

文章编号: 0253-2239(2004)11-1473-4

复合型变耦合系数定向耦合器开关特性的研究

刘宪周 吴晋龙 刘刚军 李 劬 金国良

(上海交通大学物理系光学与光子学研究所, 上海 200240)

摘要: 研究了高斯-常数-高斯平滑连接的复合型变耦合系数定向耦合器的开关特性曲线。研究了耦合器各分段长度对开关曲线的影响。数值模拟发现, 耦合器各组成部分的参量对耦合器开关曲线尾部的振荡及开关功率的大小均有影响, 且呈现出一定的规律性。高斯型波导部分的相对长度以及直波导部分所占份额共同决定了耦合器开关曲线尾部的振荡大小, 且开关曲线的振荡与耦合函数的傅里叶变换的振荡密切相关。

关键词: 导波光学与光纤; 非线性定向耦合器; 变耦合系数; 开关功率; 傅里叶变换

中图分类号: TN252

文献标识码: A

Analysis of the Switching Characteristics of Complex Varying Coupling Coefficient Nonlinear Directional Coupler

Liu Xianzhou Wu Jinlong Liu Gangjun Li Qu Jin Guoliang

(*Institute of Optics and Photonics, Department of Physics,*

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

(Received 16 October 2003; revised 12 May 2004)

Abstract: The characteristics of the switching curves of Gaussian-Constant-Gaussian varying coupling coefficient nonlinear directional coupler (GCG NLDC) are analyzed in detail. The influences of the parameters of the coupler's subsections on the switching curves are studied. It is found by numerical simulation that the existence of sidelobes of the switching curves and the value of the switching powers are related to the parameters of all the subsections. The magnitude of sidelobes of the switching curves is decided by the relative length of bent coupler L/b and the quotient of conventional NLDC, the sidelobes of the switching curves have close relations with the oscillation of the Fourier transforms of the coupling functions.

Key words: guided wave and fiber optics; nonlinear directional coupler; varying coupling coefficient; switching power; Fourier transform

1 引 言

在非线形波导器件的研究领域内, 非线形定向耦合器(NLDC)被认为有广泛的应用前景, 因而颇受重视。非线形定向耦合器的主要特性是: 输入功率从临界点以下连续升至临界点以上时, 输出功率会在临界点处发生突然转换, 即功率透过率会从 0 升至 1(或从 1 降至 0)。

1982 年 Jensen 发表关于非线形定向耦合器的第一篇文章以后^[1], 目前已经有了针对平行双波导耦合

器、平行多波导耦合器^[2]、X 型和弧形双波导耦合器^[3~5]以及多个平行双波导耦合器级联^[6]的一些研究。这些耦合器的耦合函数的形式都是单一变化的, 对于耦合函数为分段函数的耦合器的研究目前尚为空白。本文将研究耦合函数为高斯-常数-高斯平滑连接的复合型变耦合系数定向耦合器(Gaussian-Constant-Gaussian NLDC, 简称为 GCG NLDC)的开关特性, 并分析了耦合器各组成部分对曲线的影响。

2 理 论

所研究的高斯-常数-高斯平滑连接的复合型变耦合系数定向耦合器结构如图 1 所示, 波导 1, 2 相

E-mail: lxzhero@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2003-10-16; 收到修改稿日期: 2004-05-12

同且关于 z 轴对称,其中两端长度分别为 $L/2$ 的部分为圆弧型波导,中间长度为 $2m$ 的部分为直波导,圆弧型波导同直波导平滑相接。波导 1,2 中光的传播可以由下列耦合模方程来描述^[7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial a_1}{\partial z} = iK(z)a_2 + iQ|a_1|^2 a_1, & (1) \\ \frac{\partial a_2}{\partial z} = iK(z)a_1 + iQ|a_2|^2 a_2, & (2) \end{cases}$$

其中 a_i 为第 i ($i = 1, 2$) 个波导中光波的归一化复振幅,即 $|a_i|^2 = P_i$, P_i 为在第 i 个波导中传播的光波的功率。 $K(z)$ 为两波导之间的耦合系数, Q 为非线性相位调制系数。方程(1),(2)右边的第二项表示仅考虑自相位调制。由于相邻波导间导模场的交叠很小,互相相位调制的作用远小于自相位调制的作用,因此方程中略去了互相相位调制项。

