

声表面波陀螺光读出的优化设计

路书祥 陈淑芬 邹正锋 付雷 孟彦彬

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 分析旋转介质中的声表面波(SAW)陀螺效应,推导了角速度与声波波速的关系,并讨论声光耦合波方程。将角速度与波速变化的关系式代入声光衍射效率公式,得出声光耦合情况下角速度与衍射效率公式的关系式,依据此关系对声光陀螺结构进行优化设计。优化设计表明,对于耦合效率大的铌酸锂晶体在光波损耗不大时其X切Y传,Z切Y传具有最大的刻度因子,在此结构下其精度为 $2.06^\circ/\text{h}$,比单一的SAW陀螺提高2个数量等级。

关键词 陀螺;光学设计;声表面波;声光耦合;结构设计

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.071202

Optimization Design of Acousto-Optical Gyroscope

Lu Shuxiang Chen Shufen Zou Zhengfeng Fu Lei Meng Yanbin

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

Abstract Surface acoustic wave (SAW) gyroscopic effect is analyzed when a piezoelectric half-space rotates, and the change form of angular speed versus the wave velocity is obtained. Then the acousto-optic coupling wave equation is discussed, and the formula relationship of angular speed and the diffraction efficiency is gotten in acousto-optic coupling situation. The optimization design to the acousto-optic gyroscope's structure is carried on according to this relationship. The optimization design indicates that X cuts Y propagating and Z cuts Y propagating LiNbO₃ crystal have the biggest scale factor, the sensitivity is usually the highest when the gyroscope rotates along SAW propagating direction, and the accuracy of this design is $2.06^\circ/\text{h}$, which is 2 orders of magnitude higher than that of normal SAW gyroscope.

Key words gyroscope; optical design; surface acoustic wave; acoustooptic mode coupling; structural design

OCIS codes 120.4570; 280.4788; 160.1050

1 引言

声表面波(SAW)存在于固体或液体的表面,易接收固液表面之外的压强、温度、电场等作用,可用作多种探测器。1980年,Lao^[1]提出当SAW器件旋转时,因受到哥氏力的作用,从而影响SAW的波速,可用做角速度的探测。2002年Jose等^[2]在 128° YX铌酸锂基底上制作驻波陀螺,其实验灵敏度为 $2.75 \mu\text{V}/[(^\circ)\cdot\text{s}]$ 。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 $0.431 \text{ Hz}/[(^\circ)\cdot\text{s}]$ 。2009年王文等^[4]对文献[2]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 $119 \text{ Hz}/[(^\circ)\cdot\text{s}]$ 。虽然SAW陀螺发展迅速,但其精度相对于光纤、激光陀螺还有待提高。由于SAW陀螺利用哥氏力的影响来改变声波波速,可通过计算找出压电基底的敏感切向,之后,或通过压焊金属点阵增大哥氏力^[5],或改变探测方式,如采用光探测,从而提高其精度。本文通过分析SAW陀螺效应,结合声光布拉格衍射的性质,采用光读出的方法将陀螺效应提取并读出,相较于普通的SAW陀螺可提高2个数量等级。

收稿日期: 2011-03-02; **收到修改稿日期**: 2011-03-18; **网络出版日期**: 2011-06-02

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

2 SAW 陀螺效应

2.1 Christoffel 方程

计算坐标图如图 1 所示, $x_3 < 0$ 的半平面为压电材料, $x_3 > 0$ 的半平面为自由空间或有一不受力的金属覆层, x_1 为表面波传播方向, x_2 方向设为无限长, IDT 为插梢电极。

由达朗贝尔原理及库伦定理可得^[6]

