的光强为

$$\begin{bmatrix} I_{cf}(z) \\ I_{cb}(z) \end{bmatrix} = \frac{I_r}{T_2} \begin{bmatrix} \exp [2\alpha(l_2 + L - z)] \\ 4(1 - \gamma_2)k_2(1 - k_2) \exp [-2\alpha(L - z)] \end{bmatrix} \tag{29}$$

由此并注意到(16)式中 $\varphi = \beta(l_1 + 2L + l_2)$, 忽略 l_1, l_2 上的损耗和相移

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{Q}_L &= \varphi - \mathcal{Q} = 2(2\pi n_2/\lambda) \int_0^L [I_{cf}(z) + I_{cb}(z)] dz \\ &= 2n_2\pi l_T [\exp(2\alpha L) - 1](1 + R_2)/(\lambda T_2\alpha) \end{aligned} \tag{30}$$

这样也可得到如(21)式之反馈特性, 不过

$$K = \lambda\alpha T_2 / \{2\pi n_2 [\exp(2\alpha L) - 1](1 + R_2)I_1\} \tag{31}$$

5 纤环双稳态器件(FROBD)

在非线性条件下, 以上 4 种纤环谐振腔都将呈现光学双稳特性。因为它们内部必须同时满足一对方程

$$T_M(\mathcal{Q}) = T_0/[1 + F \sin^2 \mathcal{Q}/2] \tag{32}$$

$$T_F(\mathcal{Q}) = K(\varphi - \mathcal{Q}) \tag{33}$$

器件具体结构的差别仅在各参量具体表达式的不同, 而且反馈特性的斜率 K 均反比于输入光强 I_1 。至于(10)式、(16)式中的 π 相差, 不影响下述结论。

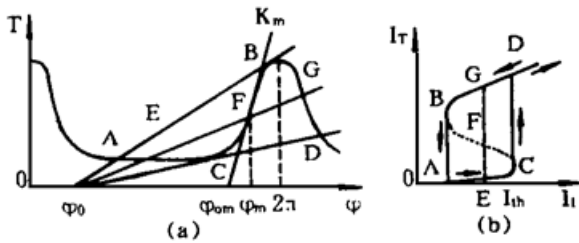


Fig. 3 Optical fiber bistability

当初相 \mathcal{Q} 从零增加时, 双稳回线宽度变窄, 直至某个 $\mathcal{Q} = \mathcal{Q}_m$, 宽度减至零, 双稳回线退化为一微分增益曲线。它对应于 $T_M(\mathcal{Q})$ 的最大斜率 K_m 和最低阈值光强 I_{thm} 。容易求出

$$\begin{aligned} K_m &= T_0 F \sqrt{X(1 - X)/(1 + FX)^2}, \\ X &= [(3F + 2) - \sqrt{(3F + 2)^2 - 8F}]/(4F) \end{aligned} \tag{34}$$

利用区间嵌套法^[10]由(32)式、(33)式计算了以上各纤环双稳器件在不同参数下的双稳回线, 其中一些如图 4 所示。图 4(a) 实线是直耦纤环谐振腔和互耦纤环谐振腔的双稳回线, 两者除所用光纤耦合器的耦合系数须保持 $k_{cd} = 1 - k_{oc}$ 外没有什么不同。值得注意的是, 调制特性(8)式和(10)式所用的光强 I_4 和 I_3 并不真正是器件的透射光强, 它们是不能输出的腔内光强, 这两器件真正的透射光强应分别是 I_3 和 I_4 , 注意到能量守恒关系式

