

文章编号: 0253-2239(2005)01-11-4

变耦合系数非线性三波导定向耦合器特性研究

吴晋龙 李 劼 金国良 刘宪周 刘刚军

(上海交通大学物理系光学与光子学研究所, 上海 200240)

摘要: 报道了对高斯型及指数型变耦合系数三波导耦合器的一些重要的全光开关特性进行的研究。利用四阶龙格-库塔方法对指数型和高斯型两类变耦合系数三波导耦合器进行了数值计算。数值计算结果表明:对于变耦合系数三波导耦合器而言,功率可在波导 1 与波导 3 之间 100% 转换,而波导 2 则不可能达到 100% 的功率输出。与双波导变耦合系数耦合器相比,在相同的最大耦合系数情况下三波导变耦合系数耦合器开关曲线要更陡一些,即具有更好的开关特性。与平行三波导耦合器相比,变耦合系数三波导耦合器作为光开关的最大优点在于开关曲线中不存在振荡。

关键词: 导波与光纤光学; 三波导耦合器; 变耦合系数; 全光开关

中图分类号: TN252 文献标识码: A

Switching Characteristics of Three-Core Nonlinear Directional Couplers with Variable Coupling Coefficient

Wu Jinlong Li Qu Jin Guoliang Liu Xianzhou Liu Gangjun

(Institute of Optics and Photonics, Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

Abstract: The all-optical switching characteristics of three-core nonlinear directional waveguide couplers (NLDCs) with Gaussian type and exponential type variable coupling coefficient (VCC) are presented. Their transmission features are investigated numerically. It is shown that, for the three-core VCC NLDCs, the power can switch completely between guide 1 and guide 3; however 100% power output cannot be achieved for guide 2. The switching curves of three-core NLDCs with VCC are sharper than those of their two-core counterparts with same maximum coupling coefficient. It is also shown that the sidelobes in the post-switching region, which exist in the parallel nonlinear directional couplers, can be suppressed with three-core NLDC with VCC.

Key words: guided wave and fiber optics; three-core coupler; variable coupling coefficient (VCC); all-optical switching

1 引 言

在非线性波导器件的研究领域内,非线性定向耦合器(NLDC)被认为有广泛的应用前景,因而颇受重视。非线性定向耦合器的非线性响应特性非常适合制作全光开关。自从 1982 年 Jensen^[1]发表关于非线性定向耦合器的第一篇文章以来,不同形式的非线性波导耦合器件引起了大家的兴趣。目前已经有了针对平行双波导耦合器^[1],平行多波导耦合器^[2],X 型和弧形双波导耦合器的一些研究^[39]。

本文报道了对 X 型和弧形三波导耦合器非线性

耦合特性的一些研究,表明它们与 X 型、弧形双波导耦合器,平行三波导耦合器具有不同的开关特性。

2 理 论

本文所研究的 X 形三波导耦合器结构如图 1 所示,将波导 1,3 换成弧形波导则成为弧形三波导耦合器。

这两种非线性波导耦合器可由下列耦合模方程^[1]来描述:

