

基于偏振模式转换的声光陀螺研究

路书祥 陈淑芬 付 雷 邹正锋 孟彦彬

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 提出一种基于偏振模式转换的声光陀螺, 分析其原理与结构并对该陀螺进行实验测试。静态测试结果表明, 当声光作用长度为 15 mm, 声表面波输入功率为 100 mW, 频率为 168.201 MHz 时, 偏振模式转化效率为 80.02%。在偏置条件下进行旋转测试, 得到输出电压随陀螺转速呈线性变化的曲线, 其灵敏度约为 $1 \text{ mV}/[^\circ/\text{s}]$ 。偏振型声光陀螺保留声表面波陀螺体积小、成本低等优点, 而在灵敏度上有大幅提高。

关键词 陀螺; 声光耦合; 偏振; 声表面波

中图分类号 TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0312002

Research of Acousto-Optical Gyroscope Based on Polarization-Mode Conversion

Lu Shuxiang Chen Shufen Fu Lei Zou Zhengfeng Meng Yanbin

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract A type of acousto-optic gyroscope based on polarization-mode conversion is presented, the principle and structure is analyzed and some tests of the gyroscope are carried out. The sensitivity of sensor is also given. The statical result shows that the coupling efficient is 80.02% when the length of acousto-optic interaction is 15 mm, the input electrical power of surface acoustic wave (SAW) is 100 mW and the frequency of SAW is 168.201 MHz. A linear voltage-rotation response curve of the gyroscope is obtained when rotating, and the sensitivity is $1 \text{ mV}/[^\circ/\text{s}]$. Acousto-optic gyroscope based on polarization-mode conversion keeps the advantage of SAW gyroscope, and the sensitivity is enhanced greatly.

Key words gyroscope; acousto-optic mode coupling; polarization; surface acoustic wave (SAW)

OCIS codes 120.4570; 280.4788; 160.1050; 230.1040

1 引 言

声表面波最早由 Lord Reyleigh 观测到并建立相关理论, 从此声波面波传感器问世并不断发展。1980 年, Lao^[1] 提出声表面陀螺效应, 即利用在介质中传播的声表面波来感应运动物体的角速率。由于声表面波陀螺具有尺寸小、重量轻、成本低和功耗低等优点, 其在微小型角速度传感器领域具有广阔的应用前景。2002 年 Varadan 研究小组在 128°YX 铌酸锂基底上制作驻波陀螺, 其实验灵敏度为 $2.75 \mu\text{V}/[^\circ/\text{s}]$ ^[2]。2007 年 Lee 等^[3] 在 ST 石英上制作双延迟线型陀螺, 实验灵敏度为 $0.431 \text{ Hz}/[^\circ/\text{s}]$ 。2009 年

Wang 等^[4] 对 Varadan 的设计方法提出改进, 同样在 128°YX 铌酸锂基底上制作驻波式陀螺, 其实验灵敏度为 $119 \text{ Hz}/[^\circ/\text{s}]$ 。虽然声表面波陀螺已有较大的发展, 但灵敏度等指标相比于普通的光纤陀螺, 仍需较大提高。

基于 TE/TM 模式转换的声光可调滤波器中采用声表面波与入射光相互作用, 通过改变声表面波频率实现输出光波长可调^[5,6]。依据声表面波陀螺效应, 在特定设计下, 角速度可通过声表面波作用于光波, 而光波的检测及光电放大等方法已经十分成熟^[7], 在此设计下可准确方便地检测角速率信息。

收稿日期: 2011-08-09; **收到修改稿日期**: 2011-09-30

基金项目: 北京理工大学研究生科技创新基金(GA200801)资助课题。

作者简介: 路书祥(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事集成光学、光纤传感和声表面波等方面的研究。

E-mail: lushusho@126.com

导师简介: 陈淑芬(1955—), 女, 博士, 教授, 主要从事集成光学和光信息等方面的研究。E-mail: chensf55@sina.com

然而普通声光可调滤波器在低转速情况下对角速率基本不敏感,其原因是低转速情况下压电介质中声波波速和频率随角速度变化本身就十分微弱^[8],需设置偏置点以使声波波速和偏振模式转化效率在初始时刻处于随角速度变化较快的位置,还有就是声光可调滤波器中压电晶体切向等选择不合适用于角速度的探测。

