

自聚焦材料弧形全光开关的研究*

刘 军 金国良 应再生 戴蓓兴 陈英礼

(上海交通大学应用物理系,
区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,
上海 200030)

摘 要 应用光束传播法, 比较基于自聚焦和自散焦材料的全光波导开关的开关特性, 指出基于自聚焦材料的全光开关具有较低开关功率、数值化多次开关特性等优越性, 并对波导参数进行了全面的优化设计。

关键词 非线性光学, 弱光全光开关, 光束传播法。

1 引 言

自从 80 年代开始三阶非线性集成光学研究以来, 已对全光运行信息处理器件做了很多工作, 但是至今还没有取得实用化的根本性突破。目前, 人们一方面继续探索新的实用材料, 以期获得优良的非线性特性; 另一方面, 在现有材料基础上, 进一步研究全光运行的原理并改进结构, 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基于克尔效应的波导全光开关^[1, 2], 如非线性定向耦合器(NLDC)、X 结开关^[3, 4]、交叉波导开关^[5]等。对以上这些器件的研究虽然得到一些有意义的结果, 但是, 就开关特性而言, 还存在两个问题: 首先是全光开关功率偏高, 离弱光全光开关的实用化要求还有一段距离; 其次是上述器件的工作特性曲线接近于三角函数, 离数值化矩形开关特性有较大的差距。本文引入了弧形开关结构^[6], 如图 1 所示, 其中 R 为弧形波导的半径, O_1O_2 为两弧形波导中心最短距离, H 为波导宽度, 并用基于快速傅里叶变换的光束传播法(FFT-BPM)和有限差分光束传播法(FD-BPM)分别对基于自聚焦和自散焦材料的弧形全光开关进行模拟计算, 比较了这两种方法, 并指出基于自聚焦材料的弧形开关具有较低开关功率、数值化多次开关的特性。

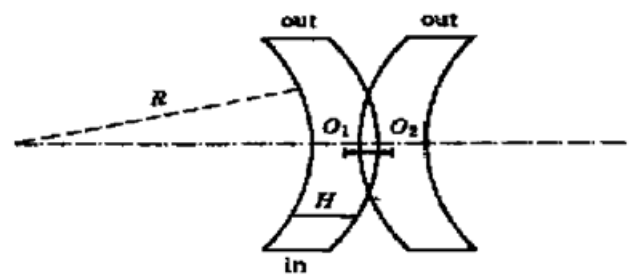


Fig. 1 Arc-type all-optical switch

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-09-25

2 原 理

上述器件由于都是基于双模干涉原理,其传输行为可由如下的非线性耦合模方程描写^[1]:

$$\left. \begin{aligned} -j \frac{d}{dz} a_{gw1}(z) &= \kappa \exp(j\Delta\beta k_0 z) a_{gw2}(z) + k_0 [\Delta\beta_{11} |a_{gw1}(z)|^2 + G\Delta\beta_{12} |a_{gw2}(z)|^2] a_{gw1}(z), \\ \pm j \frac{d}{dz} a_{gw2}(z) &= \kappa \exp(-j\Delta\beta k_0 z) a_{gw1}(z) + k_0 [\Delta\beta_{22} |a_{gw2}(z)|^2 + G\Delta\beta_{21} |a_{gw1}(z)|^2] a_{gw2}(z), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, a_{gwi} 为第 i 波导中沿 z 方向传播导模的振幅($i = 1, 2$), \pm 号代表正向和反向波; κ 为耦合系数; G 为由非线性性质和导模偏振态所确定的常数,对于克尔效应及两个 TE 模, $G = 2$; $\Delta\beta_{ij}$ ($i, j = 1, 2$) 是由自身或它方导模所引起的非线性折射率对模场横向分布的平均值,其表达式为^[1]:

$$\Delta\beta_{ij} = \frac{C^2 \epsilon_0 \delta_0^2}{4} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy n^2(x, y) n_2(x, y, I) f_i^2(x, y) f_j^2(x, y)}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy f_i^2(x, y) \right| \left| \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy f_j^2(x, y) \right|}, \quad (2)$$

