

文章编号: 0258-7025(2004)01-0033-04

高频补偿倾斜电极型宽带声光 叉指换能器

林航友¹, 宁继平¹, 胡鸿璋², 王顺权², 耿凡³

(天津大学¹精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息技术科学开放实验室,²应用物理系, 天津 300072)
³ 航天部 8358 研究所第三院, 天津 300192

摘要 提出了一种新型的宽带声光表面波叉指换能器(SAW-IDT), 该换能器应用双梯形倾斜电极, 可对单梯形倾斜电极 IDT 通带的高频成分进行补偿, 使通带更宽更平直, 并无需外补偿网络。通过计算机模拟得出 IDT 的优化高频补偿因子 $\rho = 0.12$ 及其他的优化参数。该器件以 Y 切 X 传 Ti 扩散 LiNbO₃ 作为光波导, 以 ~ 150 nm 厚的 SiO₂/In₂O₃ 薄膜作为声波导, 声孔径 $W_0 = 110 \mu\text{m}$, 叉指对数 $N = 9$ 。IDT 的中心频率为 187.7 MHz, Bragg 声光带宽为 55.3 MHz, 通带斜率为 0.00, 通带凹陷深度 < 1.0 dB。当模转换效率为 99% 时, 测得射频(RF)驱动功率为 45 mW, 该器件可望作为 1.15~1.65 μm 红外频谱分析仪的分光器件。

关键词 集成光学; 声光可调谐滤波器; 声光表面波叉指换能器; 声光频谱分析仪

中图分类号 TN 256; TN 65 文献标识码 A

Wide-band Acoustooptical IDT with High-frequency Compensated Slanted Transducer Fingers

LIN Hang-you¹, NING Ji-ping¹, HU Hong-zhang², WANG Shun-quan², GENG Fan³

¹College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,
Optoelectronic Information Science & Technology Lab., MOE,
²Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072, China
³The 8358th Institute, The Third Academy, CASA, Tianjin 300192, China

Abstract A novel broadband acoustooptical (AO) surface acoustic wave interdigital transducer (SAW-IDT) scheme is presented, by using double-trapezia-electrode IDT to compensate high-frequency component of the slanted single-trapezia-electrode IDT. It makes flatter amplitude response and wider bandwidth than those of the single-trapezia-electrode IDT. At the same time, the external compensating network is eliminated. The optimal compensating factor $\rho = 0.12$ and other optimal parameters are found by computer simulation. In the device, Ti-diffused YX-lithium niobate substrate was applied as optical waveguide, a SiO₂/In₂O₃ film of thickness ~ 150 nm as SAW waveguide and an acoustical aperture of width $110 \mu\text{m}$, in conjunction with $N = 9$ finger pairs. This laboratory prototype shows Bragg acoustooptical bandwidth is 55.3 MHz at 187.7 MHz, its passband slope is 0.00 and hollow depth is less than 1.0 dB. The RF drive power is measured to be 45 mW at mode-conversion efficiency of 99%. The device is expected to be a integrated optics acoustooptical spectroscope in spectrometer for 1.15~1.65 μm .

Key words integrated optics; acoustooptical tunable filter (AOTF); surface acoustic wave interdigital transducer (SAW-IDT); acoustooptical spectrometry

收稿日期: 2003-03-28; 收到修改稿日期: 2003-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 10084001)资助项目。

作者简介: 林航友(1967—), 男, 浙江人, 天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 目前从事集成声光可调谐滤波器的研究。万方数据
E-mail: linyangyou@vip.163.com

1 引 言

近年来,集成光学声光频谱分析仪得到了迅速发展,其中声光可调谐滤波器(AOTF)是其核心器件,设计一个衍射效率高、通带平坦的宽带声光表面波叉指换能器(SAW-IDT)是关键。由于 IDT 电极的几何结构决定其衍射与频带特性,目前,带宽 IDT 的电极结构有多种形式,如单梯形倾斜电极^[1]、倾斜弯曲电极^[2]和变周期电极^[3]等。以上几种方案各有特点,单梯形倾斜电极 IDT 的通带随着射频(RF)频率的升高向高频倾斜,其声孔径限制着带宽和电极的最大倾角;倾斜弯曲电极 IDT 虽然能够减小通带斜率,但工艺要求和制作成本较高;变周期电极 IDT 虽然在带宽方面占有优势,但 RF 驱动功率较大,通带纹波明显。

