

X-型波导全光开关的优化设计

金国良 曹俊锋 曹庄琪 陈益新

(上海交通大学应用物理系光学与光子学研究所, 上海 200030)

摘 要 依据耦合模理论与光束传播法(Beam propagation method), 提出了由 X 结波导到交叉波导的系列化全光开关设计。此设计方法可以对不同的材料(自聚焦、自散焦)、不同的非线性折射率和波长等进行波导全光开关优化设计。

关键词 非线性光学, 弱光全光开关, 耦合模理论, 光束传播法。

1 引 言

八十年代初期, 人们就认识到利用具有克尔效应(折射率依赖光强变化)的非线性材料构成光波导, 可以实现低维空间无衍射传播、长距离非线性相互作用的全光运行器件^[1, 2]。各种全光功能器件如开关、逻辑运算器、限幅器、阈值器、调制器、双稳态等, 具有快速、宽带、平行处理、抗干扰等优点, 有着广阔的应用前景。目前, 一方面继续探索新的实用材料, 希望材料有大的非线性折射率和饱和非线性折射率、及小的克尔效应响应时间和传播损耗; 另一方面在现有材料基础上, 不断改进全光运行器件的原理、结构设计, 追求弱光输入下的显著全光功能效应。

至今, 已经提出并研究了几种波导全光开关设计^[3, 4]。其中非线性定向耦合器(NLDC 见图 1(a)), 非线性分布反馈光栅反射器, 非线性 Mach-Zehnder 干涉器等虽各具优点, 但也存在较多不足之处。X 结开关(见图 1(b))是一种两折行波导接触于一点, 但并不交迭的特殊非线性定向耦合器。它通过改变相邻波导之间的距离, 即变化波导模之间耦合系数, 达到改变、控制器件的输出特性。研究表明, 这种结构适用于自聚焦材料, 有较陡直的多重开关特性。交叉波导全光开关(见图 1(d))是一种加强直接非线性相互作用的特殊耦合器件^[5], 适合于自散焦(或自聚焦)材料, 具有易于控制, 多重开关等特点。这后两种器件有着综合优势, 均能实现弱光非线性开关作用, 具有良好的应用前景。

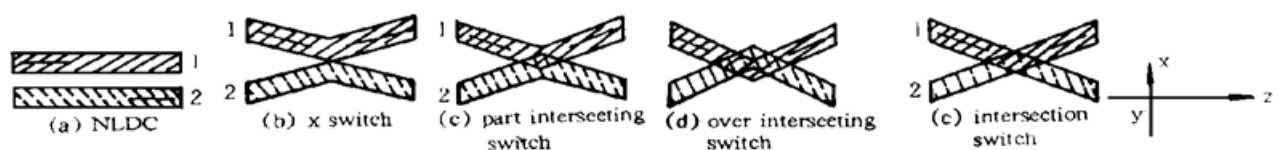


Fig. 1 X-type all-optical switches

(a) NLDC, (b) X switch, (c) part intersecting switch, (d) intersection switch, (e) over intersecting switch

无论是 X 结开关, 还是交叉开关, 从原理上分析都可视为非线性定向耦合器的变种(指对称波导情况)。三者都可看作两折行波导的组合。由图 1 可见, X 结开关中, 两折行波导交于一点, 交叉开关中, 两折行波导呈直通式交迭; 非线性定向耦合器中, 两直波导可看作折行波导的一种特殊情况, 即两直波导平行不交接。它们的行为都满足耦合模的理论和方程, 只是具体解的结果不同; 它们都可以用光束传播法进行数值模拟^[4]。模拟结果表明: 非线性定向耦合器、X 结开关、交叉开关均有良好的模耦合、模干涉图形^[4, 5]。是属于同一类型的全光开关器件。

