

# 全光数字光开关和光限幅器\*

王又法

(上海海运学院电子工程系, 上海 200135)

王 奇 鲍家善

(上海大学理学院, 上海 201800)

**摘 要** 分析了级联单端输入非线性光波导耦合器的输出特性。理论分析表明这类器件具有极好的开关、限幅以及稳定光功率的特性。调整耦合器的耦合长度, 可改变开关的阈值功率和限幅器的门限, 且随着级联耦合器数目的增加, 开关的动态开关区、消光比以及输出功率的起伏下降。数值分析表明, 级联耦合器作为全光开关, 消光比可小于  $-90$  dB, 动态开关区可小于  $3 \times 10^{-4} P_c$ ; 作为光功率稳定器和光学限幅器, 其输出光功率起伏可小于  $10^{-7} P_c$ 。

**关键词** 非线性耦合, 光开关, 光限幅器。

## 1 引 言

非线性光波导定向耦合器在高码速全光通讯和光计算领域的潜在应用, 引起了人们极大的研究兴趣。自从 1981 年 Jensen<sup>[1]</sup>首次描述了非线性耦合器的耦合特性以来, 非线性光波导耦合器得到了广泛的研究, 显示了许多令人感兴趣的特性<sup>[1~3]</sup>。通常的双芯非线性光波导耦合器的动态开关区(约  $0.4P_c$ )较大, 为减小动态开关区, Cheng 和 Snyder<sup>[4]</sup>等人提出了多芯非线性耦合光波导结构, 并使得动态开关区下降至  $0.1P_c$ , 但其开关消光比增大。由于非线性光波导耦合器具有对输入光功率的非线性压缩作用, 为减小动态开关区以及开关的消光比, 本文提出了多级串联单端输入非线性光波导耦合光波导结构。数值分析表明, 这类器件不仅具有极小的动态开关区和消光比, 而且具有很高的稳定光功率的作用。它必将在光信息处理、光传感和微弱光信号检测中发挥重要作用。既然光纤具有极小的损耗而且低损耗对非线性耦合器输出特性的影响很小<sup>[5]</sup>, 因而, 实践上是可行的。

## 2 理论分析

假设非线性耦合由两根完全一样的单模无耗光波导构成, 在光波导 1 中传播的光功率为  $P_1$ , 总输入功率为  $P_i$ 。在单输入条件下, 即  $P_1(0) = P_i$ , 根据文献[1]可得到光功率  $P_1$  随传播距离  $z$  的演变规律:

\* 上海市青年科学基金资助课题。

收稿日期: 1997-08-14; 收到修改稿日期: 1998-03-09

$$P_1 = \frac{P_i}{2} \begin{cases} 1 + \operatorname{cn}(2Cz|m), & m = \frac{P_i}{P_c}, & P_1 < P_c \\ 1 + \operatorname{sech}(2Cz), & & P_1 = P_c \\ 1 + \operatorname{dn}\left(\frac{2Cz}{m_1}|m_1\right), & m_1 = \frac{P_i}{P_c}, & P_1 > P_c \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $C$  为线性耦合系数,  $P_c = 4C/(Q_3 - 2Q_4)$  为临界功率,  $Q_3$  为非线性自耦合系数,  $Q_4$  为非线性互耦合系数。 $\operatorname{cn}(x|m)$  和  $\operatorname{dn}(x|m_1)$  分别为雅可比(Jacobi)椭圆余弦函数和第三类雅可比椭圆函数, 它们都是双周期函数, 其周期分别为  $4K(m)$  和  $2K(m_1)$ ,  $m$  和  $m_1$  分别是椭圆函数  $\operatorname{cn}(x|m)$  和  $\operatorname{dn}(x|m_1)$  的模数, 且  $0 < m < 1$ ,  $0 < m_1 < 1$ 。 $K(m)$  和  $K(m_1)$  为第一类完全椭圆积分, 它们分别是  $m$  和  $m_1$  的函数。因而, 椭圆函数  $\operatorname{cn}(x|m)$  和  $\operatorname{dn}(x|m_1)$  依赖于输入光功率, 也就是说, 非线性耦合器的输出不仅依赖于耦合长度而且依赖于输入功率。

由椭圆函数的定义可知, 当  $m$  足够地趋近 1 时,  $\operatorname{cn}(x) \rightarrow \operatorname{sech}(x)$ ; 当  $m_1$  足够地趋近 1 时,  $\operatorname{dn}(x) \rightarrow \operatorname{sech}(x)$ , 因而  $P_1(z, P_i)$  是连续函数, 在线性极限下, (1) 式可约化为熟知的线性耦合波方程的解。