其中, $f(x, y)$ 为归一化的横向场分布。对于非线性定向耦合器,上述方程已有解析解,但对于其它器件,考虑到 κ 不再是常数, $\Delta\beta_{ij}$ 也由 z 方向模场交叠情况变化而不同,要求这些器件的解析解是不容易的,故考虑用光束传播法求数值解。另外,耦合系数 κ 反应了器件形状结构的特点,对开关性能有决定性的影响,且 κ 对传播距离越敏感,关系越复杂(频谱越丰富),输出特性就越好,具有多次开关、矩形开关等特点。对定向耦合器、非线性定向耦合器和 X 结开关的输出特性比较可说明上述结论^[6]。出于这种考虑,本文提出了以弧形结构波导代替 X 结开关中的直波导,这样的设计使两波导靠得更近,双模干涉区更长,有利于非线性相位积累;加上波导间的距离变化从原来的线性函数变为二次函数,工作于非线性状态的全光开关特性曲线的频谱必然会变得更丰富,适合于数值化实用的要求。

由克尔效应关系 $n = n_0 + n_2 I$ 可以知道,对于光束传播方法,要求出 $z + \Delta z$ 处的导模场 $E(x, z + \Delta z)$ 的分布,必须要知道 $z + \Delta z$ 处的本地光强 $I(x, z + \Delta z)$ 的分布,而要知道本地光强分布,又必须要知道本地模场分布,因而形成了一个矛盾。这个问题在有限差分光束传输法和快速傅里叶变换的光束传输法中是以不同的方法解决的。在用有限差分光束传输法计算时,必须作一个近似,即将 z 处的光强分布近似为 $z + \Delta z$ 处的光强分布,因而限制了 Δz ,必须取得较小。但是,在快速傅里叶变换光束传输法中, $z + \Delta z$ 处的模场分布 $E(x, z + \Delta z)$ 由下式决定^[7]:

$$E(x, z + \Delta z) = \text{IFFT} \left\{ \text{FFT}[E(x, z)] \exp(-jk_x \Delta z) \right\} \exp[-j\Delta z \eta(x, z)], \quad (3)$$

其中 $E(x, z)$ 为 z 处的模场分布; $\eta(x, z) = \frac{1}{\Delta z} \int_{z_0}^{z_0 + \Delta z} k_0(n - n_s) dz$, 其物理意义是模场 $E(x,$

$z)$ 经傅里叶变换后分解的一系列平面波在波导中传播 Δz 距离后引起的平均波矢修正。而 $z + \Delta z$ 处的光强分布只与 $\text{IFFT} \{ \text{FFT}[E(x, z)] \exp(-jk_x \Delta z) \}$ 项有关。这说明可在反傅里叶变换后求出光强分布,再代入上式中求 $\eta(x, z)$, 最后求出 $z + \Delta z$ 处的模场分布,没有将 z 处光强分布近似为 $z + \Delta z$ 处的限制。虽然有大量文献指出有限差分光束传输法要优于快速傅

里叶变换光束传输法，但在涉及到非线性效应时，快速傅里叶变换光束传输法还是有其优越性的。图 2 给出了在分别用有限差分光束传输法和快速傅里叶变换光束传输法计算弧形光开关的输出特性曲线，其中横坐标表示波导厚度方向单位长度的输入光功率，纵坐标表示左波导输出的归一化光功率。快速傅里叶变换光束传输法所取步长($\Delta z = 20 \mu\text{m}$)比有限差分光束传输法所取步长($\Delta z = 2 \mu\text{m}$)大 10 倍，而结果一样。充分证明了上述讨论的正确性。

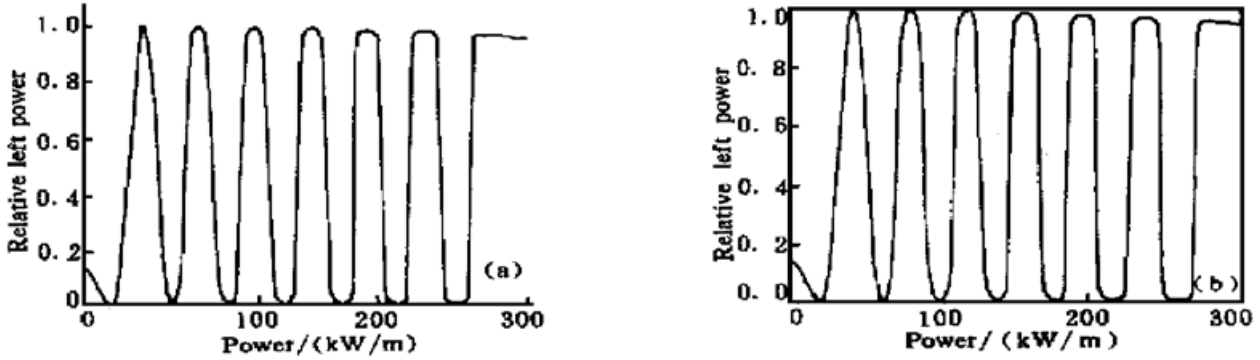


Fig. 2 The property of arc-type switch ($R = 6.784128 \text{ m}$, $\overline{O_1O_2} = 6.85 \mu\text{m}$). (a) FD-BPM method, (b) FFT-BPM method