其实, 在 X 结开关与交叉开关结构之间还有一系列中间状态结构。在交叉开关中还有直通式交叉, 部分交叉以及过交叉情况。以上种种均可通过在 X 结开关中, 将波导输入、输出四端点中心位置固定, 让两折行波导折变处中心点之间距离沿横向变化, 由此可以演化出一系列结构, 如图 1 所示, 包括 NLDC, X 结, 部分交叉, 交叉、过交叉开关等等。这样变化的意义在于为优化器件设计、追求弱光全光开关及陡直的开关特性等性能, 打下良好的基础。当然, 具体优化过程还与调整波导夹角、波导宽度等结构参数有关。这类器件亦可统称为 X-型全光开关。其处理方法是相同的。

2 X-型全光开关原理

如上所述, 图 1 中的各个器件可以看成两个独立折行波导的不同组合, 每个折行条波导(折行角很小, 一般小于 1 度)可以独立承受本征单模。非线性定向耦合器是最简单情况, 它所遵循的非线性耦合模方程为^[3]

$$\left. \begin{aligned} -j \frac{d}{dz} a_{gw_1}(z) &= \chi \exp(j \Delta \beta k_0 z) a_{gw_2}(z) + k_0 [\Delta \beta_{11} |a_{gw_1}(z)|^2 + G \Delta \beta_{12} |a_{gw_2}(z)|^2] a_{gw_1}(z) \\ \pm j \frac{d}{dz} a_{gw_2}(z) &= \chi \exp(-j \Delta \beta k_0 z) a_{gw_1}(z) + k_0 [\Delta \beta_{22} |a_{gw_2}(z)|^2 + G \Delta \beta_{21} |a_{gw_1}(z)|^2] a_{gw_2}(z) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, $a_{sw_1}(z)$, $a_{sw_2}(z)$ 分别为 1, 2 波导中沿 z 方向传播导模的振幅, χ 为导模间耦合系数, 是个常数。 k_0 为自由空间的波矢, $\Delta \beta k_0$ 为两波导中本征模的初始波矢失配(对称情况为 0)。 $\Delta \beta_{ij}$ ($i, j = 1, 2$) 是由自身或它方导模功率所引起的非线性折射率对模场横向分布的平均值。对于克尔效应, $\Delta \beta_{ij}$ 只与自身模场及模场交迭情况有关。 G 是由非线性性质及导模偏振态确定的常数, 如对于克尔效应及两个 TE 模, $G = 2$ 。 \pm 号分别代表正向或反向波。对于 NLDC, 此方程已经有所了解解析解及各种讨论^[3, 4]。对于 X 结开关, 在波导折行角很小情况下, 两折行波导可以看作由许多相距不等的小平行波导对连接而成; 每一平行波导对均满足(1)式。考虑整个 X 结情况, 则(1)式有两点修正: 1) 耦合系数不再是个常数, 它与 z 坐标有关; 2) $\Delta \beta_{ij}$ 也因为 z 方向模场交迭情况变化而不同。经过修正的耦合模方程完全适合于 X 结开关, 但要解这个方程是不容易的, 有待努力。对于图 1 的其它各种情况, 与此类似, 耦合模理论是适用的, 但还未能得到解析解。这时就要用到数值方法的光束传输法。

单色光在波导中的行为可以用亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 E + \frac{\omega^2}{c^2} n(\omega, x, y, z) E = 0 \quad (2)$$

描述。假定 $n(\omega, x, y, z)$ 只与横向分布有关, 即 $n(\omega, x, y)$ (本文的讨论满足此条件), 则可

直接写出 z 传播方向相隔 Δz 的前后两处模场之间关系的解析式，这种关系可理解为中置一小的薄透镜导致前后模场之间的位相变化。引入上述解的傅里叶变换离散表达式，应用程序迭代计算方法，就可定量地确定模场、能量在波导中传播的情况。这就是光束传播法的依据。波导全光开关主要研究弱光非线性效应，所以只考虑非线性折射率对位相的贡献。如果是强光非线性，还得考虑非线性折射率对模场的影响。无论哪种情况，光束传播法都是行之有效的数值算法^[4]。