由于  $\operatorname{dn}(x|m_1) \geq \sqrt{1 - m_1^2}$ , 因而, 当  $P_i \geq P_c$  时, 耦合器不可能达到完全的交叉状态, 而且, 当  $P_i \gg P_c$  时, 无论耦合长度多长, 耦合器始终处于直通状态, 亦即当  $P_i \geq P_c$  时非线性耦合器具有饱和特性。

## 2.1 数值分析

多级串联非线性耦合器结构如图 1 所示。这里假设各个单级光波导耦合器具有同样的线性耦合系数  $C$  和临界功率  $P_c$ 。图中,  $L_i$  为第  $i$  个耦合器的耦合长度。

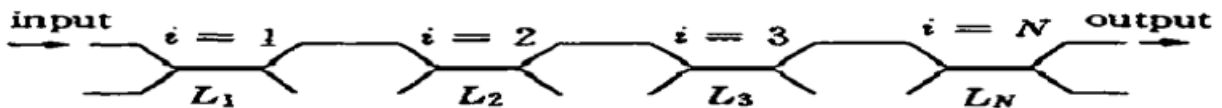


Fig. 1 A schematic of the cascaded NLCC device

图 2 显示了非线性耦合器的归一化输入-输出特性曲线。曲线 1 和曲线 2 分别是耦合长度为  $L = \pi/2C$  和  $L = (\pi + 0.7)/2C$  的单个耦合器的归一化输入与输出特性曲线。曲线 3 和曲线 4 分别是耦合长度为  $L = \pi/2C$  和  $L = (\pi + 0.7)/2C$  的 10 个串联着的耦合器的归一化输入-输出特性曲线。 $P_{iA}$  和  $P_{oA}$  分别为曲线 1 上 A 点所对应的归一化输入和输出功率。显然, 通常的双芯波导耦合器动态开关范围很大。

曲线 1 表明, 除 A 点外, 非线性耦合器对输入光功率具有非线性压缩作用, 而且, 当  $P_i < P_{iA}$  时, 非线性压缩更显著, 因而, A 点将变成耦合长度为  $L = \pi/2C$  的串联耦合器输入-输出特性曲线的不动点。随着耦合器数目的增加, 开关的动态开关区变得越来越陡峭, 限幅输出变得越来越平缓, 最终使 A 点对应的输入  $P_{iA}$  和输出功率  $P_{oA}$ , 分别变为开关的阈值功率和限幅门限, 如图 2 的曲线 3 所示。

从图 2 的曲线 2 可见, 曲线 2 上有两个不动点, 因而, 随着级联耦合器数目的增加, 最终将出现两个阈值功率和两个门限功率, 如曲线 4 所示。

从图 2 的曲线 1 和曲线 2 还可见: 1) 调节耦合器的耦合长度, 可调节输入-输出特性曲线上不动点的位置, 即可调节开关的阈值和限幅门限。2) 随着耦合长度的增加, 动态开关区减小而消光比增大。因而, 构成多级串联开关的耦合器的耦合长度一般应在  $L = \pi/2C$  和  $L =$

$(\pi + 0.7)/2C$  之间。

图 3 给出了由耦合器多级串联而成的五种开关的归一化输入-输出特性曲线。曲线 1、曲线 2 和曲线 3 分别对应由 3 个、4 个和 5 个耦合长度都为  $L = (\pi + 0.7)/2C$  的相串联的耦合器。曲线 4 对应四级串联的耦合器: 前三级耦合器的耦合长度都为  $L = (\pi + 0.7)/2C$ , 而第四级的耦合长度为  $L = \pi/2C$ 。曲线 5 也对应四级串联的耦合器, 但各级的耦合长度为  $L = \pi/2C$ 。

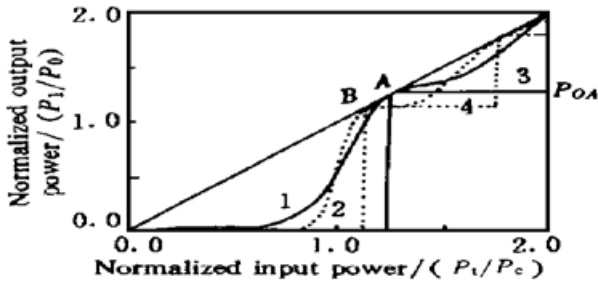


Fig. 2 Normalized output power as a function of input power for the cascaded nonlinear couplers. curve 1: coupling length  $L = \pi/2C$ ; curve 2:  $L = (\pi + 0.7)/2C$ ; curve 3: 10 cascaded couplers with  $L = \pi/2C$ ; curve 4: 10 cascaded couplers with  $L = (\pi + 0.7)/2C$