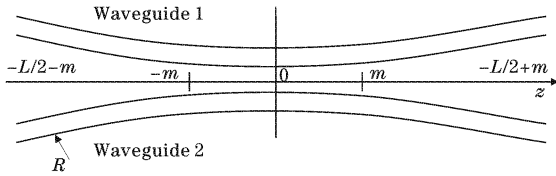


Fig. 1 Schematic of a GCG NLDC

可以证明对图 1 所示的弧形耦合器, $K(z)$ 可表示为^[7]

$$K(z) = \begin{cases} K_{\max} \exp\left[-\frac{(z+m)^2}{b^2}\right], & z < -m \\ K_{\max}, & |z| \leq m \\ K_{\max} \exp\left[-\frac{(z-m)^2}{b^2}\right], & z > m \end{cases} \quad (3)$$

K_{\max} 由波导折射率分布及波导的间距决定, b 与 R 成正比,其定量关系与波导的实际参量有关。

在设计耦合器时, K_{\max} 、 b 与圆弧型波导总长度 L 、直波导长度 $2m$ 应满足一定的关系。线性情况下,方程(1),(2)退化为线性方程组。此方程组有解析解。定向耦合器作为光开关时,通常光由两波导之一输入。不失一般性,设

$$a_1(-L/2 - m) = \sqrt{P}, \quad a_2(-L/2 - m) = 0.$$

在此初始条件下方程的解为

$$a_1(z) = \sqrt{P} \cos\left[\int K(z) dz\right], \quad (4)$$

$$a_2(z) = i\sqrt{P} \sin\left[\int K(z) dz\right], \quad (5)$$

由(4)式、(5)式可知,若光从波导 1 入射,则当 $\int_{-L/2-m}^{L/2+m} 2K(z) dz = n\pi$ (n 为自然数) 时光功率将全部由波导 1 输出(n 为偶数) 或全部由波导 2 输出(n 为

奇数)。由此可见, $\int_{-L/2-m}^{L/2+m} 2K(z) dz = n\pi$ 即为整数个耦合长度所需要满足的条件。将(3)式代入进行积分可以得到

$$2\sqrt{\pi}bK_{\max} \operatorname{erf}\left(\frac{L}{2b}\right) + 4K_{\max}m = n\pi, \quad (6)$$

其中 $n = 1$ 时为单耦合长度耦合器, $n > 1$ 时为多耦合长度耦合器。

由(6)式可以看出, b 、 K_{\max} 、 L 、 m 间需满足一定的关系才能保证整数耦合长度的条件。对纯直波导定向耦合器,其单耦合长度为 $L_c = \pi/(2K_{\max})$ 。为了使后面的模拟结果曲线图更加直观,对耦合器中间直波导部分的长度 $2m$ 用 L_c 进行归一化,即 $s = 2m/L_c$ 。对纯直波导耦合器, $L = 0$,则由(6)式可知 $s = n$,一般情况下 $s < n$ 。

关于弧形波导部分的总长度 L 需做如下说明。由(6)式可知,对纯高斯型耦合器,整数耦合长度条件应为

$$2\sqrt{\pi}bK_{\max} \operatorname{erf}\left(\frac{L}{2b}\right) = n\pi, \quad (7)$$

理想的高斯型耦合器的长度 L 应为无限大,其两端的耦合系数趋于 0,此时 $\operatorname{erf}\left(\frac{L}{2b}\right) = 1$, (7) 式变为 $2\sqrt{\pi}bK_{\max} = n\pi$, 但实际耦合器长度是有限的,根据文献[7]中报道的研究结果,当取 $L = 6b$ 时所得开关曲线尾部已消除振荡,与理想的无限长耦合器的差别很小,而 $L \leq 2b$ 时则与理想情况差别明显,开关曲线尾部有明显振荡现象。故对高斯型耦合器均取 $L = 6b$,除非需要专门考察 L 对耦合器开关曲线特性的影响的情况。

非线性定向耦合器用于全光开关时,通常都取 $n = 1$,即单耦合长度。故下面的数值模拟中均取 $n = 1$ 。

3 数值模拟结果

本节将给出单耦合长度($n = 1$) 复合型变耦合系数定向耦合器在不同参量下的开关特性曲线,分析耦合器各组成部分(即直波导部分和弧形波导部分)对曲线的影响。这里所说的开关特性曲线是指波导 1 的透射率随波导 1 入射功率变化的曲线。若定义功率透过率为 50% 时的入射功率为开关功率 P_s ,则非线性定向耦合器的开关功率为 $P_s = P_c = 4K_{\max}/Q$ (P_c 为临界功率),而纯高斯型耦合器的开关功率约为 $0.7P_c$ ^[4]。以下所有曲线图中功率标度