无论是耦合模理论，抑或光束传播法，都是从电磁场理论出发研究光波导的，只是具体处理问题的方法不一样，其结果是可以互为验证，十分一致的。另外，从原则上分析，X-型全光开关系列中的每一个都可以看作一个五层波导结构，利用每一个结构中任一横断面上折射率分布 $n(x)$ 对 x 的积分为一定值(这是两独立波导迭加的结果)，即可用有效折射率法^[6]解出其中奇、偶模的传播系数及耦合系数，由此确定功率转移情况。

3 结构与开关特性

本文的 X-型波导全光开关，条波导是在衬底材料上用两次离子交换或扩散的方法制作的，波导的有效厚度为微米量级，故可以应用一维快速傅里叶变换的光束传播法模拟波导中模场传播情况，得到各种不同结构波导全光开关的输入输出特性。图 2~ 5 示出具有代表性的 X 结、部分交叉、直通交叉、过交叉等四种结构及其开关特性。其中所用的波导均为宽度 $H_1 = H_2 = 4.5 \mu\text{m}$ 的对称波导，波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ，衬底折射率 $n = 1.5$ 。波导折射率分

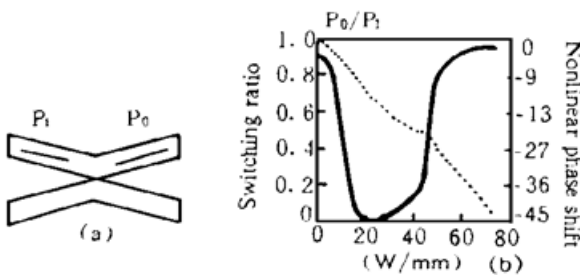


Fig. 2 X switch for $n_2 < 0$
 (a) X switch ($H_1 = H_2 = 4.5$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $n_2 = -5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$), (b) Response of X switch

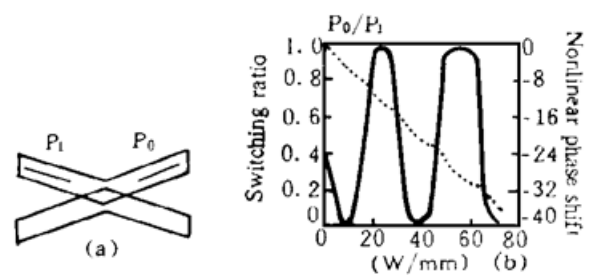


Fig. 3 Part intersecting switch for $n_2 < 0$
 (a) $0.77H$ part intersecting switch ($H_1 = H_2 = 4.5$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $n_2 = -5.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$), (b) Response of part intersecting switch

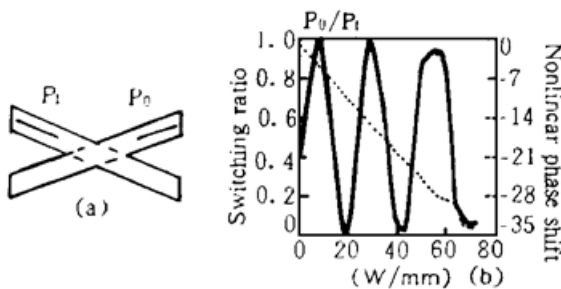


Fig. 4 Intersection switch for $n_2 < 0$
 (a) Intersection switch ($H_1 = H_2 = 4.5$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $n_2 = -5.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$), (b) Response of intersection switch

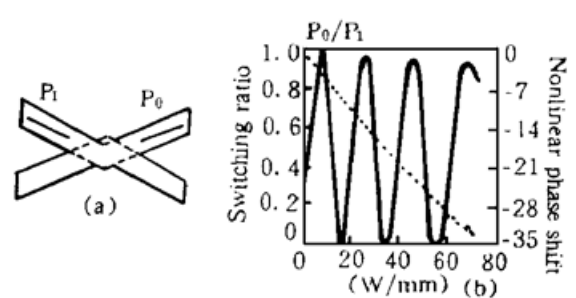


Fig. 5 Over intersecting switch for $n_2 < 0$
 (a) $0.25H$ part over intersecting switch ($H_1 = H_2 = 4.5$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $n_2 = -5.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$), (b) Response of $0.25H$ part over intersecting switch