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

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

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; \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。再依据压电晶体本征关系对(1),(2)式进行转化, 可得 Christoffel 方程^[6,7]

$$c_{ijkl}\mathbf{u}_{k,jl} + e_{kjl}\phi_{,jk} = \rho[\ddot{u}_i + 2\xi_{ijk}\Omega_j\dot{u}_k - (\Omega_j^2\mathbf{u}_i - \Omega_i\Omega_j\mathbf{u}_j)], \quad (3)$$

$$e_{jkl}\mathbf{u}_{k,jl} - \epsilon_{jk}\phi_{,jk} = 0, \quad (4)$$

式中 c_{ijkl} 为弹性系数, e_{kij} 为压电系数, ϵ_{jk} 为介电系数, ξ_{ijk} 是 Levi-Civita 符号, i, j, k 均取为 1, 2, 3, \mathbf{u}_k 及 ϕ 分别为机械位移及电势, $\mathbf{u}_{k,jl} = \frac{\partial^2 \mathbf{u}_k}{\partial x_j \partial x_l}$, $\phi_{,jk} = \frac{\partial \phi}{\partial x_j}$, $\ddot{u}_i = \frac{\partial^2 \mathbf{u}_i}{\partial t^2}$, $\dot{u}_k = \frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial t}$, Ω_i, Ω_j 分别是 i 和 j 方向的角速度。(3),(4) 式遵循爱因斯坦求和约定。

压电基板在 $x_3 < 0$ 相对可认为无限大, 则当 $x_3 \rightarrow \infty$, 机械位移及电势趋近于零。在此结构下, Christoffel 波动方程解的一般形式为^[8]

$$\mathbf{u}_i = \sum_{n=1}^4 C_n^{(n)} \alpha_i^n \exp[j\beta b^{(n)} x_3] \exp[j\beta(x_1 - vt)], \quad (5)$$

$$\phi = \sum_{n=1}^4 C_n^{(n)} \alpha_4^n \exp[j\beta b^{(n)} x_3] \exp[j\beta(x_1 - vt)], \quad (6)$$

(5),(6) 式分别为机械位移 \mathbf{u}_i ($i=1, 2, 3$) 及电势 ϕ , α_i 及 α_4 分别为机械位移 \mathbf{u} 与电势 ϕ 的振幅, β 为波数, b 为 x_3 方向衰减系数, v 为表面波相速度, 其中组合系数 $C_n^{(n)}$ 由不同的边界条件所决定。

2.2 边界条件

在图 1 中, $x_3=0$ 的界面法向应力为零, 其机械边界条件表示为

$$\Gamma_{i3} = c_{i3kl} \frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial x_l} + e_{k3j} \frac{\partial \phi}{\partial x_k} = 0. \quad (7)$$

若为自由表面时或称为开路, $x_3=0$ 界面上表面电势连续, 法向电位移矢量连续。其电学的边界条件表示为

$$e_{3kl} \frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial x_l} - \epsilon_{3k} \frac{\partial \phi}{\partial x_k} = -\epsilon_0 \frac{\partial \phi}{\partial x_3}. \quad (8)$$

若在 $x_3=0$ 的界面上, 有一不受力的金属覆盖层, 此时称为短路, 表面电势为常数, 其电学边界条件表示为

$$\phi|_{x_3=0} = c, \quad (9)$$

式中 c 为常数。将(5),(6) 式代入 Christoffel 方程, 配合边界条件, 可得

$$\mathbf{H}\mathbf{C} = 0, \quad (10)$$

式中 \mathbf{H} 为 4×4 矩阵, \mathbf{C} 为组合系数矩阵

$$H_{1n} = c_{i3kl} P_l^{(n)} \alpha_k^{(n)} + e_{k3j} P_k^{(n)} \alpha_4^{(n)}, \quad H_{4n} = e_{3kl} P_l^{(n)} \alpha_k^{(n)} - \epsilon_{3k} P_k^{(n)} \alpha_4^{(n)} + \mathbf{j} \cdot \epsilon_0 \alpha_4^{(n)}, \quad (11)$$

式中 P 为波传播的方向余弦, 当波沿 x_1 方向传播时, $P_1=1, P_2=0, P_3=b$ 。为了使组合系数 $C_i^{(n)}$ ($i=1, 2, 3, 4$) 有非零解, 则必须使矩阵 \mathbf{H} 的行列式为零, 反复给 v 一定的试估值, 若能满足矩阵 \mathbf{H} 的行列式为零, 则可分别求得 SAW 的特性参数。

