

文章编号: 1001-3806(2004)04-0355-04

基于 LiNbO₃ 波导的共线集成声光器件

李晓惠, 杨亚培

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 回顾了基于 LiNbO₃ 波导的共线声光器件的研究进展。介绍了该类器件在光束偏转和调制、信号处理、光计算等领域的应用现状, 并展望了该类器件的研究发展方向。

关键词: 共线声光; LiNbO₃ 波导; 集成光学; 器件

中图分类号: TN25; TN65 **文献标识码:** A

Integrated collinear acousto-optic devices based on LiNbO₃ waveguide

LI Xiaohui, YANG Yapei

(School of Photo-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The research development of integrated collinear acousto-optic devices based on LiNbO₃ waveguide is reviewed. The application of such devices in light deflection and modulation, signal processing and optical calculating is described. The future development of research for these devices is introduced briefly.

Key words: collinear acousto-optic; LiNbO₃ waveguide; integrate optic; devices

引 言

声光技术自 60 年代初激光器问世后兴起, 至今已有近 40 年的发展历程, 随着光通信技术、微声技术及声光介质材料的发展, 利用声光效应研制的声光器件不仅在激光束偏转和调制方面得到广泛应用, 而且在信号处理、光计算、光通信等领域也显示出非常显著的优势^[1~7]。

声光器件可归为块体及波导型两大类。块体声光器件利用体波声光效应研制而成, 其研究起步较早, 已趋于成熟, 在许多领域得到重要应用, 但其体积、驱动功率及带宽的极限难以突破。波导型声光器件利用表面声光效应, 易实现平面集成, 大大缩小了器件尺寸, 且光能和声能都至少在一个方向上受到限制, 因而能量密度大、效率高, 使器件的驱动功率以及带宽得到显著改善。

根据声波与光波的传播方向, 又可把波导型声光器件分为共线型和非共线型。前者由于声光共线, 声光作用更充分, 较后者在相互作用长度、效率及功耗等方面有显著的优势, 并且易于集成、可实现多

通道及模式转换。因此, 波导型共线声光器件的研究逐步受到广泛关注。

回顾了近年波导型共线声光器件的研究进展。介绍了该类器件在光束偏转和调制、信号处理、光计算、光通信等领域的应用现状, 并展望了波导型共线声光器件的研究发展方向。

1 波导型共线声光器件的工作原理

波导型共线声光器件的基本结构如图 1 所示, 利用叉指换能器 (IDT) 激励的声表面波与入射的光波之间的共线声光作用, 实现光波模式的转换 (TE → TM 或 TM → TE), 并使光波产生等于声波频率的频率漂移。

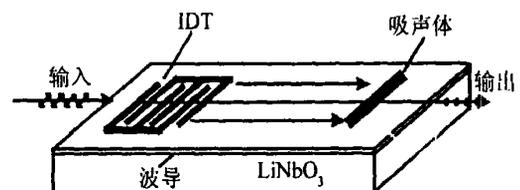


图 1 共线声光集成光学器件的结构示意图

共线声光作用的模式转换效率由下式表示^[8]:

$$\eta = \eta_0 (l^2 / W) P_a \sin^2 A / A \quad (1)$$

式中, $A = \eta_0 (l^2 / W) P_a + (1 / 2\Delta K l)^2$, P_a 为声波总功率, W 和 l 分别为声光作用区域的宽度和长度, η_0 是模式转换因数 (由光弹耦合系数和声光场的重叠

作者简介: 李晓惠 (1979-), 女, 硕士研究生, 主要从事共线集成声光器件方面的研究工作。

E-mail: straggle@163.com

收稿日期: 2003-09-24; 收到修改稿日期: 2003-10-08

积分决定), 相位失配量 $\Delta K = \beta_{TE} - (\beta_{TM} + K)$ 。

当相位匹配, 即相位失配量 $\Delta K = 0$ 时, 模式转换效率为:

$$\eta = \sin^2\{[\eta_0(l^2/W)P_a]\} \quad (2)$$

由(2)式可以看出, 共线声光作用的模式转换效率由模式转换因数 η_0 、声光作用区域尺寸 W, l 以及声功率 P_a 共同决定。但在实际应用中, 声功率以及声光作用区域的尺寸越小越好, 因而只能通过增大模式转换因数来达到提高模式转换效率的目的。增大模式转换因数的途径有两种: (1) 选取具有较大光弹系数的材料及晶体取向; (2) 增大声场和光场的重叠积分, 即改善声场与光场的重叠情况, 使其相互之间的作用更加充分。