均对 P_c 归一化, 曲线图中“Gaussian”表示为纯高斯型定向耦合器的曲线, “NLDC”表示为纯直波导型定向耦合器的曲线。

图 2(a)和图 2(b)为耦合器透过率同两端弧形波导总长度 L 的关系曲线(对于中间的直波导部分, 取 $s=0.5$)。由图 2(a)可知, 当直波导长度固定

(此处取为 $s=0.5$)时, 随着 L 的增大, 曲线尾部的振荡虽然不能消除, 但却逐渐减小至某一稳定的振荡状态; 而且当 $L > 6b$ 时, 曲线形状已不再变化, 基本趋于稳定, 所以对于所讨论的耦合器一般取 $L=6b$ 已足够。下面的计算均取 $L=6b$ 。

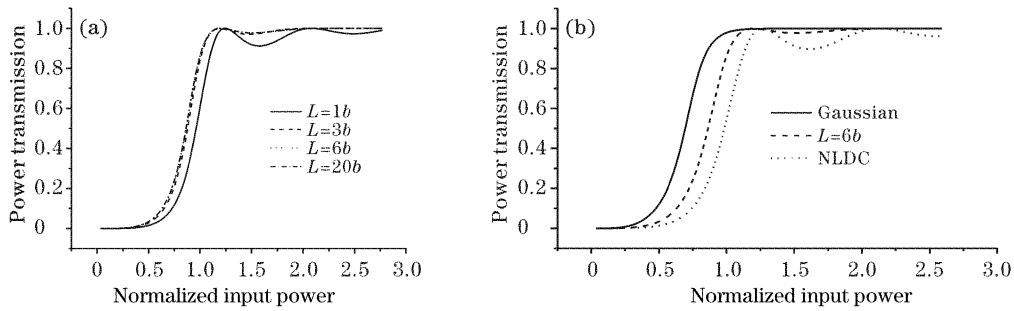


Fig. 2 (a) Transmission curves of one coupling length GCG NLDC with different values of L , (b) transmission curves of one coupling length GCG NLDC with different values of L

由图 2(b)可知, 在 $s=0.5$ 时, 复合型变耦合系数定向耦合器的开关曲线介于纯直波导型定向耦合器的开关曲线和纯高斯型定向耦合器的开关曲线之间, 它的尾部仍有振荡, 但幅度较纯直波导型非线性定向耦合器的要小。可以预期, 复合型变耦合系数定向耦合器的特性受到高斯型部分和直波导部分的双重影响, 开关功率 P_s 随直波导所占份额的增加而增加。文献[8]曾对非线性定向耦合器开关曲线尾部的振荡进行过分析, 认为它与耦合函数 $K(z)$ 的傅里叶变换密切相关, 并对耦合函数分别为纯常数型, 纯高斯型, 纯指数型等的耦合器进行了验证。因此, 也可预期所讨论的复合型变耦合系数定向耦合器开关曲线尾部的振荡幅度也与 $K(z)$ 的傅里叶变换密切相关。取 $L=6b$ 时不同的曲线做比较。

由图 3 可见, 开关曲线尾部的振荡幅度随着 s 的增大而增大。当 $s=0.1$ 时, 曲线尾部(过开关区)无振荡, 但当 $s \geq 0.5$ 时, 曲线则出现明显的振荡现象。

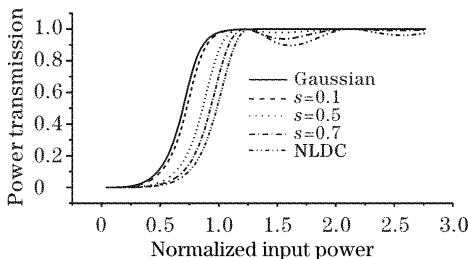


Fig. 3 Transmission curves of one coupling length GCG NLDC with different values of s

