

# 光纤陀螺用Y分支集成光学调制器的研究

陈福深\* 崔海娟

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**介绍了光纤陀螺的工作原理,依据与惯性空间作相对转动导致的Sagnac效应,对光纤陀螺的关键器件即集成光学调制器进行了分析;运用导出的基本公式,对研制光纤陀螺普遍采用的铌酸锂Y分支集成电光波导调制器的驱动电压和调制带宽参数进行了计算,计算结果为该调制器的设计提供了可靠数据。

**关键词** 光纤陀螺; Y分支调制器; 集成光学; 铌酸锂

中图分类号 TN256; TN253 文献标识码 A

## Research on Integrated Optical Modulator with Y-Branch Type for Fiber-Optic Gyro

Chen Fushen Cui Haijuan

(State Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** A fiber-optic gyro is a kind of optical fiber sensor for the angular velocity. In this paper, the fundamental principle of fiber-optic gyro based on Sagnac effect is reviewed, and the integrated optical phase modulator, which is a key device of the gyro and is our main task in the work, are analysed. According to the yielded equations, the drive voltage and frequency bandwidth in modulation of fiber-optic gyro are calculated, and the calculation results can be contributed to a design of the modulator used in fiber-optic gyro.

**Key words** fiber-optic gyro; Y-branch modulator; integrated optics; lithium niobate

文献[1]提出了光纤陀螺(fiber-optic gyro)的概念,标志着第二代光学陀螺的诞生。利用集成光学技术,使构成光纤陀螺最小互易性结构的几种无源光学器件以集成光波导的形式连接在一起,不仅可以减小陀螺的体积,而且还有利于降低成本和批量生产,同时又提高了系统工作的可靠性。此外,集成光学器件的超宽带调制特性导致了各类高精度的闭环处理方案的可操作性。因此,集成光学调制器已成为研制中、高精度大动态范围光纤陀螺的一个关键器件。本文针对目前在光纤陀螺中使用最广泛的Y分支集成光学调制器进行分析和研究。

### 1 光纤陀螺的工作原理

光纤陀螺的基本工作原理来自Sagnac效应。Sagnac效应是相对于惯性空间转动的闭环光路中断传播光的一种普遍的相关效应,即在同一闭合光路中从同一光源发出的两束特征相同的光,以互为相反的方向传输并最后汇聚到同一探测点;若绕垂直于闭合光路所在平面的垂线,相对惯性空间存在着旋转角速度,则正、反两束光走过的光程不等,产生光程差。理论上可以证明,其光程差与旋转角速度成正比,即<sup>[2]</sup>

$$j_s = \frac{2\pi LD}{cI} W \quad (1)$$

2002年11月25日收稿

\* 男 57岁 硕士 教授 博士生导师 主要从事集成光学方面的研究

式中  $L$  为光纤长度;  $D$  为光纤环直径;  $\lambda$  为光波长;  $c$  为真空中光速;  $\omega$  为转动角速度。

使用低损耗单模光纤形成环状, 其总长  $L$  可达几百米甚至上千米, 可大幅度地提高环形干涉仪的灵敏度, 即使是微小的转动也能够产生可探测的相位差。因为光纤环内的单模光纤处于双光束干涉状态, 其输出光强可表示为

$$I = I_0(1 + \cos j_s) \tag{2}$$

式中  $I_0$  为  $I_{\max}/2$ 。由式(1)和(2)可知, 输出光强是角速度的余弦函数, 如图1所示。由图1可知, 无论  $\omega$  是正还是负,  $I$  值读数不变, 即输出光强不能反映旋转的方向。同时, 小信号灵敏度低, 在多数场合的 Sagnac 相移很小, 而系统灵敏度  $dI/d\omega$  在  $\omega=0$  处为 0。为此, 在两束反向传输光之间引入  $90^\circ$  的相位差, 导致输出光强变成  $I = I_0(1 - \sin j_s)$ 。显然, 经过  $90^\circ$  的相位差的陀螺在  $\omega=0$  处的灵敏度即  $dI/d\omega$  达到最大值, 同时解决了输出  $I$  能反映旋转方向的问题。