本文基于偏振模式转换的声光陀螺采用偏置设置方法——将声表面波波速和偏振耦合效率置于对角速率变化最为敏感的位置,通过声光相互作用的方法将陀螺效应提取并放大。

2 偏振型声光陀螺原理与结构

2.1 声表面波陀螺效应

对于半无限压电介质,由达朗贝尔原理及库伦定理可得力学运动方程和电学方程^[9]

$$\nabla \mathbf{T} - 2\rho\Omega \mathbf{j} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \rho\Omega^2 \mathbf{j}(\mathbf{j} \cdot \mathbf{u}) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}, \quad x_3 < 0 \quad (1)$$

$$\nabla \mathbf{D} = 0, \quad x_3 < 0 \quad (2)$$

式中 \mathbf{T} , \mathbf{u} , \mathbf{D} 和 ρ 分别为应力张量、位移矢量、电位移矢量和质量密度, Ω 为转动的角速率, \mathbf{j} 表示坐标轴方向的单位矢量,微分算子 ∇ 是三维空间中的梯度算子。根据压电材料基板上含有科里奥利力的声表面波耦合波方程^[10],即 Christoffel 方程有

$$C_{ijkl} u_{k,jl} + e_{kjl} \varphi_{,jk} = \rho [\ddot{u}_i + 2\xi_{ijk} \Omega_j \dot{u}_k - (\Omega_j^2 u_i - \Omega_i \Omega_j u_j)], \quad (3)$$

$$e_{jkl} u_{k,jl} - \epsilon_{jk} \varphi_{,jk} = 0, \quad (4)$$

式中 c_{ijkl} 为弹性系数, e_{kij} 为压电系数, ϵ_{ik} 为介电系数, ξ_{ijk} 是 Levi-Civita 符号, i, j, k, l 均取为 1, 2, 3, u

及 φ 分别为机械位移及电势, $u_{k,jl} = \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l}$, $\varphi_{,jk} =$

$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j \partial x_k}$, $\ddot{u}_i = \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}$, $\dot{u}_k = \frac{\partial u_k}{\partial t}$, Ω_i, Ω_j 分别为 i 和 j 方向

的角速度。

结合机械和电学边界条件:

$$\Gamma_{i3} = c_{i3kl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + e_{k3j} \frac{\partial \varphi}{\partial x_k} = 0, \quad (5)$$

$$e_{3kl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} - \epsilon_{3k} \frac{\partial \varphi}{\partial x_k} = -\epsilon_0 \frac{\partial \varphi}{\partial x_3}, \quad \varphi|_{x_3=0} = c \quad (6)$$

通过数值法求解耦合波方程组,可计算适合声表面波声光器件的铌酸锂晶体切割方向,最后筛选出 X 切 Y 传和 Z 切 Y 传最适合用于声光作用下角速度的探测,这里选用 X 切 Y 传铌酸锂晶体绕 Y 轴方向进行旋转,可求得角速度与声表面波波速的关

系图如图 1 所示,经二次曲线拟合可得

$$v_s = -3675.8(\Omega/\omega)^2 - 1618.5(\Omega/\omega) + 3687.6, \quad (7)$$

式中 Ω 为转动角速率, ω 为声波角频率,该数值解采用的铌酸锂材料常数如下^[11]: $\rho = 4647 \text{ kg/m}^3$, $C_{11} = 19.84 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_{33} = 22.79 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_{44} = 5.97 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_{12} = 5.47 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_{13} = 7.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $C_{14} = 0.79 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $e_{15} = 3.69 \text{ C/m}^2$, $e_{22} = 2.42 \text{ C/m}^2$, $e_{31} = 0.30 \text{ C/m}^2$, $e_{33} = 1.77 \text{ C/m}^2$, $\epsilon_{11} = 45.6 \times \epsilon_0$, $\epsilon_{33} = 27.3 \times \epsilon_0$, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

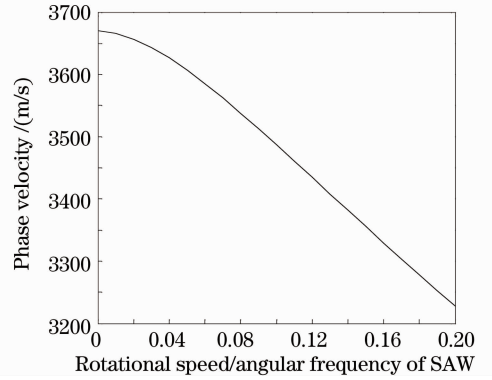


图 1 X 切 Y 传声表面波相速度与转速比关系图
Fig. 1 XY LiNbO₃ phase velocity versus rotational speed/angular frequency of SAW

2.2 声光作用与光学偏振态改变

声光作用时声场效果可看做对介电常数 ϵ 的微扰,建立波动方程^[12]

