

非对称 Y 分叉全内反射型全光开关*

陈克坚 唐 奕 占恒正 杨爱龄 李锡华 王明华 江晓清

(浙江大学信息与电子工程系, 杭州 310027)

摘要: 基于全内反射原理和光生载流子注入效应, 研究了一种 Y 分叉全内反射型全光开关。当控制光(波长为 805nm) 的强度达到 150W/mm^2 时, 对于 1310nm 波长, 其开关的消光比可以达到 18dB, 并对光注入开关机理做了简单的探讨。

关键词: Y 分叉; 全内反射; 全光开关

PACC: 5270K; 5275K; 4280S

中图分类号: TN 256 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2004)04-0468-04

1 引言

光开关作为一种基本的光子器件, 广泛应用于光纤通信系统、光学测量仪器以及光纤传感器等方面。目前采用的光控型全光开关由于它在超高速方面具有优势, 已经成为光通信系统中的重要研究领域之一。

在全光开关领域里, 国外的研究开展得比较早, 进展迅速, 在理论和实验方面都做了不少的工作, 取得了不少的成果。用于光控光开关研究的结构类型很多, 主要有 M-Z 干涉型^[1]、平面反射型^[2]、光克尔型^[3]、NOLM 型^[4]、频移型^[5], 而在提高光控光开关的开关速度(已达到亚飞秒量级)以及降低损耗、改善性能等方面, 引入了一系列新材料和新的工作机理。目前在这方面主要以量子阱材料(子带间跃迁(ISB-T)为其主要工作机理)^[6]、聚合物^[7]、低温生长的 GaAs(LT-GaAs)^[7,8]和光子晶体^[9]为研究对象, 光控制方式以运用同向注入为主。

本文基于全内反射开关结构^[10,11]的基础, 采用垂直光注入方式, 进行了 GaAs 材料的非对称 Y 分叉全内反射型全光开关研究, 并取得了一定的进展。

2 器件设计、制作及测试

2.1 器件设计

由于传统的非对称 Y 分叉结构的开关性能并不能达到实用的要求, 因此我们提出展宽波导的 Y 分叉^[12]。通过理论模拟, 在反射区扩展波导折射率变化为 $\Delta n = 0.01$ 的条件下, 多模波导的宽度从 $4\mu\text{m}$ 加宽到 $12\mu\text{m}$, 串音提高了 10dB, 损耗降低将近 0.6dB。

对于图 1 所示的 Y 分叉 TIR 开关, 在综合考虑消光比和损耗等因素后, 我们将分支角固定为 2° , 即 $\theta = 1^\circ$ 。同时通过增加波导的宽度以改善开关的串音和损耗。在实际设计过程中, 考虑到湿法腐蚀过程导致的波导变窄, 我们设计的反射区扩展波导的宽度为 $12\mu\text{m}$, 而其他区域波导宽度为 $7\mu\text{m}$ 。这样就需要在单模波导与多模波导之间采用平滑过渡区(如采用“牛角”或者锥型结构的过渡区), 以避免在多模波导中激发高阶模。分析可知有效光注入区域宽度 d 大于 $4\mu\text{m}$ 时, 其变化对器件性能的影响可以忽略不计, 本文中 $d = 5\mu\text{m}$ 。

* 国家自然科学基金(批准号: 60177012) 和国家重点基础研究发展计划(批准号: G1999033104) 资助项目

陈克坚 男, 1978 年出生, 硕士研究生, 从事光开关器件研究。

江晓清 男, 1959 年出生, 教授, 现从事集成光子器件研究。Email: iseejxq@zju.edu.cn

2003-03-19 收到, 2003-06-19 定稿

© 2004 中国电子学会

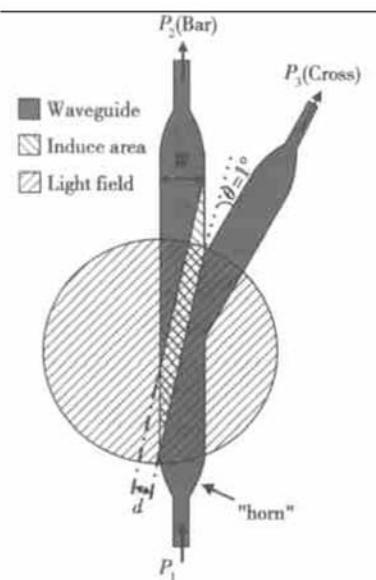


图 1 基于 TIR 的改进型 Y 分叉结构

Fig. 1 Structure of improved Y branch based on TIR

2.2 器件制作

采用湿法腐蚀和反刻法制作脊波导工艺简单，并能够克服常用剥离法中存在的问题。因此本文采用了反刻法来制作波导及其铝膜通光窗口(铝膜要达到一定厚度约 200nm 左右，这样才能起到挡光作用)。

