

文章编号: 0253-2239(2004)10-1320-4

一种新型全光开关

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: 提出了一种用指数型变耦合系数定向耦合器同高斯型变耦合系数定向耦合器级联所构成的新型全光开关。理论分析及数值模拟均表明,它同用常系数定向耦合器级联所得的器件相比,具有一个很大的优点,即可以消除开关曲线在过开关区中的振荡,因而具有更好的开关特性;同时,它同用高斯型变耦合系数定向耦合器级联所得的器件相比,具有陡峭的动态开关区(即功率透过率从 0 逐渐升至 1 的区域)。综上所述,该级联耦合器更加适合于做全光开关,且在满足一定的开关曲线的要求下,可以通过改变各级联耦合器的参量以改变单元耦合器的数目。

关键词: 导波光学; 变耦合系数; 级联耦合器; 光开关

中图分类号: TN252 文献标识码: A

A Novel All-Optical Switch

Liu Xianzhou Wu Jinlong Liu Gangjun Li Qu Jin Guoliang

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

(Received 22 September 2003; revised 12 December 2003)

Abstract: A novel all-optical switch composed of cascaded Gaussian nonlinear directional couplers (NLDCs) and Exponential NLDCs is proposed. It is found by theoretical analysis and numerical simulation that the proposed switch possesses better switching characteristics since the proposed switch can suppress the sidelobes of the switching curves compared with conventional cascaded NLDCs and has steeper dynamic switching region where the power transmission increases from 0 to 1 than that of cascaded Gaussian NLDCs. The proposed switch is more suitable for all-optical switch than conventional cascaded NLDCs and cascaded Gaussian NLDCs. The parameters of cascaded couplers can also be adjusted to change the number of unit couplers to satisfy the certain requirements of the switching curve.

Key words: guided-wave optics; variable coupling coefficient; cascaded couplers; optical switch

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)。

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

合器件引起了人们的兴趣。目前已经有了针对平行双波导耦合器(即传统的非线性定向耦合器)、平行多波导耦合器^[2]、高斯型和指数型变耦合系数双波导耦合器^[3~7]的相关研究。

1999 年,王又法等^[8]发表了“全光数字开关和光限幅器”一文,用级联常系数定向耦合器作为全光开关。文中分析了级联常系数定向耦合器的开关特性。相对于单个耦合器的开关特性来说,多个耦合器的级联可改善开关特性。

本文报道了利用指数型和高斯型变耦合系数耦合器级联构成的新型全光开关。理论分析和数值模拟均表明它与用常系数定向耦合器级联所得的器件相比具有更好的开关特性。

E-mail: lxzhero@sjtu.edu.cn

收稿日期:2003-09-22;收到修改稿日期:2003-12-22

2 相关理论

本文所研究的单个高斯型耦合器和单个指数型耦合器结构分别如图 1、图 2 所示。

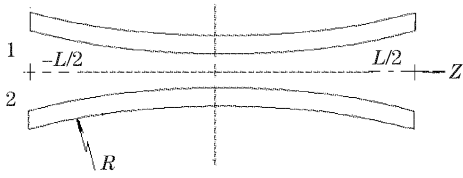


Fig. 1 A schematic of the Gaussian NLDC device

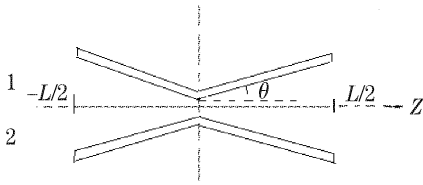


Fig. 2 A schematic of the exponential NLDC device

如图 1、图 2 所示,波导 1、2 均为相同参量的波导且关于 z 轴对称。波导 1、2 中光的传播可以由下列耦合模方程来描述^[4]:

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

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

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。 $K(z)$ 为两波导之间的耦合系数, $Q = k_0 n_2 / A_{\text{eff}}$, 其中 k_0 为真空中的波矢, n_2 为非线性折射率系数, A_{eff} 为波导有效截面积。(1) 式、(2) 式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迭很小,互相位调制的作用远小于自相位调制的作用,因此式中略去了互相位调制项。