本文采用的铌酸锂材料常数如表 1 所示, 其中 ϵ_0 为真空介电常数, 在第二节中出现的 c_{ijkl} 等常数的双脚

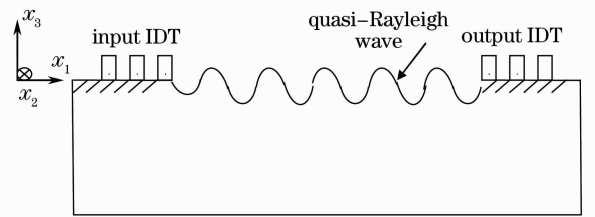


图 1 压电基板计算坐标图

Fig. 1 Coordinate graph of piezoelectric substrate

标比较复杂,遵循国际惯例规定 11→1,22→2,33→3,23→4,13→5,12→6,化双脚标为单脚标。

表 1 铌酸锂材料常数

Table 1 Constants of LiNbO₃

Elastic constants / (10 ¹⁰ N · m ⁻²)							Piezoelectric constants / (C · m ⁻²)			Electric constants		Density / (kg · m ⁻³)	
c ₁₁	c ₁₂	c ₁₃	c ₁₄	c ₃₃	c ₄₄	c ₆₆	e ₁₅	e ₂₂	e ₃₁	e ₃₃	ε ₁₁ /ε ₀	ε ₃₃ /ε ₀	ρ
19.84	5.47	6.51	0.79	22.79	5.97	7.16	3.69	2.42	0.30	1.77	45.6	27.3	4647

刻度因子为输出频率信号的变化量与单位时间输入旋转角度变化量之比,即陀螺在单位时间单位角速度增量下输出频率信号的变化量。将铌酸锂材料常数代入 Christoffel 方程并采用边界元计算可得刻度因子与切向关系。图 2 为铌酸锂在 X 切、Y 切、Z 切与 X 传,步长 1° 转速比为 0.2 且绕 x₁ 轴旋转时刻度因子与切向的关系图,刻度因子介于 0.4 与 1.4 之间。X 切时,欧拉角为 (90°, 90°, 89°) 对应的刻度因子最高为 1.3844。Y 切时,欧拉角为 (0°, 90°, 90°) 对应的刻度因子最高为 1.3568。Z 切时,欧拉角为 (0°, 0°, 30°)、(0°, 0°, 90°)、(0°, 0°, 150°) 对应的刻度因子最高,都为 1.3895。在 X 方向传播时,欧拉角为 (0°, 218°, 0°) 对应的刻度因子最高,为 1.2240。

通过求解表面波基本方程,计算最适合表面波声光器件的声光工作模式,对铌酸锂晶体的切割方式进行计算,最后筛选出 X 切 Y 传和 Z 切 Y 传最适合声光工作模式。本文选用 X 切 Y 传铌酸锂晶体,可求得角速度与 SAW 波速的关系如图 3 所示,因陀螺实际工作时转速比都很小,曲线拟合时大于三次的高次相都可以忽略,通过二次曲线拟合可得

