

交叉波导中的非线性全光开关

金国良

(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

水本哲弥 蒲国胜 内藤喜之

(东京工业大学电子物理系, 东京 152)

摘 要 提出了交叉波导结构中的非线性全光开关设想。用光束传输法(BPM), 就自聚焦以及自散焦两种不同衬底材料波导, 显示了全光开关的原理以及结构参量与开关特性之间的关系。

关键词 导波光学, 非线性光学, 全光开关。

1 引 言

在全光集合回路中, 波导开关是一类基础器件。至今, 已研究了几种全光波导开关器件^[1], 如非线性定向耦合器(NLDC), 非线性光栅开关, 以及 X 结开关^[2, 3]。其中 X 结开关是一种变相的非线性定向耦合器, 即通过变化相邻波导之间距离来改变波导间的模耦合系数, 达到控制和改善器件的全光开关特性。为了加强直接非线性相互作用, 且使器件的微加工以及参数测试变得容易, 本文提出一种使用交叉波导结构的全光开关。此结构中, 在自聚焦或自散焦材料衬底上形成两根交叉的单模直波导, 适当地设计折射率分布, 使在交叉区域内形成多模区; 在交叉区中传播的光能量由于多模干涉产生振荡, 并由具体振荡情况决定输出口; 依赖光强导致折射率变化的原理, 优化结构参量以后, 提高输入功率会使输入光从原来低功率时的输出口变化到另一波导口输出, 达到全光开关控制作用。

光束传输法用来模拟交叉波导全光开关的运行情况, 同时给出了两种材料(自聚焦和自散焦)的器件非线性全光开关特性。

2 结构与原理

图 1 显示了交叉波导(ISWG)的示意图, 用两次离子交换方法可以在三阶非线性材料如半导体掺杂玻璃上制作交叉波导。对每一直线单模波导来说, 假定波导与衬底之间的折射率差为 $\Delta n = 0.0035$; 在交叉波导区内, 折射率差为 0.007。单模波导的宽度假定为 $H_1 = H_2 = 5.8 \mu\text{m}$, 交叉角 $A = 0.467^\circ$ 。利用光束传播法追迹光能量流在波导中的传播情况, 可以看到交叉区域内存在着二模(β_0, β_1 分别是波导中零阶导模、一阶导模的传播系数)干涉情况, 光能量在其中呈现从一边至另一边的左右反复振荡变化。根据输入输出的设计, 可以确定交叉

区内的光能流变化情况。图 2 显示了低功率输入情况，光从波导 1 输入，经过交叉区以后还是从波导 1 输出，光能流在交叉区经历了大致七次从一边到另一边的变化。这种现象是由靠近交叉区附近两波导之间的模耦合以及交叉区中的二模干涉这样两种效应共同作用产生的结果。定义输出功率比为 $S.R = P_{02}/(P_{01} + P_{02})$ ，此时 $S.R = 0.03$ ，低功率情况下， $S.R$ 完全取决于交叉角、波导宽度、波长以及折射率分布等波导参数。

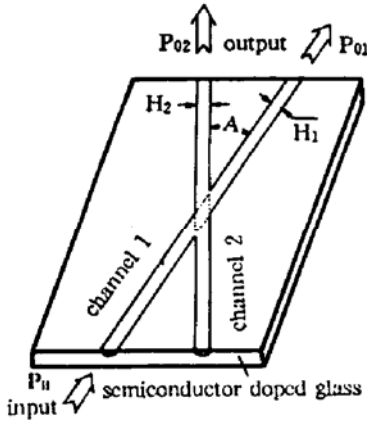


Fig. 1 Schematic diagram of all-optical switching employing intersecting waveguide (ISWG)

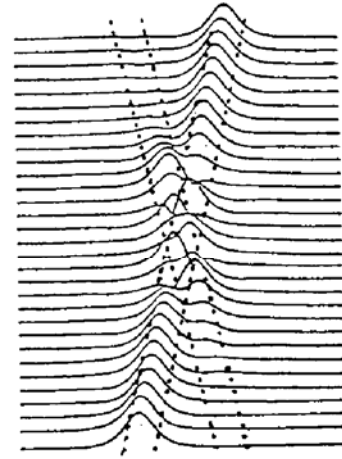


Fig. 2 The BPM simulation for low input power in ISWG ($H_1 = H_2 = 5.8 \mu\text{m}$, $A = 0.467^\circ$, $S.R = 0.03$)