$$(I_3 + I_4) = (1 - \gamma)(I_1 + I_2) \tag{35}$$

对直耦纤环谐振腔有

$$I_3 = (1 - \gamma)I_1 - (1 - R)I_4 \tag{36}$$

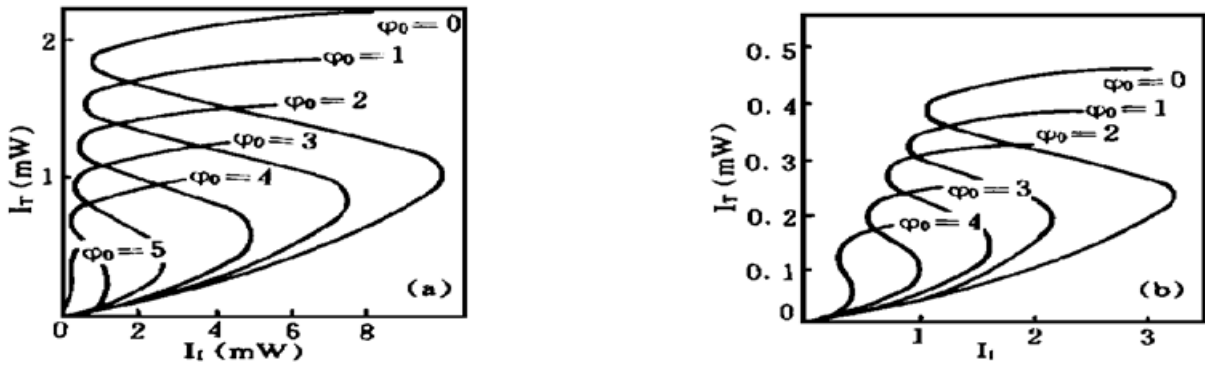


Fig. 4 Hysteresises for FROBD

此时表明直耦纤环谐振腔结构的纤环双稳器件有反相输出(负逻辑)。互耦纤环谐振腔亦然, 只须将(36)式中的下标 3 与 4 互换。利用(36)式换算出该器件“可输出”的双稳回线表明, 这两种器件的输出跃变幅度很小, 且又带有一个很大的本底(对比度很低), 对实际运用不利。图 4(b) 是纤镜光纤谐振腔结构的纤环双稳器件的双稳回线, 可见在相同损耗参数 (α , γ) 下, 由于适当选取了 k 值, 图 4(b) 的双稳阈值比图 4(a) 低。尽管它由两只光纤耦合器构成因而损耗实际更大。由(22)、(27)和(31)各式, 令 $K = K_m$, 可得各种纤环双稳器件的最低阈值光功率 $P_{thm} = \pi d^2 I_{thm} / 4$ (d 为光纤有效芯径)

$$\begin{aligned} P_{thm} &= \lambda \alpha d^2 / \{4n_2 [1 - \exp(-2\alpha L)] K_m\} \\ &= \lambda \alpha d^2 (1 - R) / \{4n_2 (1 - \gamma) [1 - \exp(-2\alpha L)] K'_m\}, \end{aligned} \quad \text{(直耦纤环谐振腔, 互耦纤环谐振腔)} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} P_{thm} &= \lambda \alpha d^2 T_2 / \{4n_2 (1 + R_2 \eta) [\exp(2\alpha L_1) - 1] K_m\} \\ &= \lambda \alpha d^2 (1 - R)^2 / \{4n_2 T_1 (1 + R_2 \eta) [1 - \exp(-2\alpha L_1)] K'_m\}, \end{aligned} \quad \text{(双耦纤环谐振腔)} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} P_{thm} &= \lambda \alpha d^2 T_2 / \{8n_2 (1 + R_2) [\exp(2\alpha L) - 1] K_m\} \\ &= \lambda \alpha d^2 (1 - R)^2 / \{8n_2 T_1 (1 + R_2) [1 - \exp(-2\alpha L)] K'_m\}, \end{aligned} \quad \text{(纤镜光纤谐振腔)} \quad (39)$$

以上各式都用了一个只与 F 有关的因子 $K'_m = K_m / T_0$, 以资比较。

利用(37) ~ (39) 各式, 在不同参数下计算了各种纤环双稳器件的最低阈值光强如图 5, 其中 n_2 使用文献[8] 中的值, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 纤芯有效直径 $d = 3 \mu\text{m}$ 。