图 4 给出了直波导部分所占份额不同时 $K(z)$

的傅里叶变换曲线 $\int_{-\infty}^{+\infty} K(z) \exp(-iPz) dz$ 。不难看出, 图 3 所示曲线的振荡情况同图 4 所示曲线的振荡情况相对应, 即复合型变耦合系数定向耦合器开关曲线尾部的振荡同 $K(z)$ 的傅里叶变换具有密切的联系。数值模拟表明, 对 GCG NLDC, 文献[8]的结论依然成立。

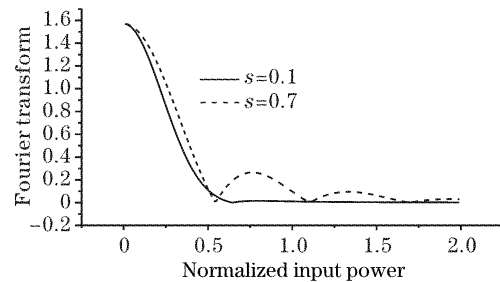


Fig. 4 Fourier transform of $K(z)$

由图 3 还可以看出, 随着 s 的增大, 即随着直波导部分所占份额的增大, 最终的曲线形状逐渐靠近常数型定向耦合器的曲线, 而且当 s 接近于 1 时, 这种靠近的速度逐渐减小。为了更好地研究曲线随 s 的变化情况, 选择具有代表性的开关功率 P_s 来分析。

图 5 为开关功率 P_s 与直波导部分(用 s 表示)的关系曲线。由图 5 可知, 直波导部分和弧形波导部分对所研究的复合型变耦合系数定向耦合器的开关功率均有影响。随着直波导部分所占份额的增大, 开关功率由纯高斯型变耦合系数定向耦合器的开关功率逐渐趋向于纯直波导型定向耦合器的开关

功率,但靠近的速率并非是恒定的,在 $0 \leq s \leq 0.75$ 的范围内,开关功率与 s 的关系是线性的,但当 $s > 0.75$ 时,开关功率的变化趋缓,直至饱和。

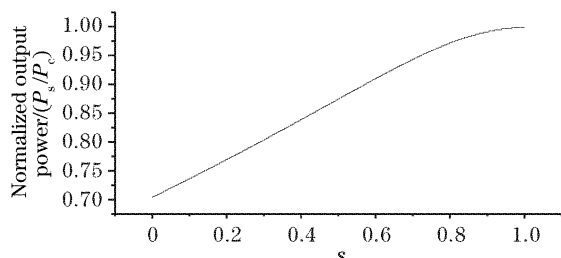


Fig. 5 Normalized switching power as a function of s

结论 通过分析数值模拟结果发现,对于所讨论的复合型变耦合系数定向耦合器来说,曲线形状受到弧形波导部分和直波导部分的双重影响。弧形波导部分的相对长度 L/b 以及直波导部分所占份额 s 共同决定了耦合器开关曲线尾部的振荡大小,开关曲线的振荡与 $K(z)$ 的傅里叶变换的振荡密切相关。耦合器的开关功率 P_s 随着 s 的增加或者减小逐渐靠近或远离纯直波导型耦合器的开关功率值 P_c ,其变化速率 v 对 $s \leq 0.75$ 时为常数,但对 $s > 0.75$ 时则渐趋于零。

参 考 文 献

- 1 Jensen S M. The nonlinear coherent coupler. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1580~1583
- 2 Finlayson N, Stegeman G I. Spatial switching, instabilities and chaos in a three-waveguide nonlinear directional coupler. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(23): 2276~2278
- 3 Sabini J P, Finlayson N, Stegeman G I. All-optical switching in nonlinear X junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(12): 1176~1178
- 4 Leutheuser V, Langbein U, Lederer F. Optical response of a nonlinear bent directional coupler. *Opt. Commun.*, 1990, **75**(3,4): 251~255
- 5 Liu Jun, Jin Guoliang, Ying Zaisheng *et al.*. Study of arc-type all-optical waveguide switch based on self-focusing substrate. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(7): 957~961 (in Chinese)
- 6 Wang Youfa, Wang Qi, Bao Jiashan. All-optical digital switch and optical limiter. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(5): 703~708 (in Chinese)
- 7 Liu G J, Liang B M, Li Q *et al.*. Multiple coupling length nonlinear directional couplers with variable coupling coefficient. *Opt. Commun.*, 2003, **218**(1): 113~117
- 8 Hamid Hatami-Hanza, Chu P L. Shaping the switching characteristics of nonlinear directional couplers. *Opt Commun.*, 1995, **119**(3,4): 347~351