图 2 是经过反刻法制备的 Y 分叉全内反射型全光开关的俯视图。通过在器件表面覆盖铝层来作为阻挡层，从而对控制光的照射区域进行合理的限制。

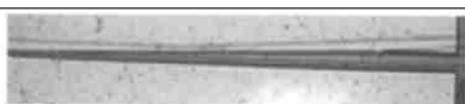


图 2 Y 分叉俯视图(表面是铝阻挡层)

Fig. 2 Planform of Y-branch (covered with Aluminium)

根据器件设计的要求，在刻蚀脊型扩展波导时将脊高做成 0.9μm。图 3 给出了扩展波导的截面图。图中 $x = 0.07$ 。

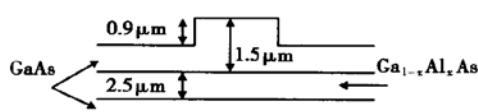


图 3 波导截面图

Fig. 3 Sectional view of waveguide

2.3 器件测试及性能分析

全光开关的研制对实验条件的要求十分高，针对我们目前的条件采用了以下的实验及测试装置，其组成如图 4 所示。目前本实验测试系统只能对输出光场、消光比以及串音等性能指标做初步的测量和分析，对于高精度要求的测量还需今后在完善测试系统的条件下才能进行。实验中输入信号光实际功率约在 0.1~0.2mW，控制光为带多模光纤($\Phi=100\mu\text{m}$)的 805nm 可变半导体激光器(功率 0~1.5W，可变)。

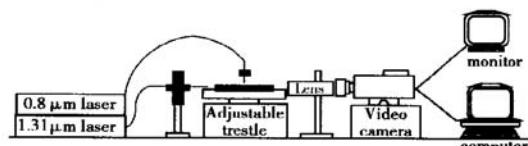


图 4 实验测试系统

Fig. 4 Experimental test system

从图 5 可以清晰地看到 Y 分叉全光开关在控制光的控制下完成了开关动作。我们采用光斑图像亮度采集来测量消光比的方法，即通过对图像亮度

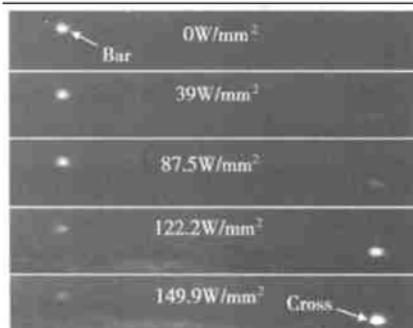


图 5 近场输出

Fig. 5 Near-field output

采集(不同亮度对应 0~255 之间的不同数值表示)，再对光斑数据进行高斯曲线拟合(如图 6 所示)、求和，测得输出光斑的相对光能量大小。实验近似测得在控制光功率密度为 150W·mm² 时(对应的有效功率约 75mW)，其消光比分别达 18dB(cross 端)以上和 8dB (bar 端)。之所以 bar 端的消光比较低是因为铝通光窗口有 600μm 长，而注入光斑的直径只有约 100 多微米，由于控制光的照射范围未能与器件设计要求十分匹配而造成了 bar 端的低消光比，这也是以后需要进一步改进的问题。对于图 5 中图像右侧亮度的增加量要略大于左侧的减小量的现