$$\partial a_1 / \partial z = iK(z)a_2 + iQ|a_1|^2 a_1, \quad (1)$$

作者简介: 吴晋龙(1977~),男,山西太原人,硕士研究生,主要从事非线性导波光学研究。E-mail: ujinlog@hotmail.com。

收稿日期: 2003-12-26; 收到修改稿日期: 2004-05-13

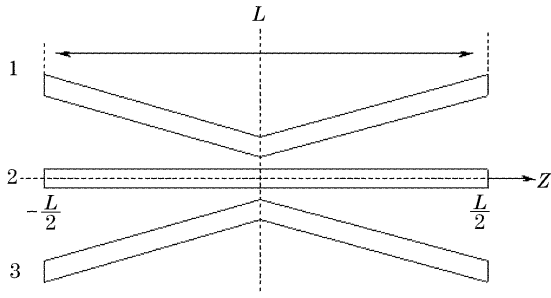


图 1 X形三波导定向耦合器示意图

Fig. 1 Schematic of an X-shaped three-core NLDC

$$\partial a_2 / \partial z = iK(z)(a_1 + a_3) + iQ|a_2|^2 a_2, \quad (2)$$

$$\partial a_3 / \partial z = iK(z)a_2 + iQ|a_3|^2 a_3, \quad (3)$$

其中 a_i 为第 i 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。 $K_{12}(z)$ 、 $K_{23}(z)$ 分别为波导 1,2 之间及波导 2,3 之间的线性耦合系数, 因波导 1,3 对于波导 2 对称, 所以有 $K(z) = K_{12}(z) = K_{23}(z)$ 。波导 1 与 3 之间的直接耦合可以忽略。方程(1)~(3)中右边最后一项为自相位调制项。由于相邻波导间导模场的交叠很小, 交叉相位调制的作用远小于自相位调制的作用, 因此方程中略去了交叉相位调制项。在导出方程(1)~(3)的过程中我们还作了一个近似, 即假定波导 1,2,3 中导模的传播常量相同。耦合方程(1)~(3)的合理性已由光束传播法(BPM)通过数值模拟验证^[9]。

可以证明对图 1 所示的 X 形耦合器, 其 $K(z)$ 可表示为指数形式^[7]:

$$K(z) = K_{\max} \exp(-|z|/b). \quad (4a)$$

而对弧形耦合器, 其 $K(z)$ 可表示为高斯函数形式^[7]:

$$K(z) = K_{\max} \exp(-z^2/b^2), \quad (4b)$$

所以又把 X 形三波导耦合器称为指数型变耦合系数三波导耦合器, 把弧形三波导耦合器称为高斯型变耦合系数三波导耦合器。

在(4a)式, (4b)式中 K_{\max} 是图 1 所示耦合器中心处($z=0$, 即波导距离最小处)的耦合系数。 b 则为耦合系数降为最大值之 $1/e$ 处的 z 值。 K_{\max} 由波导折射率分布及波导的间距决定。

在设计耦合器时, K_{\max} 、 b 与耦合器长度 L 应满足一定的关系, 下面以高斯型波导耦合器为例进行具体的分析。线性情况下, $Q = 0$, 则方程组(1)~(3)退化为线性方程组。

设初始条件为

$$a_1(-L/2) = \sqrt{P},$$

$$a_2(-L/2) = a_3(-L/2) = 0,$$

并令 $\int_{-L/2}^z \sqrt{2}K(z)dz = \phi(z)$, 该线性方程组的解为

$$a_1(z) = \frac{\sqrt{P}}{2} [\cos \phi(z) + 1], \quad (5)$$

$$a_2(z) = i \frac{\sqrt{P}}{2} \sin \phi(z), \quad (6)$$

$$a_3(z) = \frac{\sqrt{P}}{2} [\cos \phi(z) - 1], \quad (7)$$

下式成立时, 得到整数耦合长度条件, 其中 n 为正整数:

$$\phi\left(\frac{L}{2}\right) = \int_{-L/2}^{L/2} \sqrt{2}K_{\max} \exp\left(-\frac{z^2}{b^2}\right) dz = n\pi, \quad (8)$$

显然在上式成立并且 n 为奇数时, 从波导 1 入射的光波完全从波导 3 出射。

当 $L \gg b$ 时, $K(+L/2)$ 和 $K(-L/2)$ 均趋向于零, 耦合器两端充分退耦合。上式可简化为

$$K_{\max} b = n\sqrt{\pi}/\sqrt{2}, \quad (9)$$

当 $n = 1$ 时, 得到所谓单耦合长度器件, 此时(9)式可写为

$$b = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}K_{\max}}, \quad (10)$$

对 X 形耦合器有类似的关系, 只是单耦合长度条件为

$$b = \frac{\pi}{2\sqrt{2}K_{\max}}, \quad (11)$$

通常对于高斯型波导耦合系数取 $L = 6b$, 对于指数型波导耦合系数取 $L = 12b$ 即可满足退耦合条件^[7]。

3 非线性响应的数值模拟结果

本节给出指数型及高斯型变耦合系数三波导耦合器开关特性曲线, 并与两波导情况和平行情况下的开关曲线进行比较。以下所有曲线图中功率标度均对 $P_c = 4K_{\max}/Q$ 归一化。

图 2(a), 图 2(b) 分别为数值模拟得出的单耦合长度指数型和高斯型三波导耦合器透过率曲线即开关曲线图。由图 2 可见对于指数型和高斯型三波导耦合器功率均可在波导 1 和 3 之间完全转换, 而波导 2 则不可能出现 100% 的功率输出。