2 波导型共线声光器件的研究进展

目前, 制作波导通常采用 Ti 扩散和质子交换两种工艺。自上个世纪 70 年代起, 采用 Ti 扩散制作的共线声光波导器件得到了广泛的研究^[8~12], 在波导结构、IDT 设计、工艺条件等许多方面得以完善, 极大地改善了这类共线声光波导器件的性能。而质子交换工艺并不十分成熟, 基于质子交换波导共线声光器件的研究仍处于理论分析阶段^[13~17]。

2.1 用 Ti 扩散工艺制作光波导的共线声光模式转换器

图 2 为研究初期基于 Ti 扩散光波导的共线声光 TE-TM 模式转换器^[9]。这种方案结构简单, 但声场能量分散在整个基底表面, 因而其声光带宽较窄, 模式转换效率不高。

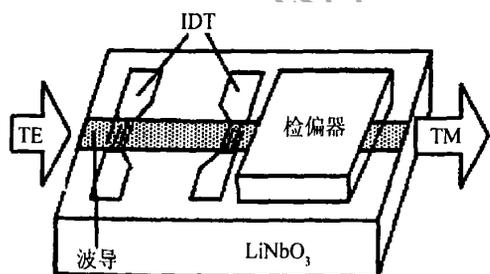


图 2 共线声光 TE-TM 模式转换器

为改善器件带宽较窄的问题, 并提高模式转换效率, 一些科研工作者开始考虑在器件上制作声波导, 给声波一定的横向约束, 使声场与光场更好地重叠在一起, 作用更加充分, 来获取更高的模式转换效率和较宽的带宽。

1980 年, BINH 等人研制出如图 3 所示的器件^[10]。器件中 3 条波导均采用钛扩散工艺制作, 中间为光波导, 两侧的波导作为声波传输的快速区, 在这两条波导之间就形成了声波的波导区域。器件带

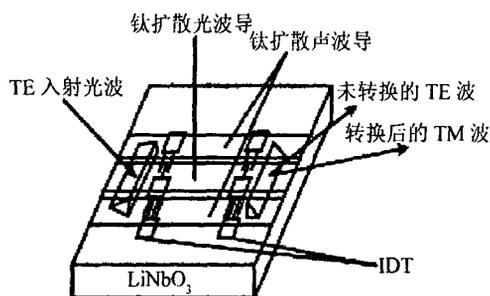


图 3 宽带共线声光模式转换器

宽在中心频率 550MHz 时达到 5%, 声功率在不大于 1mW 时便可达到 50% 的模式转换效率。

1988 年, HINKOV 等人提出另一种改进的方案, 如图 4a, 图 4b 所示^[8]。该方案用 Ti 扩散工艺制作波导作为光波导, 采用质子交换工艺制作声波导, 图 4a 所示声波导与光波导均为平板波导, 图 4b 所示器件则采用条形波导作为声波波导及光波导。