$$v_s = -3675.8(\Omega/\omega)^2 - 1618.5(\Omega/\omega) + 3687.6, \quad (12)$$

式中 Ω 为转动角速度, ω 为声波角频率。

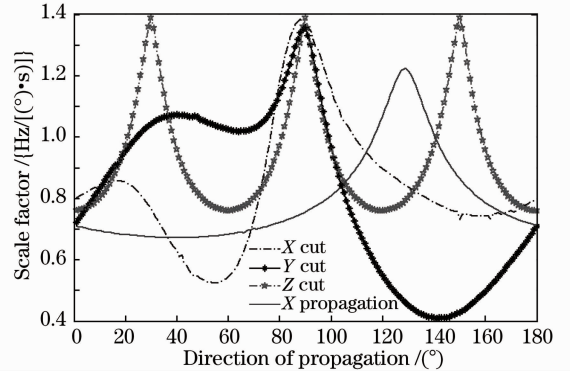


图 2 在不同切向时的刻度因子

Fig. 2 Scale factor versus direction of propagation under different cuts

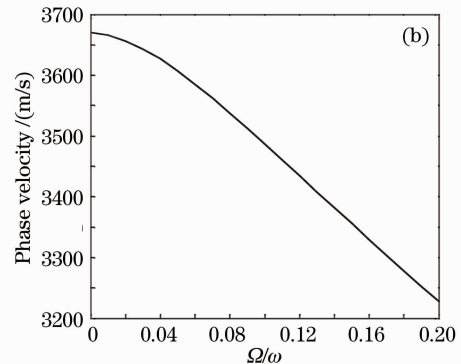
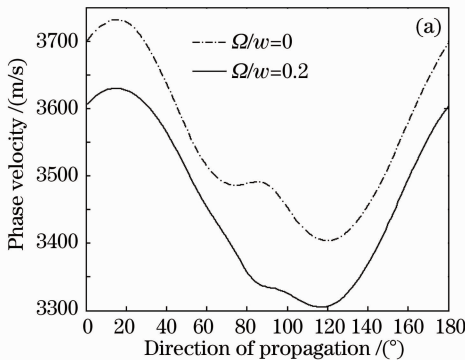


图 3 (a) X 切 SAW 相速度与切型关系图; (b) X 切 Y 传 SAW 相速度与转速比关系图

Fig. 3 (a) Phase velocity versus different X cuts; (b) XY LiNbO₃ phase velocity versus rotational speed/angular frequency of SAW

3 光读出 SAW 陀螺方案优化设计

3.1 已采用的方案分析与比较

目前已报道的 SAW 陀螺采用的方案有双通道差分 SAW 陀螺,质量块驻波 SAW 陀螺,光偏转型声光 SAW 陀螺。双通道差分 SAW 陀螺采用 SAW 行波模式,如图 4,当存在旋转扰动时,发射 IDT 在双通道中产生相向传播的 2 束 SAW,同一转速下,频偏大小相等,方向相反。将接收 IDT 上的频率信号进行混频滤波即可得到包含角速率值的频率信号。此结构采用差分设计,可有效降低温度等扰动的影响,但由于采用的是 SAW 行波模式,依据上述计算,频率随角速率的变化十分微弱,严庆文等^[8]采用此结构得到的灵敏度为

12 Hz/(rad · s)。

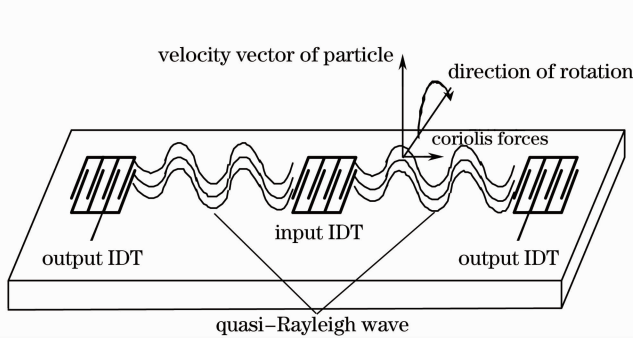


图4 双通道差分 SAW 陀螺原理

Fig. 4 Principle diagram of dual channel difference SAW gyroscope

质量块驻波 SAW 陀螺利用 2 个 IDT 和反射栅形成驻波,如图 5 所示。驻波节点上的振动幅度为零,在驻波波腹处或接近驻波波腹处的质点,沿 Z 方向有较大的振动幅度。当在 X 方向存在旋转扰动时,在 Y 方向由于哥氏力的存在便形成频率等于参考振动的频率的二次 SAW。通过置于 Y 方向的第二组 IDT 接收二次 SAW 频率信号,再经放大和解调等处理,就可以得到相关角速度信号。置于驻波的波腹位置的金属点阵可通过加大质量来提高 SAW 陀螺的灵敏度,Jose 等^[2,4]采用此结构制成质量块驻波 SAW 陀螺,实验灵敏度分别为 $2.75 \mu\text{V}/[(^\circ)\cdot\text{s}]$ 和 $119 \text{ Hz}/[(^\circ)\cdot\text{s}]$,相对于双通道差分 SAW 陀螺已提高了很多,但其结构复杂,加工困难,且灵敏度相对于光学陀螺也不占优势。