下面对相同 K_{\max} 的变耦合系数三波导耦合器与双波导耦合器进行一下比较。结果如图 3 所示。由图 3 中可以看出三波导耦合器的透过率曲线比相

应双波导耦合器的曲线要更陡一些,但开关功率要高一些。

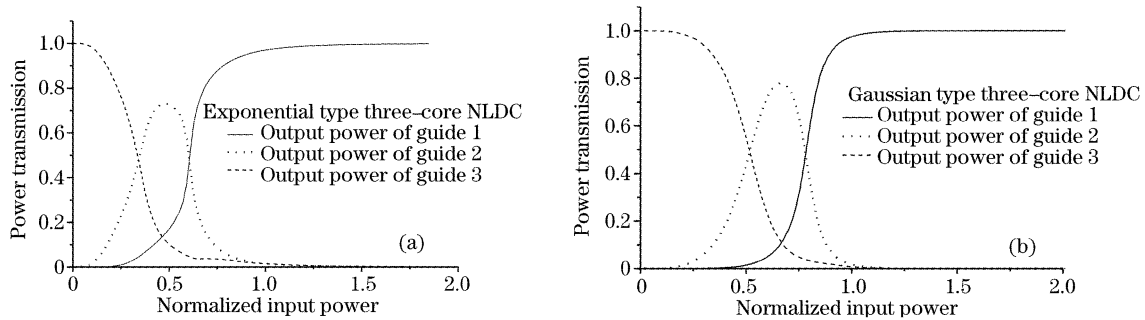


图 2 (a) 单耦合长度三波导非线性耦合器的透射特性。(a) 指数型, (b) 高斯型

Fig. 2 Transmission characteristics of one coupling length three-core NLDC. (a) Exponential type, (b) Gaussian type

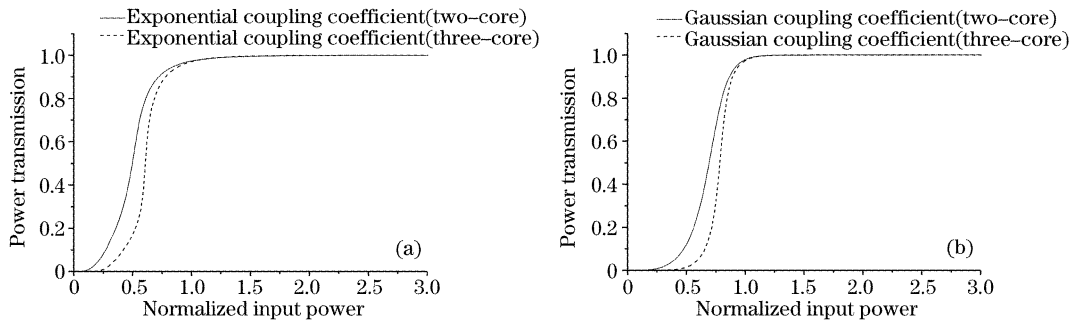


图 3 具有相同 K_{\max} 的双波导与三波导非线性耦合器透射特性的比较。(a) 指数型, (b) 高斯型

Fig. 3 The comparison of the transmission characteristics of two-core and three-core NLDC with same K_{\max} .

(a) Exponential type, (b) Gaussian type

下面再对指数型、高斯型和常量型(平行)三波导耦合器的开关曲线进行一下比较,其耦合系数分别为

$$K(z) = K_{\text{Emax}} \exp(-|z|/b),$$

$$K(z) = K_{\text{Gmax}} \exp(-z^2/b^2),$$

$$K(z) = K_{\text{const}}.$$

取 $K_{\text{Emax}} = K_{\text{Gmax}} = K_{\text{const}}$ 并对单耦合长度三种耦合器的开关曲线进行比较,结果如图 4 所示。

由图 4 中曲线可以看出指数型三波导耦合器开关功率最低,高斯型其次,常量型三波导耦合器开关功率最高。当然开关功率的降低是以增加波导长度为代价的。以高斯三波导耦合器为例,单耦合长度

高斯型三波导耦合器的长度为 $L = 6b = \frac{6\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}K_{\max}}$ 。而

平行三波导耦合器的长度为 $L = \frac{\pi}{\sqrt{2}K_{\text{const}}}$ [2]。而且

指数型和高斯型三波导耦合器可以消除平行三波导耦合器开关曲线尾部的振荡。功率开关曲线尾部振荡的消除是两端退耦合的渐变耦合系数耦合器所具有的优点。参考文献[8]曾对双波导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 $K(z)$