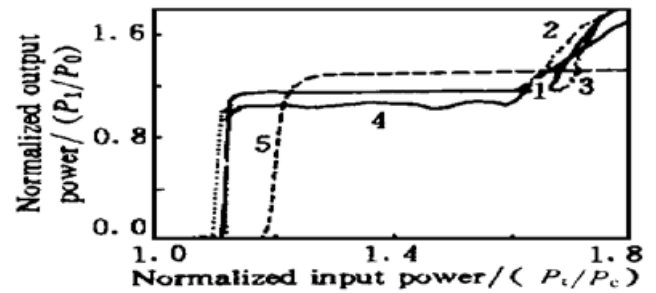


Fig. 3 Switching characteristics of five kinds of cascaded couplers

图 4 和图 5 是图 3 的部分放大。图 4 和图 5 的曲线 1、曲线 2 和曲线 3 表明, 串联耦合器数目的增加导致输出功率起伏下降, 动态开关区减小。在小于阈值功率的开关点附近, 输出具有小旁瓣, 随着耦合器数目增加, 旁瓣波动减弱。从图 4 可见: 1) 当耦合长度  $L$  大于  $\pi/2C$  时, 输出功率起伏减小, 但消光比变差, 如曲线 1 和曲线 5 所示。2) 最后一级耦合器耦合长度  $L = \pi/2C$ , 可减小消光比和开关的动态区, 但输出起伏有所增加, 如图 3 和图 4 的曲线 1 和曲线 4 所示。

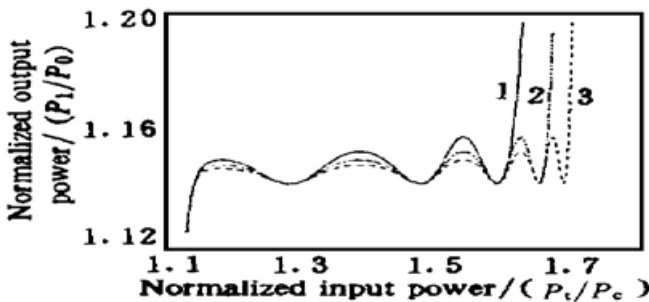


Fig. 4 The rising edge of curves 1, 2, 3, 4 and 5 in Fig. 3, the parameters are same with that in Fig. 3

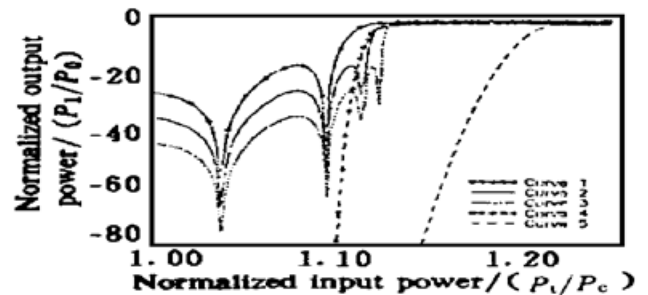


Fig. 5 The limited output power level of curves 1, 2 and 3, the parameters are same with that in Fig. 3

实际上, 串接构成的开关的输入-输出特性曲线对单个耦合器的耦合长度并不敏感, 但与耦合器串接规律很有关系。为了说明这个问题, 图 6 给出了四种不同结构的开关的输入-输出特性曲线。曲线 1 和曲线 2 分别对应耦合长度为  $L = (\pi + 0.3)/2C$  和  $L = (\pi + 0.7)/2C$  的单个耦合器。曲线 3 对应耦合长度分别为  $L_1 = (\pi + 0.3)/2C$  和  $L_i = (\pi + 0.7)/2C (i = 2, 3, 4)$  的四级耦合器。曲线 4 对应耦合长度分别为  $L_1 = (\pi + 0.7)/2C$  和  $L_i = (\pi + 0.3)/2C (i = 2, 3, 4)$  的四个串联耦合器。图中,  $P_{OD} (= P_{ID})$  和  $P_{OE} (= P_{IE})$  分别为不动点 D 和 E 所对应的