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \omega^2 u(\epsilon + \Delta\epsilon) \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (8)$$

当布拉格条件近似满足,可解得声光衍射效率为^[13]

$$\eta = \frac{|\kappa|^2}{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2} \sin^2 [L \sqrt{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2}] = \frac{P/P_0}{P/P_0 + 4N^2(\Delta f/f_0)^2} \times \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \sqrt{P/P_0 + 4N^2(\Delta f/f_0)^2} \right], \quad (9)$$

式中 κ 为机电耦合系数, $\Delta\beta$ 为传播常数变化量, $N = L/\Lambda$, 为声光长度 L 内的声波波数, L 为声光作用距离, P_0 为满足衍射效率为 100% 时的输入电学功率, P 为实际声表面波功率。

声表面波传播时波速与频率有关:

$$\Delta f/f_0 = \Delta v/v_0, \quad (10)$$

其中 $v_0 = 3687.6 \text{ m/s}$, 因 Ω/ω 值很小,将(7)式代入(10)式可得

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v_0 - v_s}{v_0} = \frac{1}{3687.6} [3675.8(\Omega/\omega)^2 + 1618.5(\Omega/\omega)] \approx \frac{0.44\Omega}{\omega}, \quad (11)$$

将(11)式代入(9)式中可得

$$\eta = \frac{P/P_0}{P/P_0 + 4N^2 \left(\frac{0.44\Omega}{\omega}\right)^2} \times \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_0} + 4N^2 \left(\frac{0.44\Omega}{\omega}\right)^2} \right]. \quad (12)$$

2.3 偏振型声光陀螺结构

采用集成光学技术,可将激光器,晶体振荡器,偏振器和光敏二极管等全部集成在一片 LiNbO₃ 晶体上,原则上可设计为光电集成电路(OEIC),以达到声光最佳作用及减少体积和功耗等优点,其结构如图 2 所示,但其只适用于大规模应用的环境,目前验证其原理采用如图 3 结构:选择 X 切 Y 传铌酸锂晶体,在其表面刻蚀一组叉指电极(IDT)做为声表面波(SAW)发射器,外界 1550 nm 光源加上起偏器后通过光波导,输出端接光电二极管后经信号处理电路提取放大。

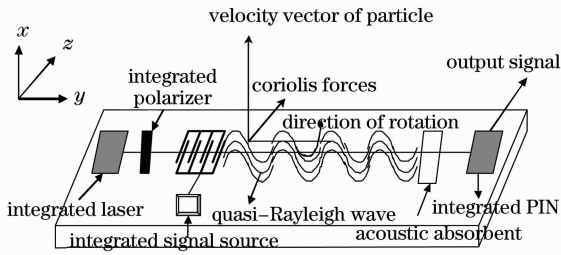


图 2 光电集成偏振型声光陀螺原理

Fig. 2 Principle diagram of OEIC acousto-optic gyroscope based on polarization-mode conversion

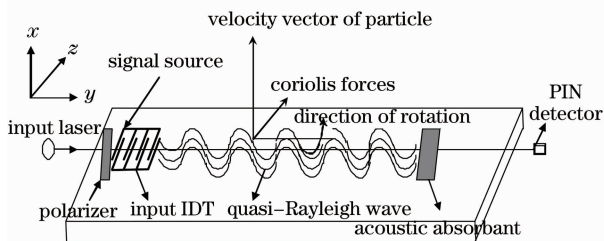


图 3 偏振型声光陀螺原理

Fig. 3 Principle diagram of acousto-optic gyroscope based on polarization-mode conversion

耦合模理论指出,由于光弹效应,SAW 传播时的媒质可近似为周期性介质,满足布拉格条件时,TE-TM 模式会发生强烈耦合影响输出光的偏振模

式^[14]。当该系统旋转时,铌酸锂晶体受到科里奥力的影响,力学运动方程相关参数的改变导致 SAW 频率将发生变化,布拉格条件将不再满足,从而影响 TE-TM 模式转化的效率,此时不同的角速率将对应不同的转化效率,则依此可设计声光偏振式陀螺^[15]。

3 实验与讨论

3.1 静态测试与偏置点设置

静态测试是为了检测实际样品的各种指标和确定动态工作点,图 4 为声表面波结构实物图,设计叉指换能器激发的声波频率为 170 MHz,对应的 IDT 周期和指条宽度分别为 16.8 μm 和 4.2 μm。图 5(a)为耦合效率随声表面波频率变化图,在 168.201 MHz 时对应的转化效率最大,这与理论设计基本一致。当声光作用长度为 15 mm,SAW 电学功率为 100 mW (驱动电压 10 V)时,模式转化效率为 80.02%。在 168.201 MHz 时调节 SAW 电学功率,与模拟曲线进行对比,基本符合变化趋势,如图 5(b)所示。在 0~10 V 电压驱动下,转化效率变化趋势与理论十分一致,因电路设计有限驱动电压大于 10 V 之后的测试数据没有做,转化效率也没有达到 100%。