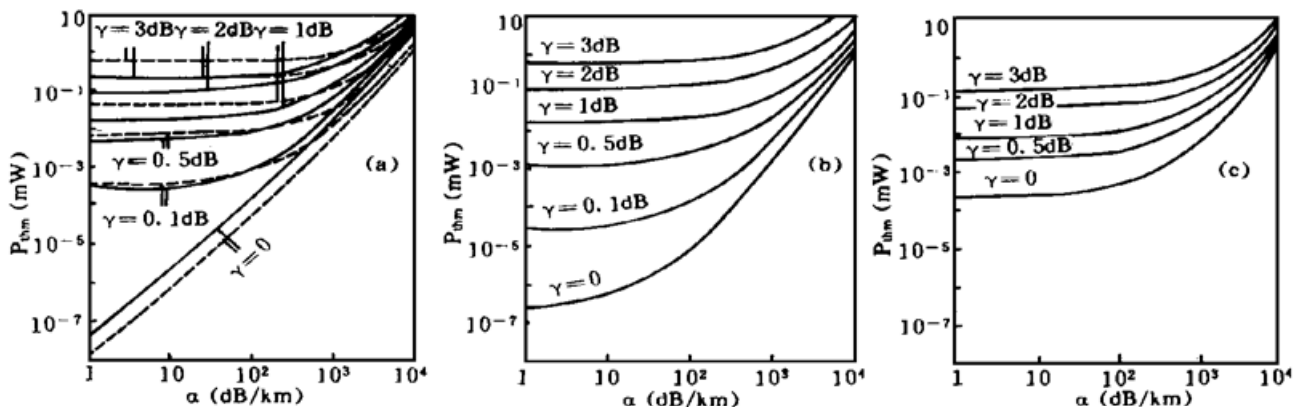


Fig. 5 Threshold characteristic for FROBD

对于双耦纤环谐振腔和纤镜光纤谐振腔, P_{thm} 与 k 值有关, 图 6 计算给出纤镜光纤谐振腔

器件 P_{thm} 与 k 的关系曲线, 图 7 给出这种器件的最佳 (P_{thm} 最小) k 值曲线, 而在最佳值 k_{opt} 下, 纤镜光纤谐振腔的最低双稳阈值如图 5(a) 中虚线所示, 并让它与直耦纤环谐振腔, 互耦纤环谐振腔器件相比较。

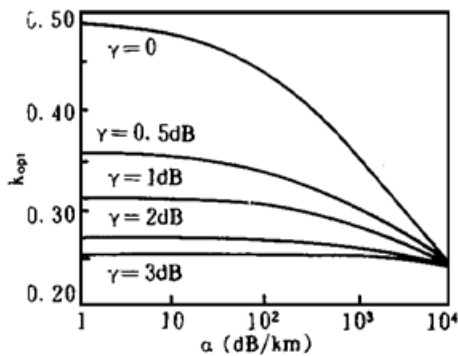


Fig. 6 Minimum threshold for different coupled coefficients

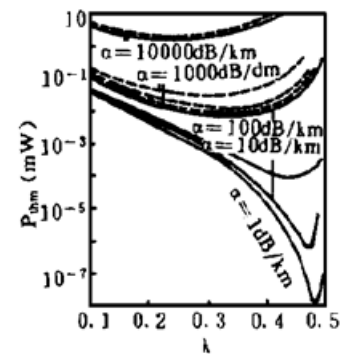


Fig. 7 Optimum coupled coefficient for MFROBD

结 论 由以上分析和计算结果可以得出纤环双稳器件的如下特性, 它们可作为设计器件的原则。

1) 由图 5 可见, 种种掺铒纤环双稳器件的最低阈值功率除极大损耗外都不超过 mW 数量级, 可低至 10^{-8} mW, 因此, 都可在光纤通信功率水平上运用。当然, 图中是最低功率阈值, 要想得到宽度较大的双稳回线需较大功率。

2) 直耦纤环谐振腔和互耦纤环谐振腔有相同的双稳特性(图 4(a)) 和阈值特性(图 5(a) 实线)。不过应注意, 鉴于小的 P_{thm} 对应于尽可能小的损耗(γ, α), (8) 式和(10) 式表明直耦纤环谐振腔中光纤耦合器的耦合系数应尽可能小, 互耦纤环谐振腔则应尽可能接近于 1。考虑到光纤耦合器内耦合系数的增加须减小两光纤的距离, 从而增加耦合模畸变, 所以直耦纤环谐振腔结构更可取。当然, 直耦纤环谐振腔环至少须一个光纤接头, 这又增加了接头损耗, 在图中并未考虑。

3) 纵观图 5, 直耦纤环谐振腔和互耦纤环谐振腔有更低的 P_{thm} 。但应注意到, 第一, 正如前节所述, 这两种纤环双稳器件中大的双稳跃变不能输出出来; 第二, 它要求在光纤耦合器的损耗一定时, 其耦合系数需满足(8) 式和(10) 式的共振要求, 即 k 值不能任意选定, 任何明显偏离都会使光纤谐振腔失去最佳共振而不能获得所需调制特性, 这给器件的良好设计带来困难。

4) 由图 4(a) 和图 4(b) 的对比可看出, 纤镜光纤谐振腔和双耦纤环谐振腔结构多了一个 k 值任意选定的因素。这样, 在损耗(α, γ) 相同时, 纤镜光纤谐振腔可有比直耦纤环谐振腔和互耦纤环谐振腔更低的双稳阈(注意图中横坐标的大小)。前两种器件 k 值的选取可以图 6、7 为参考, 不同 α, γ 下的最佳值 k_{opt} 是不同的。