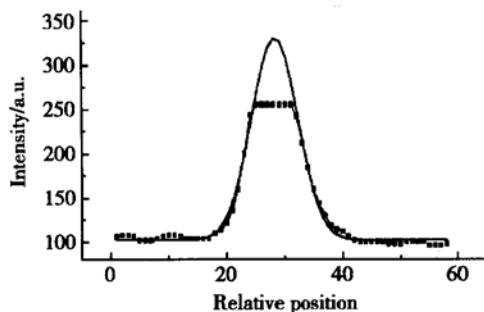


图 6 高斯拟合曲线

Fig. 6 Curve of Gaussian fit

象, 我们分析其主要原因是由于衬底有明显的漏光, 造成整幅图像亮度增加, 加上摄像机的非线性严重和制作波导的不均匀性引起的。

根据所使用的材料和控制方式来看, 开启时间主要由控制源来决定, 由于是用光来激发, 所以开启时间可以达到皮秒数量级, 这一点从参考文献[1, 2, 5]等中可以得到证实; 而恢复时间则与材料和器件结构等有关, 一般对 GaAs 体材料在纳秒量级^[13], 但可通过外加偏置等手段提高到皮秒量级。

3 光注入机理探讨

近年来的研究表明, 当波导中载流子浓度发生变化时(只要浓度变化达到一定的数量级, 如 10^{18} cm^{-3} 以上)就会引起比较明显的折射率变化。我们知道光照射到半导体材料上会被吸收, 进而激发出电子-空穴对, 使得半导体材料中的非平衡载流子增多。

在我们的前期研究中得出了光生载流子对折射率影响的分析模型^[14]。该分析模型考虑到自由载流子吸收效应和带填充效应的综合影响结果, 最终得出在注入光(大光强)照射下所引起的传输工作光对应的波导折射率变化在 z 轴(注入光的传输方向)上的分布情况。

$$\Delta n = \Delta n_{te}(\Delta N, \lambda_t) + \Delta n_b(\Delta N, \Delta P, E) \quad (1)$$

其中 Δn_{te} 是自由载流子对折射率改变的贡献项; Δn_b 是带填充效应对折射率变化的贡献项; 参数 $E = hc/\lambda$; $\Delta N = \Delta P = \sqrt{I_0 \alpha_c \beta (1 - R) e^{-\alpha_c z} / h v_e B_r}$ 。上式中包含着两种光束的参数, 为了区别, 下标为 t 的是传输工作光, 下标为 c 的是注入光。

根据该分析模型进行理论模拟, 对于 GaAs 半导体材料, 其折射率为 3.6, 量子效率约为 1, 反射系

数约为 30%, 禁带宽度为 $E_g = 1.42 \text{ eV}$, 复合效率可根据实验数据估算得 $B_r = 5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$ ^[15], 如果传输工作光的波长采用 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 时, 控制光光强达到 98 W/mm^2 便能在波导纵深(控制光入射方向) $1 \mu\text{m}$ 处得到 0.01 的折射率变化量(即达到了 10^{-2} 数量级)。

因此这个理论模型与实验结果基本吻合(同一个数量级)。理论和实验之间的误差可能是因为理论上不够完善以及实验测量的精度不够而造成的, 有待进一步完善。

4 总结

本文主要介绍了一种 GaAs 材料的 Y 分叉全内反射型全光开关。实现了用光(非同向注入方式)作为控制源的全光开关的开关动作, 并在理论上做了初步分析, 建立了一套较符合实验结果的理论模型。虽然这种全内反射型全光开关的实验还是初步的, 但光注入光开关具有重要的应用前景, 随着研究的深入, 其性能必将进一步改善, 可望成为一种实用化的高速光开关。

参考文献

- [1] Ueno Y, Nakamura S, Tajima K. Ultrafast 168GHz 1.5ps 1fJ symmetric-Mach-Zehnder-type all-optical semiconductor switch. Jpn J Appl Phys, 2000, 39Part 2(8A): L806
- [2] Kobayashi H, Takahashi R, Matsuoka Y, et al. Over 1-Tbit/s demultiplexing using low-temperature-grown InGaAs/In-AlAs multiple quantum wells. Indium Phosphide and Related Materials, 1998 International Conference, May 1998: 821
- [3] Wang Xiuyan, Wu Chongqing, Tao Ying, et al. Research advances in optically controlled optical switch. Semiconductor Optoelectronics, 2000, 21(6): 377 (in Chinese) [王秀彦, 吴重庆, 陶滢, 等. 光控光开关的研究进展. 半导体光电, 2000, 21(6): 377]
- [4] Sakamoto T, Futami F, Kikuchi K, et al. All-optical wavelength conversion of 500-fs pulse trains by using a nonlinear-optical loop mirror composed of a highly nonlinear DSF. IEEE Photonics Technol Lett, 2001, 13(5): 502
- [5] Nakamura S, Ueno Y, Tajima K. Ultrafast all-optical switching using a frequency shift accompanied by cross-phase modulation in a semiconductor optical amplifier. CLEO, 2001: 348
- [6] Akiyama T, Georgiev N, M ozume T, et al. 1.55-μm picosecond all-optical switching by using intersubband absorption in InGaAs-AlAs-AlAsSb coupled quantum wells. IEEE Photon-