3 结构、开关特性及其分析

本文提出的弧形全光开关是假定在衬底材料上用两次离子交换技术制作的，波导的有效厚度为微米量级，其中波导宽度均为 $8 \mu\text{m}$ 的对称波导，波长为 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ ，衬底折射率为 2.1512，波导与衬底之间折射率差的最大值为 0.0035，波导折射率分布 (x 方向) 为双曲余弦函数，非线性折射率 $n_2 = 5 \times 10^{-14} (\text{m}^2/\text{W})$ (自聚焦材料)，输入和输出处两波导中心间距为 $18 \mu\text{m}$ 。经用光速传输模拟计算，对自散焦材料，在 $R = 3.4790404 \text{ m}$ 时，输出特性曲线最佳 (图 3)，对自聚焦材料，在 $R = 6.740640 \text{ m}$ 时，输出特性曲线最佳 (图 4)。

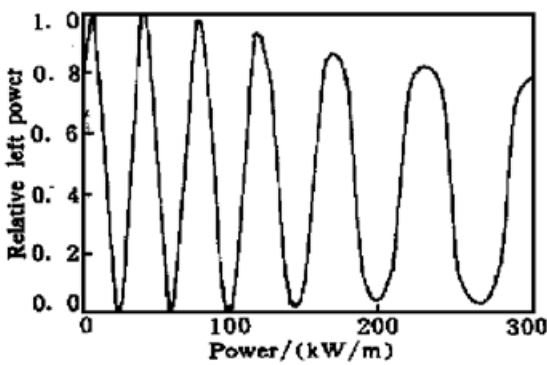


Fig. 3 Arc-type switch for $n_2 < 0$, $R = 3.479040 \text{ m}$, $\overline{O_1O_2} = 6.77 \mu\text{m}$

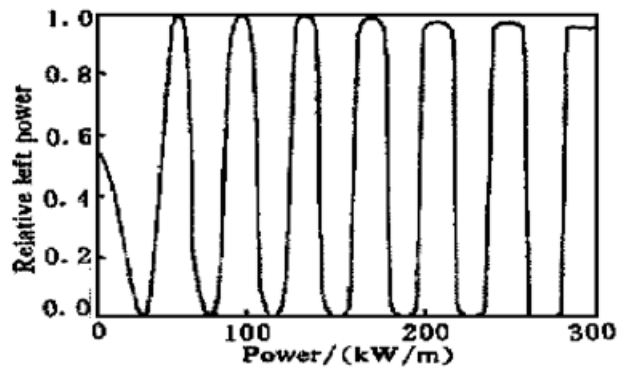


Fig. 4 Arc-type switch for $n_2 > 0$, $R = 6.740640 \text{ m}$, $\overline{O_1O_2} = 6.77 \mu\text{m}$

由图 3、图 4 可以看出，对于弧形结构的光开关，不但有多次开关，而且其首次开关功率大约在 $16 \sim 17 \text{ kW/m}$ 的范围内，即对 $1 \mu\text{m}$ 厚的波导层，只需要 $16 \sim 17 \text{ mW}$ 的输入光功率，可实现弱光开关。而且，基于自聚焦材料的弧形全光开关还有平均开关功率小 (20.7 kW/m)、截止开关功率大 (280 kW/m)、开关次数多 (13 次) 等特点，且随着输入功率增加，输出波形近似为矩形，可实现数值化开关。对不同波长及波导宽度进一步的模拟表明，对于以自聚焦材料为衬底构成的弧形波导，部分交叉全面优于完全交叉和过交叉开关，即对

于以自聚焦材料作为衬底的波导, 靠得近, 交叉得太多, 并不一定有利于能量向相邻波导耦合转移。这可以这样理解: 在自聚焦材料中, 光强导致了本地折射率升高, 而交叠部分越多, 折射率叠加以后越大, 随着输入光强的增加, 折射率升高到一定程度, 将会将导模限制在较窄的范围内, 相当于波导宽度变窄, 使原来的多模干涉区变为单模区, 从而导致了开关截止。因而, 减少衬底折射率, 则要使原来的多模干涉区变为单模区, 需要更大的输入光功率, 即截止开关功率将增大。我们在模拟过程中将衬底折射率改为 $n_s = 1.5$, 在 $R = 6.740640$ m 时, 截止开关功率可提高到 410 kW/m。另外, 光致折射率变化对尾场(迅衰场)部分无大影响, 因而在部分交叉情形下, 波导间的耦合主要来自于尾场(迅衰场)的重叠积分, 非线性作用是通过改变导模间的相位关系实现的。上述推论在模拟过程中得到验证。对同一基于自聚焦材料的弧形全光开关, 入射模场的波长越大, 则开关次数越多, 截止开关功率越大。这正是由于波长越长, 尾场越长, 尾场耦合加强, 非线性位相积累变慢引起的, 这亦为理解自聚焦材料的全光开关原理提供了一个有力的佐证。至于基于自聚焦材料的开关特性要优于自散焦材