可以证明对图 1 所示的弧形耦合器,其 $K(z)$ 可表示为如下形式^[4]:

$$K(z) = K_0 \exp\left(-\frac{z^2}{b^2}\right), \quad (3)$$

所以弧形耦合器又称为高斯型变耦合系数耦合器。

在(3)式中 K_0 是圆弧型耦合器的最大耦合系数,由波导折射率分布及波导的间距决定, b 与弧形波导半径 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_0 、 b 与圆弧型波导总长度 L 应满足一定的关系,下面进行具体的分析。低功率情况下,(1) 式、(2) 式退化为如下线性方程:

$$\partial a_1 / \partial z = iK(z)a_2, \quad (4)$$

$$\partial a_2 / \partial z = iK(z)a_1, \quad (5)$$

此方程组具有解析解:

$$a_1(z) = A_1 \exp\left[i \int K(z) dz\right] + A_2 \exp\left[i \int -K(z) dz\right], \quad (6)$$

$$a_2(z) = A_1 \exp\left[i \int K(z) dz\right] - A_2 \exp\left[i \int -K(z) dz\right], \quad (7)$$

(6) 式、(7) 式中的 A_1 、 A_2 是同初始条件有关的常数。如果初始条件为 $a_1(-L/2) = \sqrt{\alpha P}$, $a_2(-L/2) = \sqrt{(1-\alpha)P}$, 其中 $P = P_1 + P_2$ 。则(6) 式、(7) 式可表示为

$$a_1(z) = \sqrt{P} \left\{ \sqrt{\alpha} \cos\left[\int K(z) dz\right] + i \sqrt{1-\alpha} \sin\left[\int K(z) dz\right] \right\}, \quad (6')$$

$$a_2(z) = \sqrt{P} \left\{ \sqrt{1-\alpha} \cos\left[\int K(z) dz\right] + i \sqrt{\alpha} \sin\left[\int K(z) dz\right] \right\}. \quad (7')$$

由(6')式、(7')式可知,若光从波导 1 入射,即 $\alpha = 1$, 也就是 $a_1(-L/2) = \sqrt{P}$, $a_2(-L/2) = 0$, 则当

$\int_{-L/2}^{L/2} 2K(z) dz = n\pi$ (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, $\int_{-L/2}^{L/2} 2K(z) dz = n\pi$ 即为整数个耦合长度所需要满足的条件。将(4) 式代入积分可以得到

$$2\sqrt{\pi}bK_0 \operatorname{erf}(L/2b) = n\pi, \quad (8)$$

由(8) 式可以看出, b 、 K_0 、 L 间需满足一定的关系才

能保证整数耦合长度的条件。为了消除开关特性曲线的尾部振荡,需要耦合器两端保证退耦合^[4], 即 $K(\pm L/2) \ll K(0) = K_0$ 。数值模拟表明取 $L = 6b$ 便足以保证退耦合条件^[4], 从而(8) 式可以化为

$$b = n\sqrt{\pi}/(2K_0), \quad (9)$$

其中 $n = 1$ 对应于单耦合长度耦合器, $n > 1$ 则对应于多耦合长度耦合器,相应地,耦合器几何长度 $L = 6b = 3n\sqrt{\pi}/K_0$ 。

同理,对图 2 所示的 X 型耦合器,其 $K(z)$ 可表示为^[4]

$$K(z) = K_0 \exp(-|z|/b), \quad (10)$$

所以 X 型耦合器又称为指数型变耦合系数耦合器。在(10)式中 K_0 是耦合器的最大耦合系数,由波导折射率分布及波导间距决定, b 则与 θ 有关。类似于弧形耦合器,对 X 型耦合器,其整数耦合长度所满足的条件为

$$\int_{-L/2}^{L/2} 2K(z)dz = -4K_0 b \exp\left(-\frac{L}{2b}\right) + 4K_0 b = n\pi, \quad (11)$$

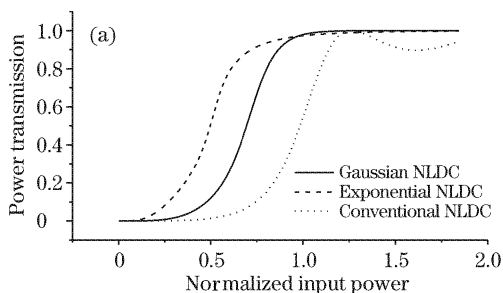
取 $L = 12b$ 即可证得退耦合条件^[4], 这时 $\exp\left(-\frac{L}{2b}\right) \approx 0$, (11) 式可化为

$$b = n\pi/4K_0, \quad (12)$$

n 为正整数。 $n = 1$ 对应于单耦合长度耦合器, $n > 1$ 则对应于多耦合长度耦合器,相应地,耦合器几何长度 $L = 12b = 3n\pi/K_0$ 。