输出(输入) 功率,  $P_{iF}$  为  $F$  点所对应的输入功率。

由图6显然可见, 特性曲线4已不具有开关或限幅特性, 不是所希望的。输入光波经过

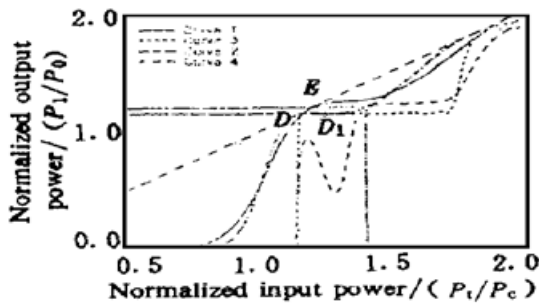


Fig. 6 The normalized output power as a function of input power for four kinds of switches

耦合长度为  $L_1 = (\pi + 0.7)/2C$  的第一级耦合器  $C_1$  之后, 其输入-输出特性如图 6 的曲线 2 所示。在曲线 2 上不动点  $D$  的一个小领域内, 各点所对应的输出功率均小于曲线 1 上不动点  $E$  所对应的输入功率, 因而, 当耦合器  $C_1$  之后级联耦合长度为  $L_i = (\pi + 0.3)/2C$  的耦合器后, 在  $P_i < P_{iF}$  的范围内, 曲线被向下压; 又由于耦合器对远离不动点的非线性压缩更显著, 且  $D_1$  点对应的输出功率在曲线  $DF$  段内为极小值, 因而, 出现了曲线 4 所示的输入-输出特性。

那么特性曲线 3 为什么没有明显变差? 这是因为, 曲线 1 上不动点  $E$  所对应的小邻域内各点所对应的输出功率都大于不动点  $D$  所对应的输入功率。因而, 耦合器  $C_2$  后面级联耦合长度为  $L = (\pi + 0.3)/2C$  的耦合器  $C_1$  后, 其输入-输出特性的限幅输出将更为平面缓, 如图 3 曲线 2 所示, 但由于压缩不均匀, 其输出起伏变大了。

从理论上讲, 级联足够多的具有相同耦合长度的耦合器可以使限幅输出足够小, 但实际应用上, 人们总是希望用最少的级联获得最佳的输入-输出特性曲线。本文作者曾分析了耦合

Table 1. Fluctuation of output power of seven kinds of cascaded nonlinear couplers for  $1.25P_c \leq P_i \leq 1.76P_c$

coupling length	switch A	switch B	switch C	switch D	switch E	switch F	switch G
$2CL_1$	$\pi + 0.1$	$\pi + 0.1$	$\pi$	$\pi$	$\pi$	$2\pi$	$2\pi$
$2CL_2$	$\pi + 0.2$	$\pi + 0.1$	$\pi + 0.1$	$\pi + 0.1$	$\pi + 0.1$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.5$
$2CL_3$	$\pi + 0.3$	$\pi + 0.1$	$\pi + 0.1$	$\pi + 0.1$	$\pi + 0.1$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.5$
$2CL_4$	$\pi + 0.4$	$\pi + 0.3$	$\pi + 0.3$	$\pi + 0.3$	$\pi + 0.3$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$
$2CL_5$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$
$2CL_6$	$\pi + 0.6$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.5$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$
$2CL_7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$
$2CL_8$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$
$2CL_9$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$
$2CL_{10}$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi + 0.7$	$\pi$
$2CL_{11}$				$\pi + 0.7$	$\pi$		
output power	$1.15P_c$	$1.15P_c$	$1.15P_c$	$1.15P_c$	$1.05P_c$	$1.15P_c$	$1.05P_c$
fluctuation of limited power ( $1.25 \sim 1.76P_c$ )	$5 \times 10^{-6}P_c$	$3 \times 10^{-6}P_c$	$2 \times 10^{-7}P_c$	$1 \times 10^{-7}P_c$	$6 \times 10^{-7}P_c$	$1 \times 10^{-4}P_c$	$4 \times 10^{-4}P_c$

长度分别为  $L = (\pi + 0.7)/2C$  和  $L = \pi/2C$  的二十个串联着的耦合器的开关特性, 其输出起伏无法小于  $10^{-7}P_c$ , 为此, 本文提出了其它级联开关结构。由于不易用图形同时显示小的限幅起伏, 因而用下面表 1 的形式给出了几种多级串联的开关结构, 它们都具有极小起伏的开关特性。

图 7~ 图 9 显示了开关 A~ F 的输入-输出特性曲线的上升沿。显然, 多级串联的端单输入耦合器具有小的消光比和动态开关区, 尤其是当最后一级耦合器的耦合长度为  $L = \pi/2C$  时, 开关具有极小的动态开关区和极小的消光比( $< -90$  dB) 且无旁瓣。