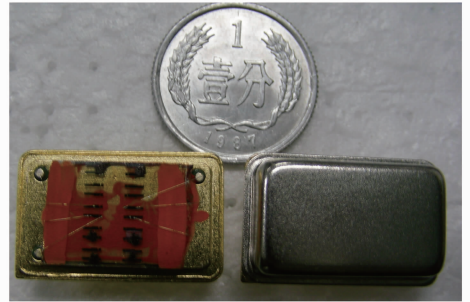


图 4 声表面波结构实物图

Fig. 4 Structure of SAW in acousto-optic gyroscope based on polarization-mode conversion

偏置点的位置的设置是为了把模式转化效率固定在随角速度变化率最快的位置,其对陀螺灵敏度有非常重要的影响。当转化效率为最大值的一半时其随角速度变化率最快,此时输出光强对 SAW 频率变化最敏感,故把偏置点选在 SAW 频率为 168.289 MHz,输入电学功率为 100 mW 的位置,采用(12)式计算此时模式转化效率,其值为 40.01%,符合偏置点位置要求。

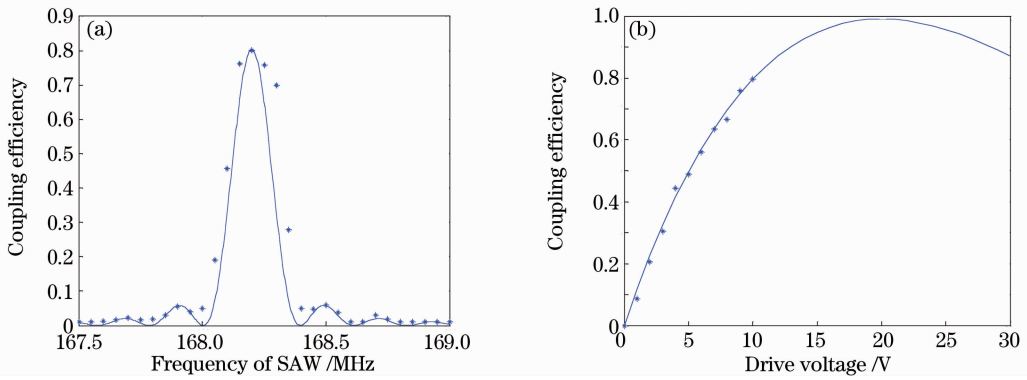


图 5 (a)耦合效率随声表面波频率变化图；(b)耦合效率随声表面波驱动电压变化图

Fig. 5 (a) Coupling efficiency versus frequency of SAW; (b) coupling efficiency versus drive voltage of SAW

3.2 旋转测试

旋转时压电介质受到科里奥力的作用从而改变 SAW 的频率, SAW 频率的微小变化都将改变光波的光强,之后输出光经光电转化和放大得到电压随角速度的变化曲线如图 6 所示。光源 1 采用功率稳定度为 0.01 dB/h 的分布反馈(DFB)激光器,当旋转速率较低时[小于 50 (°)/s],陀螺输出信号变化不明显,表现为非线性。当小于 10 rad/s 时输出电压基本没有变化,视为陀螺的锁区。随角速度增大,输出信号线性度趋于好转,灵敏度约为 1 mV/[(°)/s]。光源 2 采用功率稳定度为 0.05 dB/h 的激光器,其线性度变差,陀螺的锁区扩大。

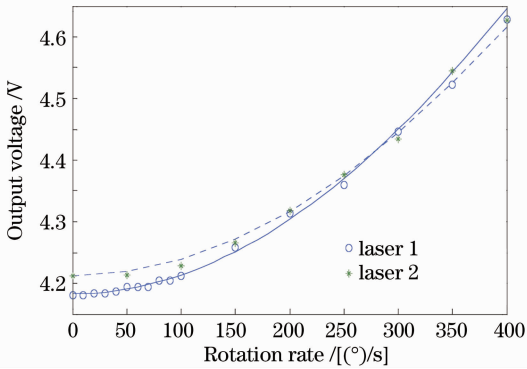


图 6 陀螺输出电压随角速度变化曲线图

Fig. 6 Output voltage of the gyroscope versus rotating rate

低转速时依据(12)式分析电压随角速度变化曲线,其应当继续下移程线性变化。事实上其线性度受光源稳定性, SAW 驱动信号源的稳定性和电源等噪声等影响而变差,所以进一步提高光源功率, SAW 频率稳定性及温度稳定性等将会使陀螺性能得到更大改进。