本文针对以上各种宽带 IDT 的不足,提出了一种新型的高频补偿倾斜电极 IDT 结构。它采用双梯形结构电极,可通过调整高频补偿因子来改变通带斜率,无需外补偿网络。先给出了高频补偿倾斜电极 IDT 的传输响应函数,并考虑电极倾角对频带特性的影响,通过计算机模拟得到该器件的优化结构参数。IDT 的 Al 电极厚度 $\sim 0.5 \mu\text{m}$,采用 $110 \mu\text{m}$ 宽约 150 nm 厚的 $\text{SiO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 薄膜作为声波导,以 Y 切 X 传 Ti 扩散 LiNbO_3 作为光波导。在相同的声孔径条件下,该器件比单梯形倾斜电极 IDT 通带更宽,且通带不倾斜;与相同带宽的变周期电极 IDT 相比,该器件具有电极数少,RF 驱动功率小,带顶平滑无纹波的优点。

2 理论分析

声光表面波 IDT 电极的基本结构如图 1 所示,它由对顶的双梯形倾斜电极阵列组成。叉指电极对数为 N ,声孔径为 W_0 ,孔径宽度分别为 ρW 和 W , ρ 为高频补偿因子($0 \leq \rho \leq 1$),金属化率为 0.5。设孔径宽度为 W 的梯形倾斜电极阵列由 S 个平行于 x 轴的声孔径为 Δz ($0 < \Delta z < W$) 的声通道组成,每个声通道的电极周期相等。假设射频电压激发的声表面波源位于电极之间的中线处,并且相互独立^[4]。对于第 n 个同步频率为 f_n 的声通道,沿 x 轴方向与光波发生共线声光相互作用的声波传输响应函数为^[2]

$$H(f, f_n) = (\kappa^2 C_s \Delta z f_n)^{1/2} \sum_{m=1}^{2N-1} (-1)^m \times \left[-i \frac{2\pi f}{v_a(\theta_m)} (x - x_{n,m}) \cos \theta_m \right] \quad (1)$$

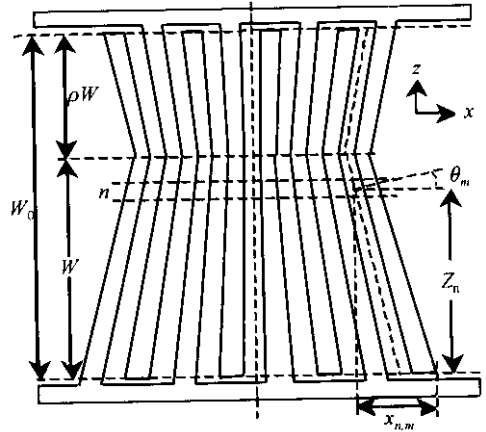


图 1 SAW-IDT 基本结构

Fig. 1 Basic configuration of surface acoustic wave interdigital transducers

式中 κ^2 为机电耦合常数, C_s 为单对叉指电极的电容率, f 为施加在电极上的 RF 频率, $v_a(\theta_m)$ 为传播方向与 x 轴夹角为 θ_m 的 SAW 速度, x 为考察点与 IDT 孔径端口的距离, $x_{n,m}$ 为第 n 个声通道的第 m 个声光表面波源与 IDT 孔径端口的距离。第 m 个声光表面波源的波矢量与 x 轴的夹角 θ_m 为

$$\theta_m = \tan^{-1} \left[m \frac{(1 + \rho) v_a(0) \cdot \Delta f}{2W_0 f_H f_L} \right] \quad (2)$$

式中, f_H 和 f_L 分别为高频和低频的截止频率, $\Delta f = f_H - f_L$ 为 IDT 的设计带宽。根据文献[4]的 Y 切 LiNbO_3 SAW 速度 v_a 随传播方向 x 轴的夹角 θ 的变化曲线,可得出相对速度随角度变化的拟合二次曲线($\theta \leq 20^\circ$)

$$\eta(\theta) = \frac{v_a(\theta)}{v_a(0)} = 1 + (5.934\theta - 3.838\theta^2) \times 10^{-5} \quad (3)$$

从式(3)可知,当 $\theta \leq 20^\circ$ 时, $\eta(\theta) < 1.5\%$ 。再利用电极的几何对称性,方程(1)可近似为

$$H(f, f_n) \cong (\kappa^2 C_s \Delta z \cdot f_n)^{1/2} \left[1 + 2 \sum_{m=1}^{N-1} \cos(Y_{n,m}) \right] \times \exp\left(-i \frac{2\pi f}{v_a} x\right) \quad (4)$$

式中 $Y_{n,m} = m\pi \frac{f_n - f \cdot \chi(\theta_m)}{f_n}$, $\chi(\theta_m) = \frac{\cos(\theta_m)}{\eta(\theta_m)}$ 。