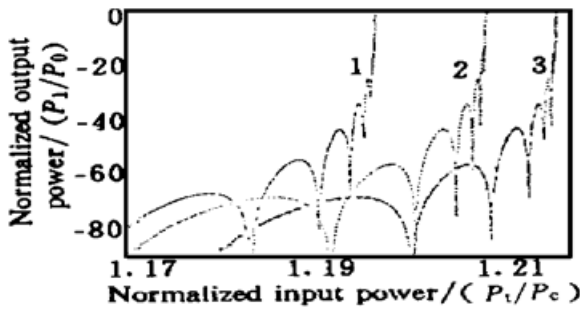


Fig. 7 The rising edge of switches A, B and C. curve 1: switch A, curve 2: switch B, and curve 3: switch C. The parameters of these switches are shown in Table 1

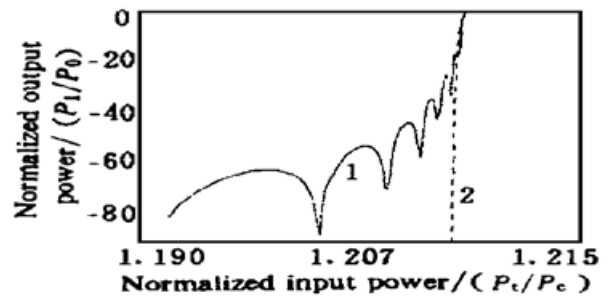


Fig. 8 The rising edge of switches F and G. curve 1: switch F and curve 2: switch G. The parameters of these switches are shown in Table 1

综合表 1 和图 7~ 图 9 可见, 级联耦合器既具有数字光开关和光限幅的特性又具有稳定光功率的特性。通过选择最后一个耦合器的耦合长度, 可满足本文对消光比和功率起伏的不同要求。

**结 论** 揭示了单端输入非线性耦合器的多级串接具有特殊的输入-输出特性, 可作为高质量的数字全光开关、全光限幅器和光功率稳定器。通过计算机模拟和分析, 给出了为完成上述功能耦合器的级联原则:

- 1) 耦合器耦合长度一般应在  $L = \pi/2C$  和  $L = (\pi + 0.7)/2C$  之间。
- 2) 级联的耦合器一般应按耦合长度由短到长的顺序排列。
- 3) 为减少消光比, 最后一个耦合器耦合长度应为  $L = \pi/2C$ 。

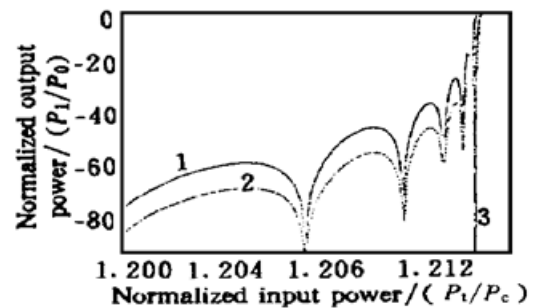


Fig. 9 The rising edge of switches C, D and E. curve 1: switch C, curve 2: switch D and curve 3: switch E. The parameters of these switches are shown in Table 1

参 考 文 献

[1] Jensen S M. The nonlinear coherent coupler. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-18**(10) : 1580~1583

[2] Pham A T, Binh L N. Nonlinear optical directional coupler-two input operation. *Int. J. Optoelectron.*, 1990, **5**(4) : 367~ 380

[3] Pham A T, Binh L N. All-optical modulation and switching using a nonlinear-optical directional coupler.

*J. Opt. Soc. Am (B)*, 1991, **8**(9) : 1914~ 1931

- [4] Chen Y, Snyder A W, Mitchell D J. Ideal optical switching by nonlinear multiple (parasitic) core couplers. *Electron. Lett.*, 1990, **1**(26) : 77~ 78
- [5] Chen Yijiang, Snyder A W, Payne D N. Twin core nonlinear couplers with gain and loss. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(1) : 239~ 245

## All-Optical Digital Switch and Optical Limiter

Wang Youfa

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135)

Wang Qi      Bao Jiashan

(Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 201800)

(Received 14 August 1997; revised 9 March 1998)

**Abstract** Nonlinear digital optical switch, optical limiter and optical power stabilizer are proposed and analyzed, which consist of a number of cascaded single-input excitation nonlinear dual-core couplers. These devices utilize the nonlinear restrain effect of the nonlinear coherent coupler on the input-power. As a example, four kinds of switch structures are discussed, numerical results show that the off/on extinction ratio can be less than -90 dB and the dynamic switching range can be less than  $0.03 P_c/100$ , and as an optical stabilizer, the fluctuation of the limiting power level can be less than  $10^{-7} P_c$ .

**Key words** nonlinear coupling, optical switch, optical limiter.