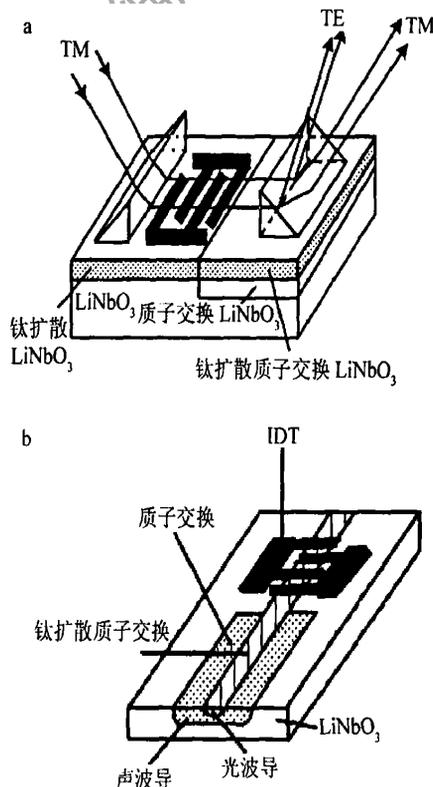


图 4 采用质子交换钛扩散波导的共线声光模式转换器

a—声/光波导均为平板波导 b—声/光波导均为条形波导

实验测试结果表明^[8], 器件采用如图 4a 所示平板波导, 在声功率 500mW, 声频 87MHz 以及 175MHz 时模式转换效率可达 90%。而采用如图 4b 所示条形波导器件, 由于光波与声波在横向所受到的约束更强, 只需 0.3mW 的声功率便可达到 50% 的模式转换效率。

国内在这方面的研究起步较晚, 相关报道甚少。1996 年, 华中理工大学傅焰峰和天津大学胡鸿章等

人先后研制成基于 Ti 扩散沟道波导的共线声光 TE-TM 模式转换器^[11,12]。前者在波长 1.152 μm , 中心频率 241.8MHz 时转换效率可达 95%, 波长半宽度 1.26nm^[11], 后者的中心频率为 175MHz, 在 1.55 μm 波长下得到 70% 的转换效率, 带宽为 6nm^[12]。

2.2 用质子交换工艺制作平板波导的共线声光模式转换器

质子交换技术不但制作简便快捷、成本低廉, 并且由它制备的 LiNbO₃ 波导具有较小的波导损耗、较强的抗光折变能力, 而且仅能传输一种偏振模式, 容易实现偏振控制^[18]。从上世纪 80 年代初起, 已有对基于质子交换光波导共线声光器件的研究报道。

1984 年, KORABLEV 报道了在 LiNbO₃ 质子交换光波导中实现导模到辐射模衍射的研究结果^[13]。1990 年, DAWAR 等人给出了在 y 切 LiNbO₃ 质子交换平板波导中声光作用的部分测试结果^[14], 并与 Ti 扩散波导中的相关参数进行比较, 当驱动电功率均为 300mW 时, 前者的衍射效率为 39%, 后者为 22%, 动态范围分别为 22dB 和 25dB。同年, 上海交通大学李劼对质子交换 LiNbO₃ 平板波导中的声光共线作用进行了实验研究^[13]。

近年, TSAI 等人对质子交换平板波导型共线声光器件中的声光效应作了较为详尽的理论分析^[15~17]。器件结构如图 5 所示^[15], 入射光与声表面波在波导层中相互作用后, 光波产生模式转换, 成为泄漏模进入衬底层传输。在器件输出端, 没有产生衍射的光束沿波导层水平射出, 而衍射光从衬底层以一定角度 γ 出射, γ 由入射光波的传播常数, 声波的传播常数, 光波在自由空间的传播常数以及衬底层寻常光折射率共同决定。

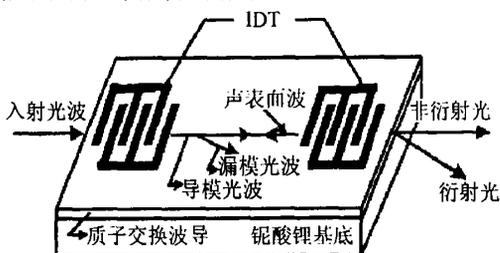


图 5 质子交换平板波导共线声光模式转换器

理论计算结果显示^[17], 在 x/yLiNbO₃ 中, 作用长度 20mm, 声驱动功率 10mW/mm、波导厚 0.25 μm 时模式转换效率可达 47%。若选用 z 切 LiNbO₃, 波导厚度增加到 1.0 μm , 声驱动功率 50mW/mm, 作用长度 40mm 时, 中心频率 460MHz, 不仅可以达到 42% 的模式转换效率, 声光带宽也将提高到 70MHz。