布为双曲余弦函数,波导与衬底之间的折射率差最大值为 0.0035 。非线性折射率 $n_2 = -5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$ (自散焦材料)。两输入端(输出端)之间中心距离为 $20 \mu\text{m}$,波导折行夹角为 0.1° 左右。在各开关特性图中,实线表示上面波导中输出功率对输入功率的百分比与输入功率之间的关系,虚线表示非线性位相差与输入功率的关系。

从图 2~5 可以看出,随着两波导之间的交迭程度不断增加,开关特性不断地改善。图 5 (b) 中,输出从第一次最大值变化到第一次最小值所需要的开关光功率变化为 10.2 W/mm 左右。波导厚度为微米量级,这意味着通过精心地调整结构参数(变化折行角等),使开关曲线的初始状态为极值或者接近极值,则 10 mW 级输入光功率变化就能观察到全光开关现象。

以上是对于 $n_2 < 0$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 情况下模拟的结果。进而可以模拟 $n_2 < 0$, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 情况下各种波导结构的开关特性。光束传播法的研究结果表明:对于 $n_2 < 0$ 的各种情况,过交叉波导开关结构具有最佳的全光开关特性。换言之,两波导靠近些,交叉程度大一些,有利于改善自散焦材料的 X-型全光开关的开关特性。这可解释为:在以自散焦材料为衬底的波导中,光强导致波导折射率下降。而且越是模场中心处,光强越强,波导折射率下降程度就越大。这样光束就易于从本地向相邻波导(高折射率区)耦合转移。两折行波导靠得越近,交叉得多些,这种能量转移所需的光功率变化就小些。即只需要较低的输入光功率就能使光束自身改变输出,实现全光开关功能。作为比较,若以自聚焦材料代替图 5 中的自散焦材料,开关功率高达 20 W/mm ,这说明过交叉波导结构不适合于自聚焦材料。

图 6,7 所示为以自聚焦材料为衬底构成的 X 结、交叉波导两种器件及其开关特性。所用的波导为对称条波导, $H_1 = H_2 = 7.2 \mu\text{m}$, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $n_2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$ 。衬底折射率及波导折射率分布情况同前。由图可见, X 结的开关特性明显优于交叉开关。进一步的模拟(包括不同的波长及波导宽度)表明:对于自聚焦材料, X 结的开关特性全面优于部分交叉、交叉及过交叉开关。也就是说,对于以自聚焦材料作为衬底的波导,靠得近,交叉得多,并不有利于能量向相邻波导耦合转移。这可理解为:在自聚焦材料中,光强导致本地折射率升高,光束能量不易就地向相邻波导转移;而且交迭部分越多,折射率迭加以后更大,更不利于光波在波导之间的耦合转移。光强导致折射率变化,主要发生在导模中心部分,对尾场(迅衰场)部分无大影响,所以在 X 结开关中,光能量在波导间仍可顺利地经过尾场耦合交换,非线性作用是通过改变导模间位相关系实施的。这就是 X 结的开关特性比交叉结构好的原因。对于 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, 一次全光开关过程中所需要的非线性位相差积累,差不多是波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 的二倍。从图 6 可见,其平均开关功率为 23 W/mm , 基本是上述自散焦情况中 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 时最佳值的二倍。

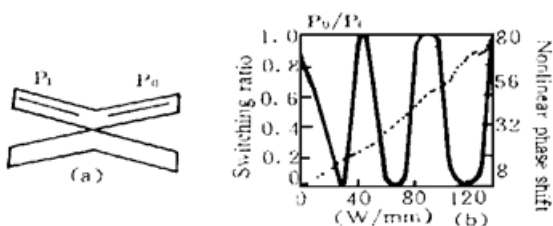


Fig. 6 X switch for $n_2 > 0$

(a) X switch ($H_1 = H_2 = 7.2$, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $n_2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$), (b) Response of X switch