在此结构中，所使用的半导体掺杂玻璃材料具有较大的三阶非线性色散特性，即其非线性折射率 n_2 的大小、符号与工作波长有关，有些波长情况下， $n_2 > 0$ (自聚焦材料)；有些波长情况下， $n_2 < 0$ (自散焦材料)。在自散焦材料情况下，设 $n_2 = -5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{W}$ 。图 3 显示了大功率输入情况下的全光开关情况，光从波导 1 输入，至波导 2 输出； $H_1 = H_2 = 5.8 \mu\text{m}$ ， $A = 0.467^\circ$ ，此时输入功率为 1.45 kW/mm ，输出功率比 $S.R = 0.97$ ，绝大部分能量实现全光开关转换。由图 3 可见，能量从输入口至输出口经历了大致六次从一边到另一边的变化，这种现象是由于高光强所致的负非线性位相积累变化(表示为 $\Delta\phi_{NL} = \int_0^L (\Delta\beta_{0NL} - \Delta\beta_{1NL}) dz$ 其中 $\Delta\beta_{0NL}$ ， $\Delta\beta_{1NL}$ 分别为非线性所导致的波导中零阶模、一阶模传播系数的变化率， L 为非线性相互作用区长度)引起两模干涉重新分布的结果，直接决定了光的改口输出。与图 2 相比较，可以观察到自散焦现象。

对于自聚焦材料，设 $n_2 = 5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{W}$ ，图 4 显示了大功率输入情况下的全光开关情

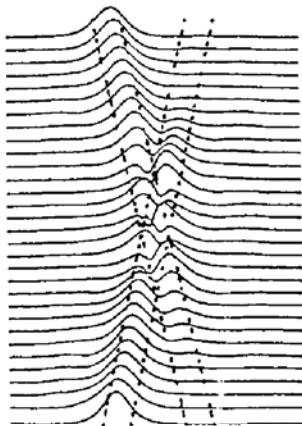


Fig. 3 All-optical switching for self-defocusing ISWG ($H_1 = H_2 = 5.8 \mu\text{m}$, $A = 0.467^\circ$, $S.R = 0.97$, $P = 1.45 \text{ kW/mm}$)

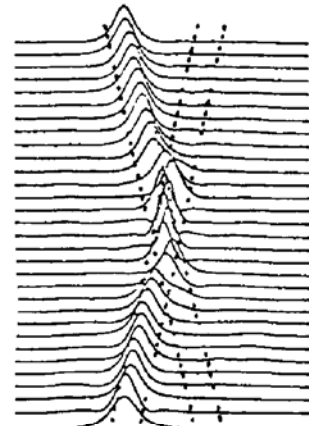


Fig. 4 All-optical switching for self-focusing ISWG ($H_1 = H_2 = 5.8 \mu\text{m}$, $A = 0.467^\circ$, $S.R = 0.96$, $P = 2.2 \text{ kW/mm}$)

况。光从波导 1 输入, 至波导 2 输出; $H_1 = H_2 = 5.8 \mu\text{m}$, $A = 0.467^\circ$, 此时输入功率为 2.2 kW/mm , 输出功率比为 $S.R = 0.96$, 绝大部分能量实现全光开关转换。由图 4 可见, 光能量从输入口至输出口经历了大致八次从一边至另一边的变化, 这是由于高光强所致的正非线性位相积累变化(表达式同前)引起两模干涉重新分布的结果, 决定了光的改口输出。与图 2 相比较, 可以观察到自聚焦现象。

3 开关特性

交叉波导全光开关的输入输出特性是与波导结构, 非线性材料等有着密切关系的, 通过变化有关参量, 可以影响器件的输入输出特性, 优化器件设计。下面讨论波导宽度以及交叉角对器件特性的影响。

图 5 与图 6 显示了不同波导宽度情况下的全光开关器件输入输出特性, 图中纵坐标为输出功率比 $S.R$, 横坐标为输入功率。图 5 所示的是在 $H_1 = H_2 = 5.8 \mu\text{m}$, $A = 0.467^\circ$ 情况下, 自聚焦, 自散焦两种不同材料分别作为波导衬底的交叉波导开关的输入输出特性曲线。图 6 所

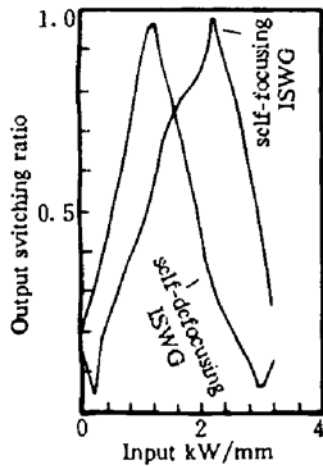


Fig. 5 Relation between input and output light power
($H_1 = H_2 = 5.8 \mu\text{m}$, $A = 0.467^\circ$)