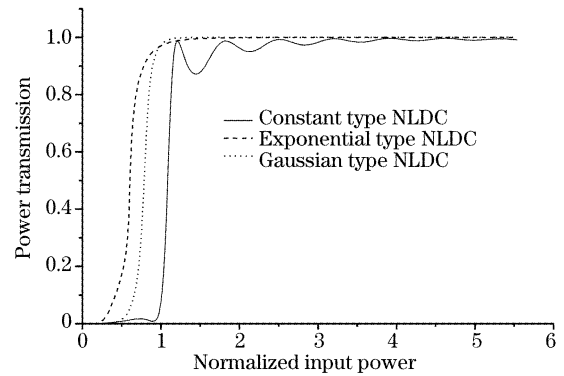


图 4 $K_{\text{Emax}} = K_{\text{Gmax}} = K_{\text{const}}$ 三种非线性耦合器(常量,指数和高斯型)的传输特性

Fig. 4 Transmission characteristics of three type NLDC (Constant; Exponential; Gaussian) with $K_{\text{Emax}} = K_{\text{Gmax}} = K_{\text{const}}$

的傅里叶变换密切相关,并对耦合函数分别为纯常量型、纯高斯型和纯指数型等的耦合器进行了验证。本文结果进一步验证了此结果在三波导耦合器情况下也适用。如果在设计高斯型耦合器时不取 $L/b = 6$, 而取 $L/b = a (a < 6)$, 则随着 a 的减小,开关功率会逐渐增加。而当 $a < 3$ 时开关曲线的尾部也会出现越来越强的振荡。这是因为当 a 值减小时,耦合

器两端的退耦合条件已不再能保证。

4 结 论

变耦合系数三波导耦合器可以用变耦合系数的耦合模方程来描述。对单耦合长度的指数形和高斯形三波导耦合器而言,功率可在波导 1 与波导 3 之间 100 % 转换,而波导 2 则不可能达到 100 % 的功率输出。与双波导变耦合系数耦合器相比,在相同的 K_{\max} 情况下三波导变耦合系数耦合器开关曲线要更陡一些,即具有更好的开关特性。与平行三波导耦合器相比,变耦合系数三波导耦合器作为光开关的最大优点在于开关曲线中不存在振荡,从而可以大大减小串话。

参 考 文 献

- 1 Stephen M. Jensen. The nonlinear coherent coupler[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1580~1583
- 2 N. Finlayson, G. I. Stegeman. Spatial switching, instabilities and chaos in a three-waveguide nonlinear directional coupler[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(23): 2276~2278
- 3 Gang J. Liu, Bin M. Liang, Guo L. Jin *et al.*. Arc-shaped waveguide switch based on the third-order nonlinear effect[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(24): 5022~5024
- 4 Jin Guoliang, Cao Junfeng, Cao Zhuangqi *et al.*. Optimizing design of all-optical switches[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(9): 1332~1336 (in Chinese)
金国良,曹俊峰,曹庄琪等. X型波导全光开关的优化设计[J]. *光学学报*, 1996, **16**(9): 1332~1336
- 5 Liu Jun, Jin Guoliang, Ying Zaisheng *et al.*. Study of acr-type all-optical waveguide switch based on self-focusing substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 957~961 (in Chinese)
刘 军,金国良,应再生等. 自聚焦材料弧形全光开关的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(7): 957~961
- 6 Jin Guoliang, T. Mlzumoto, G. S. Pu *et al.*. All-optical switching in intersecting waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(11): 1590~1593 (in Chinese)
金国良,木本哲弥,蒲国胜等. 交叉波导中的非线性全光开关[J]. *光学学报*, 1996, **16**(11): 1590~1593
- 7 Gang J. Liu, Bin M. Liang, Qu Li *et al.*. Multiple coupling length nonlinear directional couplers with variable coupling coefficient[J]. *Opt Commun.*, 2003, **218**(1): 113~117
- 8 Hamid hatami-Hanza, P. L. Chu. Haping the switching characteristics of nonlinear directional couplers [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **119**: 347~351
- 9 Gang J. Liu, Bin M. Liang, Qu Li *et al.*. Variable coupling coefficient nonlinear direction couplers with self-focusing and self-defocusing nonlinearity[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**: 4315~4319