- ics Technol Lett, 2002, 14(4): 495
- [7] Murata H, Izutsu M. Light-induced index change with a fast response time and nonlinear absorption in the waveguide of a novel organic quinoid dye. J Opt Soc Am B, 1998, 15(2): 884
- [8] Loka H S, Smith P W E. Ultrafast all-optical switching with an asymmetric Fabry-Perot device using low-temperature-grown GaAs: material and device issues. IEEE J Quantum Electron, 2000, 36(1): 100
- [9] Sharping J E, Fiorentino M, Kumar P, et al. All-optical switching based on cross-phase modulation in microstructure fiber. IEEE Photonics Technol Lett, 2002, 14(1): 77
- [10] Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui, et al. Study of 1×2 total-internal-reflection thermo-optic polymeric switches. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(7): 741 (in Chinese) [杨建义, 江晓清, 杨方辉, 等. 1×2 全内反射型有机聚合物热光开关的研制. 半导体学报, 2002, 23(7): 741]
- [11] Zhuang Wanru, Lin Wenhua, Yang Peisheng, et al. Carrier-injected GaAs/GaAlAs total internal reflection optical switch. Chinese Journal of Semiconductors, 1993, 14(1): 1 (in Chinese) [庄婉如, 林雯华, 杨培生, 等. 载流子注入全内反射型GaAs/GaAlAs光波导开关. 半导体学报, 1993, 14(1): 1]
- [12] Zhan Hengzheng, Jiang Xiaoqing, Chen Kejian, et al. Analysis of Y branch switch based on total internal reflection of multi-modes waveguide. Acta Optical Sinica, 2003, 23(10): 1187 (in Chinese) [占恒正, 江晓清, 陈克坚, 等. 扩展多模波导全内反射型Y分叉开关的分析. 光学学报, 2003, 23(10): 1187]
- [13] Cheng Z Y, Tsai C S. Optically activated integrated optic Mach-Zehnder interferometer on GaAs. Appl Phys Lett, 1991, 59(18): 2222
- [14] Chen Kejian, Yang Ailing, Jiang Xiaoqing. The analysis of the model of the change in refractive index of semiconductor induced by photo-induced carriers. Optical Instruments, 2002, 24(4~5): 34 (in Chinese) [陈克坚, 杨爱龄, 江晓清. 光生载流子对半导体波导材料折射率影响的模型研究. 光学仪器, 2002, 24(4~5): 34]
- [15] Adams A R, et al. Character of GaAs. Beijing: Science Press, 1990 (in Chinese) [亚当斯 A R, 等. 砷化镓的性质. 北京: 科学出版社, 1990]

Asymmetric Y-Branching TIR All-Optical Switch*

Chen Kejian, Tang Yi, Zhan Hengzheng, Yang Ailing, Li Xihua,
Wang Minghua and Jiang Xiaoqing

(Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on the theory of total internal reflection (TIR) and injection effect of photo-induced carriers, a Y-branching TIR all-optical switch is fabricated. When the controlling optical intensity (wavelength is 805nm) is 150W/mm², the extinction ratio is 18dB for $\lambda = 1310\text{nm}$. The switching mechanics of optical injection is simply discussed.

Key words: Y-branching; total-internal-reflection; all-optical switch

PACC: 5270K; 5275K; 4280S; 4282

Article ID: 0253-4177(2004)04-0468-04

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60177012) and Major State Basic Research Development Program in China (No. G1999033104)

Chen Kejian male, was born in 1978, graduate student. His research field is optical switches.

Jiang Xiaoqing male, was born in 1959, professor. His major research fields included integrated optical devices.