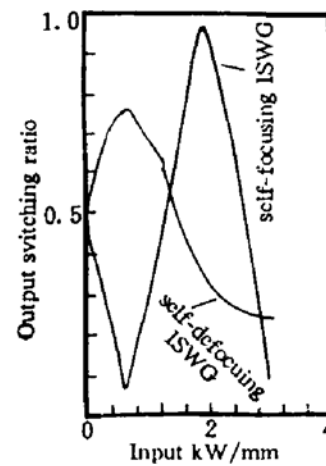


Fig. 6 Relation between input and output light power
($H_1 = H_2 = 4.0 \mu\text{m}$, $A = 0.467^\circ$)

示的是在 $H_1 = H_2 = 4 \mu\text{m}$, $A = 0.467^\circ$ 情况下, 两种材料分别为波导衬底的交叉波导开关的输入输出特性曲线。比较这两组曲线, 可以观察到: 对于自散焦材料, 只有在波导宽度相对比较大的情况下才能获得线性好的输入输出特性; 对于自聚焦材料, 只有在波导宽度相对比较小的情况下才能获得线性好的输入输出特性。这可以解释为对于自聚焦、自散焦不同的非线性材料, 波导宽度的设计需要保证交叉区在输入功率变化全过程中始终保持两模干涉状态, 如此才能获得理想的全光开关特性。

图 7 所示为 $H_1 = H_2 = 5.8 \mu\text{m}$, $A = 0.93^\circ$ 情况下, 两种材料作为波导衬底的交叉波导开关输入输出特性曲线。与图 5 相比较, 这时的特性明显变差, 开关功率大大提高。这可解释为交叉波导的交叉角大小与交叉区非线性相互作用长度直接有关。当交叉角变大时, 非线性相互作用区长度变短, 交叉区内两模干涉的非线性位相积累变化太小, 不足以引起干涉状态的明显变化, 输出的变化亦小;

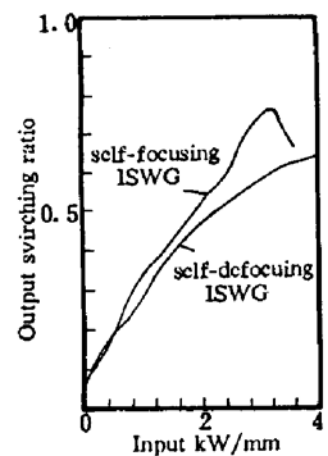


Fig. 7 Relation between input and output light power
($H_1 = H_2 = 5.8 \mu\text{m}$, $A = 0.93^\circ$)

反之, 当交叉角较小时(如图 5 中的 A 是图 7 的二分之一), 意味着交叉区内有较长的非线性相互作用长度, 其中两模干涉之间的非线性位相积累变化, 足以引起干涉状态的明显变化, 输出功率变化亦大。进一步的计算表明, 如果将图 5 中的交叉角减为原来的 $1/2$ ($A = 0.233^\circ$), 则自散焦材料为衬底的交叉波导全光开关功率可降低至 600 W/mm 。这为进一步降低开关功率, 使全光波导开关走向实用化提供了依据。另外交叉角太大会导致输入功率的模向辐射损耗。

结 论 本文提出了以交叉波导结构作为非线性全光开关器件的设想。描述了此器件的工作原理, 并用光束传输法计算了这种全光开关的输入输出特性, 具体讨论了波导宽度, 交叉角等参量与全光开关特性之间的关系。结果表明: 交叉波导结构的全光开关具有非线性相互作用易于控制, 多重开关性能以及微加工、测量方便等优点; 只要采用非对称结构以及进一步优化设计参数, 定能得到低开关功率, 良好开关特性的全光开关器件设计。

参 考 文 献

- [1] G. I. Stegeinaa, E. M. Wright, All-optical waveguide switching. *Opt. and Quant. Electron.*, 1990, **22**(2): 95~122
- [2] J. P. Sabini, N. Finlayson, G. I. Stegemau, All-optical switching in nonlinear X junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(12): 1176~1178
- [3] Y. Silberberg, B. G. Sfez, All-optical phase and power-controlled switching in nonlinear waveguide junctions. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(12): 1132~1134

All-Optical Switching in Intersecting Waveguide

Jin Guoliang

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

T. Mizumoto G. S. Pu Y. Naito

(Department of Physical Electronics, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152)

(Received 10 August 1994; revised 9 January 1995)

Abstract The intersecting waveguide switches based on the Kerr effect are proposed for the self-focusing and self-defocusing nonlinear substrates. By using the beam propagation method, the switching characteristics are examined.

Key words guidewave optics, nonlinear optics, all-optical switching.