3 共线集成声光器件的应用

基于 LiNbO₃ 波导的共线集成声光器件, 可构成集成光学调制器、光开关、滤波器以及矩阵乘法器等, 在集成光学信号处理、光计算、光通信系统中有着广阔的应用前景。

3.1 波导型共线声光器件用于实现光束的二维偏转

实现光束的偏转和调制, 是对声光效应最直接的应用。如图 6 所示^[11], 入射光束先后与 IDT-1, IDT-2 激励的声表面波产生非共线及共线声光作用, 实现对光波的二维偏转。当光束宽 2mm、作用长度 2cm、IDT 电驱动功率 0.3W 时, 其衍射效率为 1%, 信噪比为 35dB。

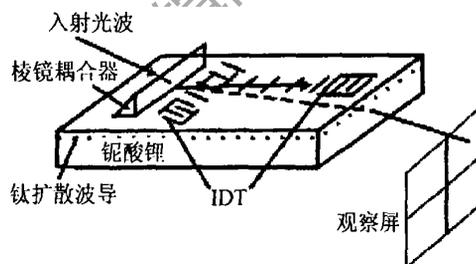


图 6 二维共线声光偏转器

3.2 波导型共线声光器件在信号处理中的应用

图 7 所示为一种二维傅里叶共线声光处理器^[1]。宽激光光束与声表面波作用后, 经二维傅里叶变换透镜处理, 输出一个发生二维偏转并与频率相位相关的信号光束。器件存取信息时间约 10 μs , 其时间带宽积可达 2×10^4 。

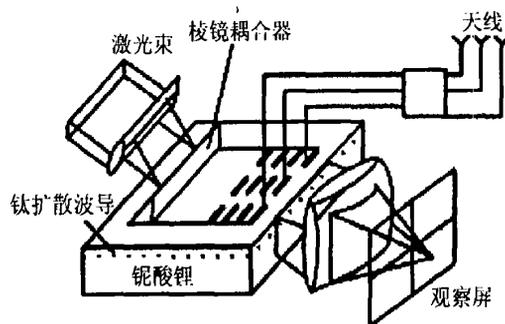


图 7 共线声光相阵天线信号傅里叶处理

同时, 共线声光作用也已在射频频谱分析技术中得到初步应用。俄罗斯科学院无线电工程与电子所于 1996 年研制成功共线声光射频频谱分析器^[2], 声功率为 25mW 时可获得 1% 的衍射效率, 中心频率 460MHz, 带宽 60MHz, 频率分辨率 0.2MHz, 信道数 200, 动态范围高达 35dB。

3.3 波导型共线声光器件在其它领域的应用

由于声光效应中的衍射光强度为入射光强度与

衍射效率的乘积,因此,可利用声光效应实现乘法运算。利用声光器件可并行处理的特点,可获得相当高的运算速度^[3,4]。

此外,波导型共线声光器件具有相当优越的可调谐波长选择性及高集成度。可构成 WDM 光开关系统中的开关器件,交叉连接器以及 WDM 网络中的可调谐滤波/隔离器和插分复用器,实现 WDM 系统中的波长选择及光信号路由,在 WDM 系统中具有很大的应用潜力。因此,这类器件近年来正日益受到重视,其理论研究工作也取得了长足的进步^[5~7]。

4 结 论

基于波导的共线声光器件在近 30 年取得了很大发展,在许多领域里得到了重要的应用,并显示出其极具潜力的优势。随着共线声光波导器件在各个领域中的应用日益广泛,器件性能亟待改善。为了获得高性能的共线声光波导器件,目前可以从几个方面加以解决:(1)改进波导结构,使声、光场能量更加集中,并更好地重叠在一起,可采用质子交换沟道波导作为声/光波导的结构;(2)完善波导制作工艺,使之能够准确地控制波导折射率的分布,以便实际制作过程与理论设计更好的吻合,从而达到预先设计的参数指标;(3)完善叉指换能器的设计和制作,使其具有更低的驱动功率;(4)根据实际应用需求,平衡器件衍射效率、带宽以及声光处理速度之间的矛盾。