由于光学探测的精度很高(光波长量级),声光陀螺的研究也在迅速开展,光偏转型声光 SAW 陀螺便在这个背景下提出。原理如图 6 所示,当满足声光布拉格衍射,0 级光和 1(或-1)级光同时出现,若此时有旋转扰动,则声波频率发生改变从而影响衍射光的位置,通过 CCD 探测衍射光相对于入射光偏转角的变化可得到旋转角速率的信息。刘骏跃等^[9]依此设计得到的光偏转型声光 SAW 陀螺在声波速度改变 1 m/s 时,CCD 上的偏转角约为 $2''$ 。而依据上述计算及严庆文等^[8]关于声波速度与角速率关系的模拟,当未加偏置时旋转角速率变化 1 rad/s,声波速度改变仅为 0.005m/s 左右,则可判断该设计应用价值不大,光偏转型声光 SAW 陀螺灵敏度不及质量块驻波 SAW 陀螺。

3.2 光读出 SAW 陀螺优化设计

采用光波导技术和 SAW 技术相结合的结构方案,如图 7 所示,选择 XY 切 LiNbO_3 晶体制作光波导相

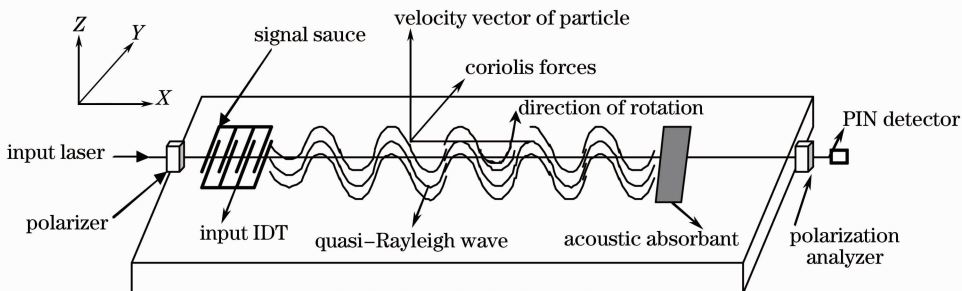


图7 共线性声光 SAW 陀螺原理

Fig. 7 Principle diagram of collinear acoustic optical SAW gyroscope

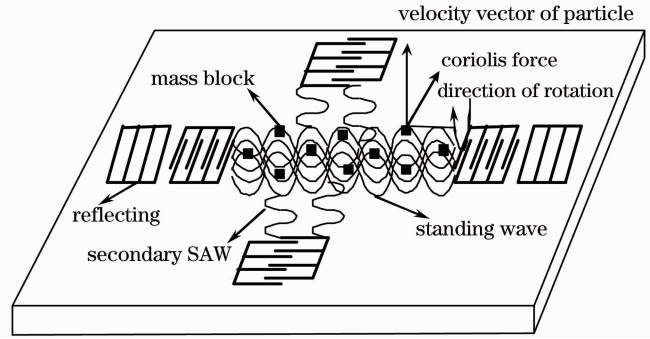


图5 质量块驻波 SAW 陀螺原理

Fig. 5 Principle diagram of mass block-standing wave SAW gyroscope

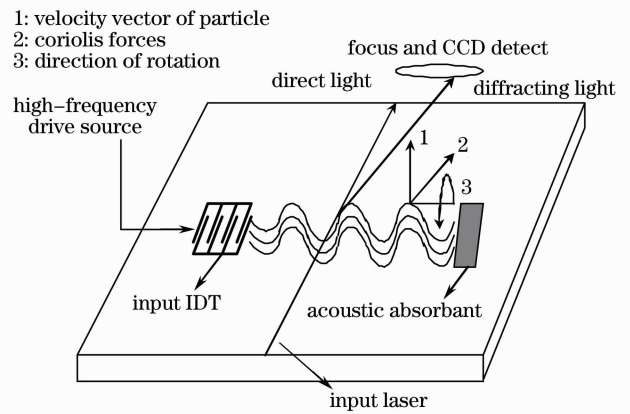


图6 光偏转型声光 SAW 陀螺原理

Fig. 6 Principle diagram of light deflection SAW gyroscope

位调制器,在波导表面加一组 IDT 做成 SAW 发射器和接收器,SAW 采用行波模式。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,光在这种介质传输时,光波的能量会在几个特定的传播模式之间来回转换。当满足布拉格条件时,这些模式之间只有一对模式会发生强烈耦合,利用上述原理可制成共线 TE-TM 模式转换器。当存在旋转扰动时,由于哥氏力的影响,SAW 频率将发生变化,布拉格条件将不再满足,从而影响 TE-TM 模式转换的效率,此时以不同的角速率旋转将对应不同的衍射效率,则依此可设计光读出的 SAW 陀螺。