5) 对比(37)~(39) 三式发现, 双耦纤环谐振腔的 P_{thm} [(42) 式] 的分母中有一因子 $(1 + R_2\eta)$, 这显然是由于非线性相移需计及 L_1 和 L_2 两段光纤而几乎加倍, 造成 P_{thm} 的减小, 纤镜光纤谐振腔的 P_{thm} [(39) 式] 的分母中除此因子外又将 4 变成 8, 这显然是由于驻波共振效应, 造成 P_{thm} 形式上又减半。不过, 由于这两种光腔的最大透过率 T_0 比前两种小(这乃是由于器件复杂增加了损耗之故), 所以, 一般双耦纤环谐振腔和纤镜光纤谐振腔的阈值高于前两种。

但通过光纤耦合器的耦合系数的优化, 完全可以补偿因多个耦合器损耗造成的阈值升高, 见图 5(a) 中的实线和虚线。特别是在光纤高损耗区和光纤耦合器的低损耗区。为了提高 n_2 而使用掺铒光纤, 但这种光纤一般有比普通光纤高 3 个数量级的损耗系数。据计算, 只要选择接近 k_{opt} 的耦合系数值, 纤镜光纤谐振腔掺铒纤环双稳器件照样可以低阈值运转。

6) 从(38)、(39)式可知, 对于一定的等效腔镜反射率 R , 使用低 T_2 (高 T_1)、高 R_2 (低 R_1) 的非对称腔设计, 双耦纤环谐振腔和纤镜光纤谐振腔的双稳阈值会进一步降低。

7) 纤镜光纤谐振腔和双耦纤环谐振腔相比, 前者不但可通过最佳耦合系数设计使之有可与直耦纤环谐振腔及互耦纤环谐振腔媲美的 P_{thm} , 而且它原则上由一根光纤制成, 不需任何接头, 而后者至少必须再多一个接头损耗, 这在前文并未计及。因此双耦纤环谐振腔的 P_{thm} 还会比图 5 中更高。

根据以上分析, 一个纤镜光纤谐振腔结构的掺铒纤环双稳器件已成功地在氩离子激光下以毫瓦功率级运转, 这将另文报道^[9]。

参 考 文 献

- [1] H. Nakatsuka, S. Asaka, H. Itoh *et al.*, Observation of bifurcation to chaos in an all-optical bistable system. *Phys. Rev. Lett.*, 1983, **50**(2): 109~ 112
- [2] 张远程, 宋 骞等, 半导体激光双稳运转中的相变. 中国激光, 1992, **19**(9): 682~ 686
- [3] T. Venkatesan. All-optical data switching in a optical-fiber link using a GaAs OBD. *Opt. Lett.*, 1984, **9**(7): 297~ 299
- [4] N. Peyghambarian *et al.*, Optical nonlinear, bistability, and signal processing in semiconductor. *J. Opt. Soc. Am.*, 1985, **132**(7): 1212~ 1227
- [5] S. D. Smith, Optical bistability to warts to optical computer. *Nature*, 1984, **301**(5949): 315~ 316
- [6] 张远程, 宋 骞, 混合型光学双稳态的光脉冲放大. 中国激光, 1988, **15**(6): 359~ 362
- [7] 张远程, 宋 骞等, 半导体激光双稳态信号放大和处理. 中国激光, 1993, **20**(7): 515~ 519
- [8] R. A. Betts, *et al.*, Nonlinear refractive index in Erbium doped fiber: theory and experiment. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(4): 908~ 913
- [9] 宋 骞, 张远程, 光学双稳器件定态参数的计算. 量子电子学, 1988, **5**(3): 234~ 240

Nonlinear Fiber Loop: 1. Fiber Optical Bistability

Zhang Yuancheng Song Qian

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

(Received 6 June 1996)

Abstract The linear and nonlinear characteristics of various optical fiber ring resonators have been processed uniformly using transmission matrix. It is found that in nonlinear operation each of those optical fiber ring resonators can be used to make an all-optical fiber bistability device. The configuration, characteristics and threshold of various Er-doped fiber ring bistable devices have been calculated, analysed, and compared. The design principle of the devices has been given.

Key words optical nonlinearity, optical bistability, Er-doped fiber.