随着对波导中共线声光作用理论分析的进一步深入,对共线声光器件性能的不断完善,可以预料,共线集成声光波导器件的应用范围必将更为广阔。

参 考 文 献

- [1] PROKLOV V V, KORABLEV E M. Multichannel waveguide devices using collinear acoustooptic interaction [A]. IEEE Proc 1992 Ultrason symp [C]. Tucson: IEEE, 1992. 173~178.
- [2] KORABLEV E M, KURSKII V N, PROKLOV V V. Guided wave AO spectrum analyzer for mobile telecommunications [A]. IEEE Proc 1996 Ultrason Symp [C]. San Antonio: IEEE, 1996. 849~852.
- [3] GOTO N, MIYAZAKI Y. Optical digital matrix - vector processor using collinear guided-wave acoustooptic interaction [A]. IEEE Proc 1990 Ultrason Symp [C]. Honolulu: IEEE, 1990. 613~616.
- [4] PROKLOV V V, BYSHEVSKI-KONOPKO O A, KURSKII V N. Advances in acoustooptic digital computations via analog convolution in spectrum domain [A]. IEEE Proc 1999 Ultrason Symp [C]. Caesars Tahoe: IEEE, 1999. 609~612.
- [5] MIYAZAKI Y, GOTO N. High-speed collinear acoustooptic switches for wavelength division multiplexing photonic switching by gigahertz SAWs [A]. IEEE Proc 1998 Ultrason Symp [C]. Sendai Miyagi: IEEE, 1998. 1297~1300.
- [6] MIYAZAKI Y, GOTO N. Optical integrated wave separator and matrix switch using waveguide-type AO couplers for WDM systems [J]. Fifth Asia Pacific Conference on Communications and Fourth Optoelectronics and Communications Conference, 1999(2): 1561~1564.
- [7] MIYAZAKI Y, GOTO N. Tunable matrix switches and routers consisting of waveguide-type acoustooptic separators with SAW for WDM systems [A]. IEEE Proc 2002 Ultrason Symp [C]. Munich: IEEE, 2002. 605~608.
- [8] HINKOV V, OPITZ R, SOHLER W. Collinear acoustooptical TM-TE mode conversion in proton exchanged TiLiNbO₃ waveguide structures [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1988, 6(6): 903~908.
- [9] OHMACHI Y, NODA J. LiNbO₃ TE-TM mode converter using collinear acoustooptic interaction [J]. IEEE J Q E, 1977, QE13(2): 43~46.
- [10] BINH L N, LIVINGSTONE J. A wide-band acoustooptic TE-TM mode converter using a doubly confined structure [J]. IEEE J Q E, 1980, QE16(9): 964~971.
- [11] 傅焰峰, 李佐宜, 李涛. TiLiNbO₃ 声光 TE-TM 模式转换器的制作 [J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(10): 70~72.
- [12] 胡鸿章, 戴和义, 赵慈. 共线声光耦合的集成光学 TE/TM 模转换器 [J]. 光子学报, 1997, 26(4): 340~344.
- [13] 李 劬. 质子交换 LiNbO₃ 波导中声光共线相互作用的实验研究 [J]. 量子电子学, 1990, 7(2): 156~160.
- [14] DAWAR A L, JOSHI J C. Acousto-optic interaction at 520MHz in proton-exchanged Y-lithium niobate waveguides [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2(11): 815~817.
- [15] MATTEO A M, DO N, TSAI C S. Collinear acousto-optical in proton-exchanged lithium niobate waveguides [J]. Proc SPIE, 1996, 2695: 325~334.
- [16] DO N T, SU J, YOO J. High-efficiency acoustooptic guided-mode to leaky-mode conversion in proton-exchanged lithium niobate waveguides [A]. IEEE Proc 1999 Ultrason Symp [C]. Caesars Tahoe: IEEE, 1999. 613~616.
- [17] MATTEO A M, TSAI C S, DO N. Collinear guided wave to leaky wave acoustooptic interactions in proton-exchanged LiNbO₃ waveguides [J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr, 2000, 47(1): 16~28.
- [18] 张德龙, 丁桂兰, 崔宇明. 质子交换 LiNbO₃ 光波导 [J]. 物理学进展, 2001, 21(1): 45~65.