3.3 衍射效率分析

对于非磁性各项异性介质, $\mu = \mu_0 = 1$,且介质在 Y 和 Z 方向都是均匀的,声场的作用效果可看作对介质介电常数 ϵ 的微扰,建立波动方程^[10]为

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \omega^2 u(\epsilon + \Delta\epsilon) \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (13)$$

当输入光只有 TE 偏振光时, $\mathbf{E} = A_{\text{TE}} E_{\text{TE}} \exp[-i(\omega t - \beta_{\text{TE}} x)]$ 为微扰等于零的方程解的形式,代入波动方程得

$$\frac{d}{dx} A_{\text{TE}}(x) = i\kappa A_{\text{TM}}(x) \exp(i\Delta\beta x), \quad \frac{d}{dx} A_{\text{TM}}(x) = i\kappa^* A_{\text{TE}}(x) \exp(-i\Delta\beta x), \quad (14)$$

因在 $x = 0$ 时只存在 TE 模,即设 $E_{\text{TE}}(0) = 1, E_{\text{TM}}(0) = 0$,则在坐标为 x 处的模振幅为

$$\begin{cases} A_{\text{TE}}(x) = \left\{ \cos[\sqrt{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2} x] - i \frac{\Delta\beta}{2 \sqrt{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2}} \sin[\sqrt{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2} x] \right\} \exp(-i\Delta\beta x/2), \\ A_{\text{TM}}(x) = i \frac{\kappa^*}{\sqrt{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2}} \sin[\sqrt{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2} x] \exp(-i\Delta\beta x/2), \end{cases} \quad (15)$$

由(15)式可得声光衍射效率为^[10,11]

$$\eta = \frac{|\kappa|^2}{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2} \sin^2[L \sqrt{|\kappa|^2 + (\Delta\beta/2)^2}] = \frac{P/P_0}{P/P_0 + 4N^2(\Delta f/f_0)^2} \sin^2\left[\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_0} + 4N^2(\Delta f/f_0)^2}\right], \quad (16)$$

式中 κ 为机电耦合系数, κ^* 与 κ 互为共轭, $\Delta\beta$ 为传播常数变化量, L 为声光作用距离, $N = L/\Lambda$,为声光长度 L 内的声波波数, P_0 为满足衍射效率为 100% 时的输入电功率, P 为实际 SAW 功率。SAW 传播时波速与频率有关^[1]

$$\Delta f/f_0 = \Delta v/v_0, \quad (17)$$

式中 $v_0 = 3687.6 \text{ m/s}$,因 Ω/ω 值很小(10^{-6} 量级),将(12)式代入(17)式可得

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{v_0 - v_s}{v_0} = \frac{1}{3687.6} \left[3675.8 \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)^2 + 1618.5 \left(\frac{\Omega}{\omega} \right) \right] \approx \frac{0.44\Omega}{\omega}. \quad (18)$$

将(18)式代入(16)式可得

$$\eta = \frac{P/P_0}{P/P_0 + 4N^2(\Delta f/f_0)^2} \sin^2\left[\frac{\pi}{2} \sqrt{P/P_0 + 4N^2(\Delta f/f_0)^2}\right] = \frac{P/P_0}{P/P_0 + 4N^2(0.44\Omega/\omega)^2} \sin^2\left[\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_0} + 4N^2\left(\frac{0.44\Omega}{\omega}\right)^2}\right]. \quad (19)$$

由(19)式可以看出:当机电耦合系数为 0.05,声波波数为 300,声波驱动频率为 200 MHz 时,X 切 Y 传铌酸锂波导瑞利波波速为 3687.6 m/s,其衍射效率随角速度变化如图 8(a)所示,图中角速度变化范围很大($0 \sim 10000 \text{ rad/s}$),目的是为了看出衍射效率随角速度变化的整体情况,当角速度微小变动时,通过 PIN 光电二极管 PIN 或光雪崩二极管(APD)亦可检出衍射效率的变化。