第 n 个声通道的同步频率为

$$f_n = f_L \left(1 - \frac{n}{S} \cdot \frac{\Delta f}{f_H} \right) \approx f_L + n \cdot \delta f \quad (n = 0, 1, 2, \dots, S) \quad (5)$$

式中 $\delta f = \frac{f_L}{f_H} \cdot \frac{\Delta f}{S}$ 。最后,整个 IDT 的频率响应函

数为

$$H(f) = \sum_{n=0}^S H(f, f_n) + \sum_{n=(1-\rho)S}^S H(f, f_n) \quad (6)$$

3 模拟计算结果

图 2 是双梯形倾斜电极、单梯形倾斜电极和变周期电极 IDT 的频率响应特性曲线。双梯形倾斜电极与单梯形倾斜电极的对数 N 和声孔径 W_0 相同,分别为 9 和 $110 \mu\text{m}$ 。对于双梯形倾斜电极 IDT,由于采用高频补偿技术,通带斜率比单梯形倾斜电极 IDT 小,且带宽也相应增大。线性变周期电极 IDT 的电极周期数为 100,虽然带宽还可以增大,但是带内纹波幅度大于 2 dB。

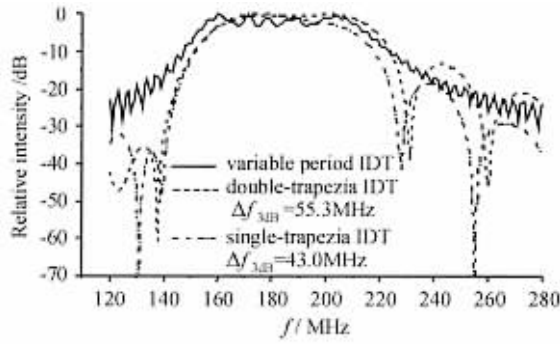


图 2 三种 SAW-IDT 的频率响应

Fig. 2 Frequency response of three types of SAW-IDTs

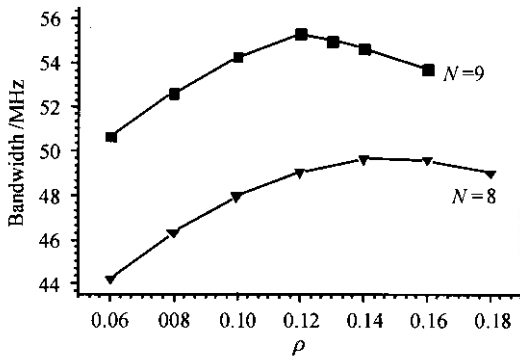


图 3 带宽随高频补偿因子 ρ 的变化

Fig. 3 Variation of bandwidth vs high-frequency compensating factor ρ

不同的叉指对数 IDT 的 3 dB 带宽随 ρ 变化如图 3 所示。当 $N = 9$ 时,电极的最大倾角小于 15° , $\rho = 0.12$ 时,具有最大带宽 $\Delta f_{-3\text{dB}} = 55.3 \text{ MHz}$,比 $\rho = 0$ 的单梯形倾斜电极 IDT 的通带约宽 12.3 MHz,并且其通带斜率为 0.00。带内凹谷深度小于 1.0 dB,带外抑制比 $>45 \text{ dB}$,其频率响应特性明显优于相同带宽的变周期 IDT。

4 实验结果

声光可调谐模转换器的几何结构与文献[5]相似。选用 Y 切 X 传 LiNbO_3 为基底材料,首先在 1050°C 下钛扩散 9.5 h 制作光波导和 TE/TM 模分离器,然后制作 9 对 $\sim 500 \text{ nm}$ 厚的铝叉指电极,金属化比 0.5,最后溅射厚约 150 nm ,宽 $110 \mu\text{m}$ 的 $\text{SiO}_2/\text{In}_2\text{O}_3$ 薄膜作为声波导,再经过抛光和连接尾纤等工艺,制成的准共线耦合 AOTF 结构如图 4 所示。