3 数值模拟结果

本节中先给出单个波导耦合器的开关特性曲



线,然后在此基础上讨论级联耦合器的开关特性曲线及其优化,并将级联的变耦合系数耦合器与级联的常系数定向耦合器进行比较。在所有特性曲线中功率标度均对临界功率 $P_c = 4K_0/Q$ 归一化。

图 3(a)和图 3(b)显示了非级联耦合器的归一化输入-输出特性曲线。从图中可以看出,单耦合长度或多耦合长度情况下,常系数定向耦合器特性曲线的尾部均具有不可消除的振荡,这对于全光开关来说是很不利的,而高斯型及指数型变耦合系数定向耦合器特性曲线表明,它们消除了尾部的振荡,过开关区域非常平稳;同时,在多耦合长度下,高斯型和指数型变耦合系数定向耦合器的曲线均越来越具有数字化开关的特点,但不同的是,高斯型变耦合系数定向耦合器的两次开关的功率间隔基本相同,而指数型变耦合系数定向耦合器的两次开关的功率间隔随着功率的增大而逐渐增大。如果用高斯型或指数型变耦合系数定向耦合器代替常系数定向耦合器进行级联,所得器件将具有更好的开关特性。

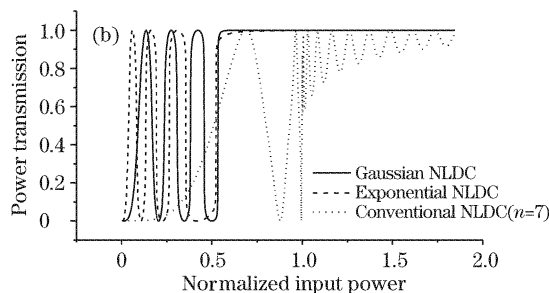


Fig. 3 (a) Transmission curves of different devices with one coupling length, (b) transmission curves of different devices with seven coupling lengths

图 4 给出了由常系数定向耦合器多级串联^[5]而成的四种开关的归一化输入-输出特性曲线。曲线 A、B、C 和 D 分别为对应于由 2 个、3 个、5 个和 10 个相同单耦合长度常系数耦合器的级联。从图 4 可以看出,特性曲线的动态开关区域陡峭,但曲线尾部存在振荡。这种多级串连的常系数定向耦合器若用

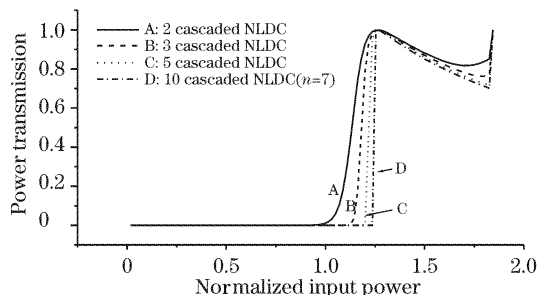


Fig. 4 Transmission curves of four kinds of cascaded conventional NLDC with one coupling length

作全光开关,则不可避免地引入串扰。本文提出的变耦合系数耦合器正可克服这一缺点。

图 5 给出了由高斯型变耦合系数定向耦合器多级串联而成的四种开关的归一化输入-输出特性曲线。可以看出,特性曲线的动态开关区域陡峭,曲线

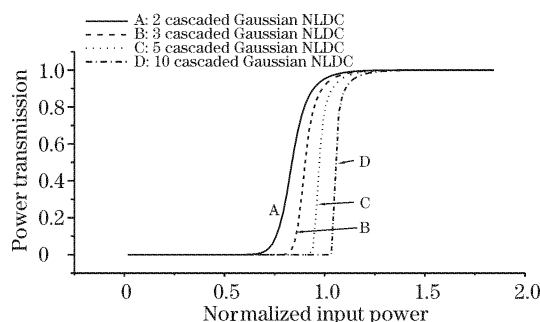


Fig. 5 Transmission curves of four kinds of cascaded Gaussian NLDC with one coupling length