图 8(b)为偏置点设置在线性度最好的位置时声衍射效率随角速度变化关系图,PIN 光电二极管检测典型工作功率为小于 0.1 mW,灵敏度 R 约为 1 A/W,分辨率为纳瓦量级。若负载电阻 R_L 为 1 M Ω ,调整入射光功率使 PIN 接收光功率 P 为 0.07465 mW,则角速度变化 1 rad/s 时,输出电压变化量约为 $\Delta V = R \cdot \Delta P \cdot R_L = (0.00007465 - 0.00007455) \times 10^6 = 0.1 \text{ V}$,则陀螺灵敏度达 2 mV/[$(^\circ) \cdot \text{s}$],采用更高精度的 PIN 管或提高

负载电阻,该参数还可进一步提高。

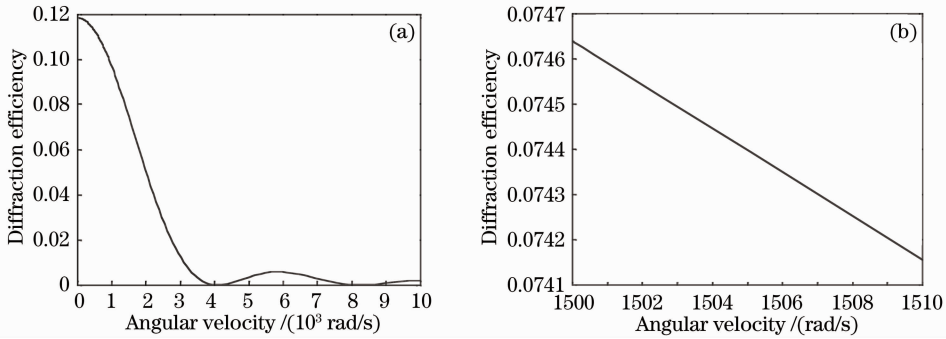


图 8 (a) 衍射效率随角速度变化曲线; (b) 偏置点处衍射效率随角速度变化曲线

Fig. 8 (a) Diffraction efficiency versus angular velocity; (b) diffraction efficiency versus angular velocity in bias point

4 结 论

从 SAW 传播方程出发,推导 SAW 陀螺效应,比较了目前已报道的几种 SAW 陀螺结构,结合声光耦合波方程对光读出 SAW 陀螺进行优化设计。优化设计表明,选用铌酸锂晶体作为基地材料时,其 X 切 Y 传, Z 切 Y 传, 30° Z 切 X 传, 120° Z 切 X 传及 128° Y 切 X 传都具有较大的刻度因子,因非正切晶体光损耗过大则适合声光衍射的切向只能选择 X 切 Y 传与 Z 切 Y 传。陀螺绕 SAW 传播方向旋转时其灵敏度最高,这时哥氏力对波速的影响达到最高。在此设计条件下,光读出 SAW 陀螺灵敏度为 $2 \text{ mV}/[(^\circ)\cdot\text{s}]$ 。

参 考 文 献

- 1 Binney Y. Lao. Gyroscopic effect in surface acoustic waves[J]. *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 *et al.*. A micro rate gyroscope based on the SAW gyroscopic effect[J]. *J. Micromech. Microengng.*, 2007, **17**(1): 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. Appl. Phys.*, 2009, **48**: 06FK09
- 5 C. Woods, H. Kalami, B. Johnson. Evaluation of a novel surface acoustic wave gyroscope [J]. *Trans. Ultra. Ferroelectrics and Frequency Control*, 2002, **49**(1): 136~141
- 6 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
- 7 Li Liang'er, Ji Xiaojun, Shi Wenkang *et al.*. Strategy for the fast solving of surface acoustic waves velocity[J]. *Journal of 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
- 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 Liu Junyue, Chen Ming. On acoustooptical measuring technology to SAW gyroscopic effect on LiNbO_3 [J]. *Chinse Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **26**(3): 563~566
刘骏跃,陈明. 基于铌酸锂介质的 SAW 陀螺效应声光检测系统设计与分析[J]. 传感技术学报, 2007, **26**(3): 563~566
- 10 Amnon Yariv. *Optical Electronics in Modern Communications*[M]. Fifth Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 362~363
阿蒙龙·耶利弗. 现代通信光电子学[M]. 第五版,北京:电子工业出版社, 2004. 362~363
- 11 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