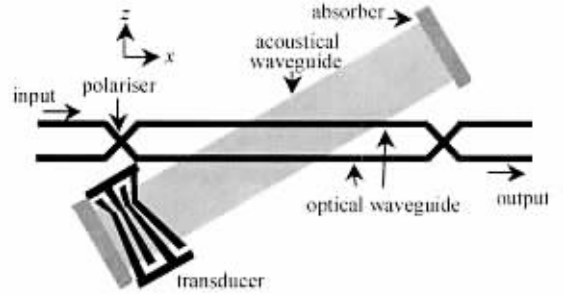


图 4 准共线耦合 AOTF 的基本结构

Fig. 4 Basic configuration of quasi-collinear coupled AOTF

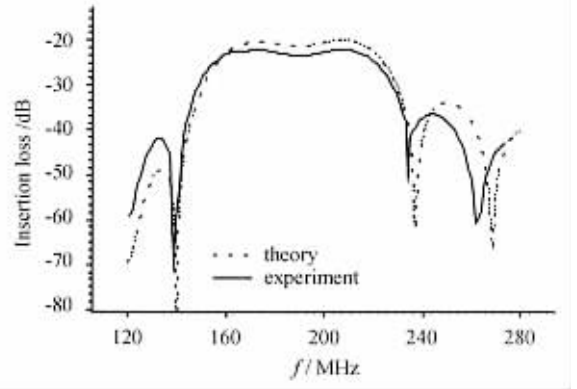


图 5 插入损耗随 RF 频率变化的理论和实验曲线

Fig. 5 Theoretical and experimental curves of insertion loss vs radio frequency

分别将相同结构 SAW-IDT 作为发射器和接收器,在未匹配情况下,测得的插入损耗随 RF 频率变化的理论和实验曲线如图 5 所示。从图中可以看出,通带基本保持平直不倾斜,实验和理论结果符合较好。

用波长 $1.523 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器作为光源,RF 驱动功率为 45 mW,并从 120 MHz 到 280 MHz 自动扫频,测得声光转换的衍射效率随 RF 频率的变化如图 6 所示。衍射效率随声波频率的变化与图 5 的插入损耗随声波频率的变化相似,因此采用双

梯形结构电极的 IDT,对单梯形结构电极的 IDT 进行高频补偿,可免除外匹配网络,能够满足集成光学 AOTF 作为红外频谱分析仪分光器件的要求。

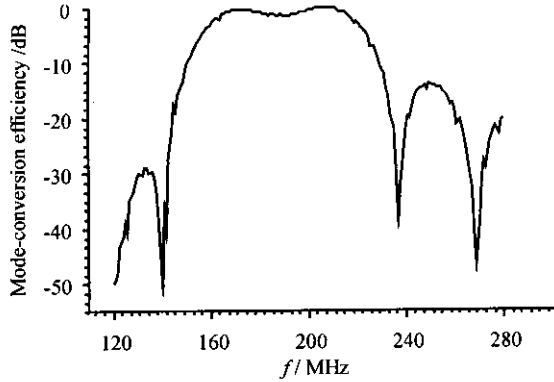


图 6 模转换效率随 RF 的变化

Fig. 6 Variation of mode-conversion efficiency vs radio frequency

5 结 论

对新型宽带声光表面波叉指换能器进行了理论

与实验研究,理论结果与实验结果基本吻合。结果表明高频补偿因子及叉指电极对数决定 IDT 的带宽及通带斜率,对于声孔径为 $110 \mu\text{m}$ 的 IDT,当高频补偿因子 $\rho = 0.12$,叉指电极对数为 9 时,可获得最大带宽及最平直的通带,并无需外补偿网络。采用该 IDT 结构的声光偏振模转换器在 $1.15 \sim 1.65 \mu\text{m}$ 范围内具有较高的转换效率。

参 考 文 献

- 1 N. J. Slater, C. K. Campbell. Improved modeling of wide-band linear phase SAW filters using transducers with curved finers [J]. *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, 1984, **SU-31**(1): 46~50
- 2 C. K. Campbell, Yanglin Ye. Wide-band linear phase SAW filter design using slanted transducer fingers [J]. *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, 1982, **SU-29**(6):224~228
- 3 D. Gregoris, V. M. Ristic. Wideband acousto-optical Bragg transducer for integrated optics [J]. *J. Modern Opt.*, 1988, **35**(6):979~985
- 4 David P. Morgan. *Surface-wave Devices for Signal Processing* [M]. New York: Elsevier Science Publishers B. V., 1985
- 5 H. Z. Hu, H. Y. Lin, J. S. Yang *et al.*. An intergrated quasi-collinear coupled acoustooptical mode converter [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **208**(7):79~83

征 订 启 事

由中国电子学会和中国光学学会联合主办,中国科学院上海光学精密机械研究所承办的第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行,会议论文集将由本编辑部以增刊形式出版。

本期增刊共收录了 170 多篇论文,约 600 多页,除以纸质媒体出版外,还将出版光盘版,出版时间为 2004 年 2 月。增刊定价为每册 100 元,光盘版为每张 50 元。如需订阅的单位或个人请将款项由邮局汇至上海市 800-211 信箱《中国激光》编辑部,邮编:201800。

《中国激光》编辑部

2004 年 1 月