4 结 论

本文从声表面波传播方程出发,采用偏置设置方法,将声表面波波速和偏振耦合效率置于对角速率变化最为敏感的位置,通过声光相互作用的方法将陀螺效应提取并放大通过声光相互作用的方法将角速度信号提取并放大。基于偏振模式转换的声光陀螺保留声表面波陀螺微型化的优点,并在灵敏度上有大幅提高。

参 考 文 献

- 1 Binney Y. Lao. Gyroscopic effect in surface acoustic waves [C]. Ultrasonic Symposium, 1980. 687~691
- 2 K. Jose, W. Suh, P. Xavier *et al.*. Surface acoustic wave MEMS gyroscope[J]. *Wave Motion*, 2002, **36**(4): 367~381
- 3 S. Lee, J. Rhim, S. Park. A micro rate gyroscope based on the SAW gyroscopic effect[J]. *J. Micromech. Microengng.*, 2007, **17**(11): 2272~2279
- 4 W. Wang, O. Haekwan, L. Keekeun *et al.*. Enhanced sensitivity of novel surface acoustic wave microelectromechanical system-interdigital transducer gyroscope [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2009, **48**(6): 06FK09
- 5 I. Hinkov, V. Hinkov. Integrated acousto-optic collinear TE-TM mode convertors for 0.8 μ m optical wavelength range[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(13): 1211~1213
- 6 Hu Hongzhang, Zhang Mei, Xiao Lifeng. The characteristics analysis of an integrated optical acoustooptic tunable filter based on spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **24**(2): 195~198
- 7 胡鸿璋, 张梅, 肖立峰. 集成光学声光可调谐光谱仪的特性分析[J]. *光学学报*, 2005, **24**(2): 195~198
- 7 Zhang Shengli, Liu Yu, Sun Jianwei *et al.*. Optimized pack of high-speed photodiode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 659~662
- 张胜利, 刘宇, 孙建伟等. 高速光探测器封装的优化设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 659~662
- 8 Yan Qingwen, Wei Yiqun, Li Yelong *et al.*. Dual-channel SAW rotation sensor[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2007, **44**(7): 260~262
- 严庆文, 魏益群, 李业隆等. 双通道声表面波转速传感器[J]. *微纳电子技术*, 2007, **44**(7): 260~262
- 9 H. Y. Fang, J. S. Yang, Q. Jiang. Rotation-perturbed surface acoustic waves propagating in piezoelectric crystals[J]. *Int. J. Solids Struct.*, 2000, **37**(36): 4933~4947

- 10 Li Liang'er, Ji Xiaojun, Shi Wenkang *et al.*. Strategy for the fast solving of surface acoustic waves velocity [J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 2005, **39**(4): 656~660
李良儿, 吉小军, 施文康 等. 声表面波波速快速求解策略[J]. 上海交通大学学报, 2005, **39**(4): 656~660
- 11 J. Kushibiki, I. Takanaga, M. Arakawa *et al.*. Accurate measurements of the acoustical physical constants of LiNbO₃ and LiTaO₃ single crystals [J]. *IEEE Trans. Ultra. Ferroelectrics and Frequency Control.*, 1999, **46**(5): 1315~1323
- 12 Amnon Yariv. Optical Electronics in Modern Communications (Fifth Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 358~359
A·亚里夫. 现代通信光电子学(第五版)[M]. 北京. 电子工业出版社, 2004. 358~359
- 13 W. P. Risk, G. S. Kino. Acousto-optic fiber-optic frequency shifter using periodic contact with a copropagating surface acoustic wave [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(5): 336~338
- 14 Xue Ting, Qi Fang, Hu Hongzhang *et al.*. Development of integrated optical acoustooptic tunable wavelength filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1095~1099
薛挺, 祁芳, 胡鸿璋 等. 集成光学声光可调谐波长滤波器的研制[J]. 光学学报, 2000, **20**(8): 1095~1099
- 15 Lu Shuxiang, Chen Shufen, Zou Zhengfeng *et al.*. Optimization design of acousto-optical gyroscope [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 071202
路书祥, 陈淑芬, 邹正锋 等. 声表面波陀螺光读出的优化设计研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(7): 071202

栏目编辑: 何卓铭