尾部没有振荡。很明显,用这种器件可以得到更好的开关性能。但由图 5 也可以看出,开关曲线顶部的陡度逐渐减小,使得功率转换完全达到 1 的范围变大。相同的单耦合长度指数型耦合器级联的开关曲线与图 5 相似,只是开关功率不同。为了解决开关曲线顶部陡度不够的问题,可以利用多耦合长度变耦合系数定向耦合器开关曲线陡峭的特点。例如我们在图 5 中曲线 D 所示的级联高斯型耦合器前再加一个多耦合长度指数型耦合器,则可大大提高开关曲线顶部的陡度,如图 6 所示。

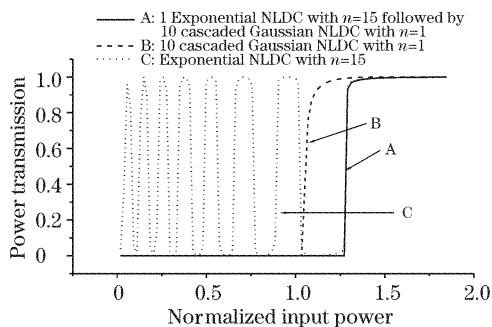


Fig. 6 Transmission curves of cascaded NLDC devices

图 6 中曲线 B(即图 5 中的曲线 D)为 10 个相同的单耦合长度高斯型变耦合系数定向耦合器级联的结果,曲线 C 为一个多耦合长度($n=15$)的指数型变耦合系数定向耦合器($K_{\max}=2.5K_0$)的开关曲线,曲线 A 则对应于用曲线 C 所对应的指数型变耦合系数定向耦合器同曲线 B 的级联耦合器再次级联。由图 6 可以看出,开关曲线更加理想,曲线顶部在很小的功率范围内就使得功率转换达到 1,开关特性有了很大的提高。当然,图 6 所示的级联耦合器中包含 11 个单元耦合器,这在实用上是不够简洁的,只是用它来说明这种级联耦合器的工作原理。实际上当级联耦合器中有一个多耦合长度耦合器时,其总体开关曲线的陡度仅由多耦合长度耦合器决定,而其余单耦合长度耦合器所起的作用是把多耦合长度耦合器开关曲线中前面的各次开关现象截至掉,所以适当选取各耦合器的参量,完全可以减少单元耦合器的数目,图 7 所示即为一例。

在图 7 中,虚线 B 表示一个多耦合长度($n=15$)的指数型变耦合系数定向耦合器($K_{\max}=2.5K_0$)同 5 个相同的单耦合长度高斯型变耦合系数定向耦合器($K_{\max}=1.1K_0$)级联所得的开关曲线,虚线 A 即为图 6 中的曲线 C。从图 7 可以看出,

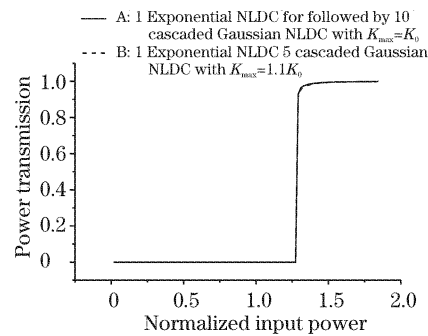


Fig. 7 Transmission curves of cascaded NLDC devices

曲线 A 和 B 基本重合,也就是说,在开关曲线形状一定的要求下,我们可以改变各级联耦合器的相关参量以改变单元耦合器的数目。

结论 相对于常系数定向耦合器级联,指数型变耦合系数定向耦合器同高斯型变耦合系数定向耦合器级联具有更加陡峭的动态开关区域以及非常平滑且没有振荡的过开关区域,它非常适合做为高质量的全光开关,且可以改变各级联耦合器的相关参量以改变单元耦合器的数目。

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 Liu Gangjun, Liang Binming, Jin Guoliang *et al.*. Arc-shaped waveguide switch based on the third-order nonlinear effect. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(24): 5022~5024
- 4 Liu Gangjun, Liang Binming, Jin Guoliang *et al.*. Multiple coupling length nonlinear directional couplers with variable coupling coefficient. *Opt. Commun.*, 2003, **218**(1): 113~117
- 5 Jin Guoliang, Cao Junfeng, Cao Zhuangqi *et al.*. Optimizing design of all-optical switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(9): 1332~1336 (in Chinese)
- 6 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)
- 7 Jin Guoliang, Mizumoto T, Pu Guosheng. All-optical switching in intersecting waveguide. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(11): 1590~1593 (in Chinese)
- 8 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)