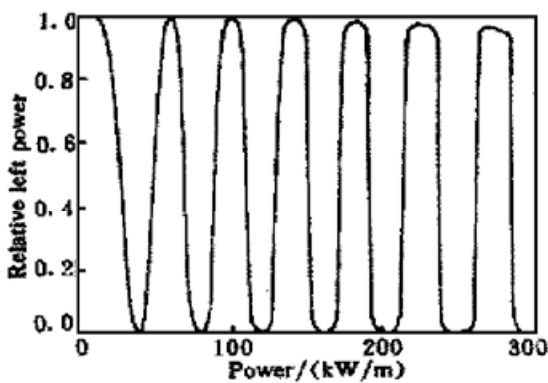


Fig. 5 Arc-type switch for $n_2 > 0$. ($R = 6.784128$ m, $H = 8.3$ μm , $\lambda = 1.3$ μm)

与图 2(b) 比较可得出上述结论。

结 论 本文依据耦合模理论和光束传播法, 以寻求高性能的弱光全光开关为目的, 提出了弧形波导全光开关的新结构, 具体讨论了不同非线性材料、不同波长和波导宽度等条件下的开关特性, 给出了定量的结果和原理性的解释, 并对此结构作了优化设计。结果表明, 弧形波导全光开关具有结构简单、适合于不同的非线性材料、输入输出四个端口、开关特性可调等优点; 其中基于自聚焦材料的弧形波导开关更具有截止开关功率大、可实现多次开关、平均开关功率小、可数值化开关等优良特性, 其应用前景广阔。

参 考 文 献

- [1] Stegeman G I, Wright E M, Einlayson N *et al.*. Third order nonlinear integrated optics. *J. Lightwave Tech.*, 1988, **6**(60): 953~ 968
- [2] Stegeman G I, Wright E M. All-optical waveguide switching. *Opt. & Quant. Electron.*, 1990, **QE-22**(2): 95~ 122
- [3] Stabini J P, Finlayson N, Stegman G I. All-optical switching in nonlinear X junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(12): 1176~ 1178

料, 我们认为, 随着输入光功率的增加, 基于自聚焦材料的波导折射率将增加, 而基于自散焦材料的波导折射率将减少, 在多模耦合区长度一样的条件下, 基于自聚焦材料的波导产生的非线性相位积累将大于基于自散焦材料的波导产生的非线性相位积累, 因而基于自聚焦材料的波导开关的平均开关功率要小于基于自散焦材料的平均开关功率。

此外, 改变波导的宽度, 可以改变输出状态, 使输入光功率为零时, 此弧形开关就处于开关状态下, 这样优化结构后, 可使实现第一次开关所需功率最小。图 5 展示了波导宽度改变为 8.3 μm 对应的输出特性曲线,

- [4] 金国良, 曹俊锋, 曹庄琪等. X-型波导全光开关的优化设计. 光学学报, 1996, **16**(9): 1332~ 1336
- [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] 金国良, 曹俊锋. 弧形波导开关的设计. 上海交通大学学报, 1997, **31**(1): 15~ 18
- [7] Mevencamp W, Boges E. Modelling and beam propagation analysis of integrated electro-optics devices. *Archiv fur Elektronik & Usertragungstechnik*, Bd 40, 1986, Heft 5: 289~ 296

Study of Arc-Type All-Optical Waveguide Switch Based on Self-Focusing Substrate

Liu Jun Jin Guoliang Ying Zaisheng

Dai Beixing Chen Yingli

(Applied Physics Department,

Area Fiber Communication Net and New Optical Communication System National Lab,

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 25 September 1998)

Abstract The beam-propagation method (BPM) was used to analyse the structure of all-optical waveguide switch. The switching characteristics of all-optical waveguide switch based on self-focusing substrate are compared with that based on self-defocusing substrate. It is indicated that the all-optical switch based on self-focusing substrate shows many advantages such as low switching power and digital switching feature. The waveguide parameters were optimized by BPM.

Key words nonlinear optics, all-optical switch, beam-propagation method.