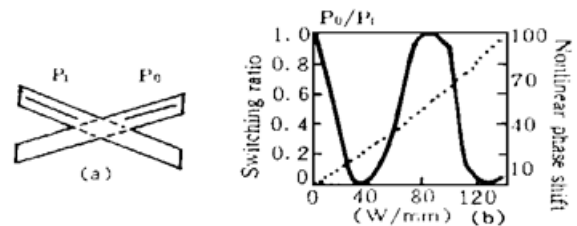


Fig. 7 Intersection switch for $n_2 > 0$

(a) Intersection switch ($H_1 = H_2 = 7.2$, $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $n_2 = 5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$), (b) Response of Intersection switch

另外,对于自聚焦材料,在其它条件相同的情况下,波长为 $1.3\ \mu\text{m}$ 的导模比波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$ 的有着更长延伸的尾场,即长波长导模比较有利于在波导间的耦合。正因为如此,尽管波长为 $1.3\ \mu\text{m}$ 的导模在波导间耦合所需要的非线性位相差是波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$ 的二倍左右。但在同等情况下波长为 $0.6328\ \mu\text{m}$ 的 X 结开关中,平均开关功率不是波长为 $1.3\ \mu\text{m}$ 的二分之一,而是 $18.2\ \text{W/mm}$ 。这亦为理解自聚焦材料的全光开关原理提供了一有力佐证。

结 论 本文依据耦合模理论和光束传播法,从优化设计弱光波导全光开关着手,提出了系列化 X-型波导全光开关新设计,具体讨论了不同非线性材料、波长等条件下的系列器件的开关特性,给出了定量结果以及原理性解释。研究表明: X-型波导全光开关具有结构简单,适合于不同的非线性材料及波长,输入输出四端口,开关特性可调等优点。它还可构成全光的模数转换器件,弱光全光反相输出器、全光逻辑器件等,是一种有着广阔应用前景的系列器件。半导体掺杂玻璃,因其诱人的特性,是用来构造 X-型波导全光开关的合适材料之一。相信不久就能看到这种原型器件的出现。

参 考 文 献

- [1] W. Sohler, Nonlinear integrated optics. in *New Directions in Guided Wave and Coherent Optics*, D. B. Ostrowsky and E. Spitz. Eds. (NATO ASI Series, 78) The Hague, The Netherlands, Martinus Nijhoff, 1984: 449~ 479
- [2] S. M. Jensen, The nonlinear coherent coupler. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(10): 1580~ 1583
- [3] G. I. Stegeman, E. M. Wright, N. Einlayson *et al.*, Third order nonlinear integrated optics. *J. of Lightwave Tech.*, 1988, **6**(6): 953~ 968
- [4] G. I. Stegeman, E. M. Wright, All-optical waveguide switching. *Optical and Quant. Electron.*, 1990, **22**(2): 95~ 122
- [5] 金国良,水本哲弥,蒲国胜等,交叉波导中的非线性全光开关. *光学学报*, 1995, **15**(11): 1590~ 1593
- [6] 西原浩,春名正光,栖原敏明,光集积回路. オーム社, 1985, § 2.5.2(第二章第五节)

Optimizing Design of All-Optical Switches

Jin Guoliang Cao Jinfeng Cao Zhuangqi Chen Yixin
 (Applied Physics Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)
 (Received 28 July 1995; revised 19 December 1995)

Abstract To realize the weak light all-optical switch, a series of all-optical switch designs, including X switch and intersection switch, are proposed based on coupling mode theory and beam propagation method. It can be used to optimize the all-optical switch design for different materials (self focus and defocus), nonlinear indices and wavelengths.

Key words nonlinear optics, weaklight all-optical switch, coupling mode theory, beam propagation method.