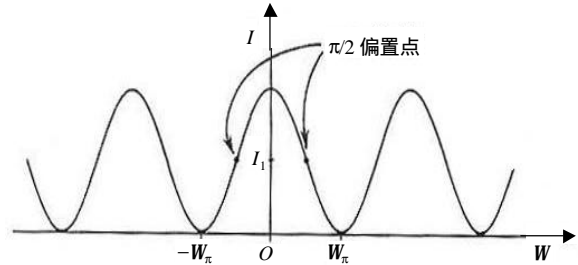


图 1 干涉式光纤陀螺的响应

图2表示的互易性结构是光纤陀螺的基本原理结构,

能完全保证陀螺在静止状态下顺、逆时针光波的光程相等。耦合器的功能在于使返回光耦合出一部分到探测器, 作为陀螺的光输出。偏振器位于光纤环与耦合器之间, 使单模光保持单偏振状态, 从而消除光纤双折射变化对陀螺性能的影响。当顺、逆时针两光波通过光纤环时, 由于路径不一致, 造成它们在不同时间经过相位调制器。设其时间差为  $t$ , 相位调制器的结果为

$$\Delta j = j(t) - j(t-t) \tag{3}$$

将式(3)代入式(2), 则陀螺的光输出有

$$I = I_0[1 + \cos(\Delta j + j_s)] = I_0 \{1 + \cos[j(t) - j(t-t) + j_s]\} \tag{4}$$

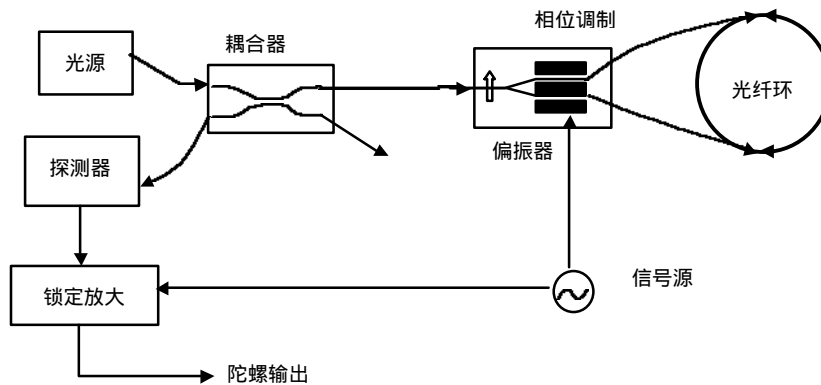


图2 光纤陀螺原理图

以正弦信号调制为例, 设  $j(t) = j_m \sin(\omega t)$ , 代入式(4), 则得

$$I = I_0 \{1 + \cos[h \cos(\omega t - \frac{t}{2}) + j_s]\} \tag{5}$$

式中  $h = 2j_m \sin(\omega t/2)$ 。当陀螺静止时, 其输出只有调制频率  $\omega$  的偶次谐波; 旋转时, 其输出将有奇次谐波。采用锁定放大器检测一次谐波, 则得到陀螺输出为<sup>[2]</sup>

$$I_w = 2KI_0 J_1(h) \sin j_s \tag{6}$$

式中  $K$  为电压增益, 通常  $h$  选值是 1.84 rad, 贝塞尔函数  $J_1(h)$  取最大值 0.53, 正弦波调制如图3所示。利用式(6), 根据检测出的  $I_w$ , 则可求解  $j_s$ , 再用式(1)得到角速度  $\omega$ 。图2中的集成光学相位调制器, 一个用于偏置信号调制, 另一个用于反馈信号调制, 以提供反馈相移形成闭环陀螺。

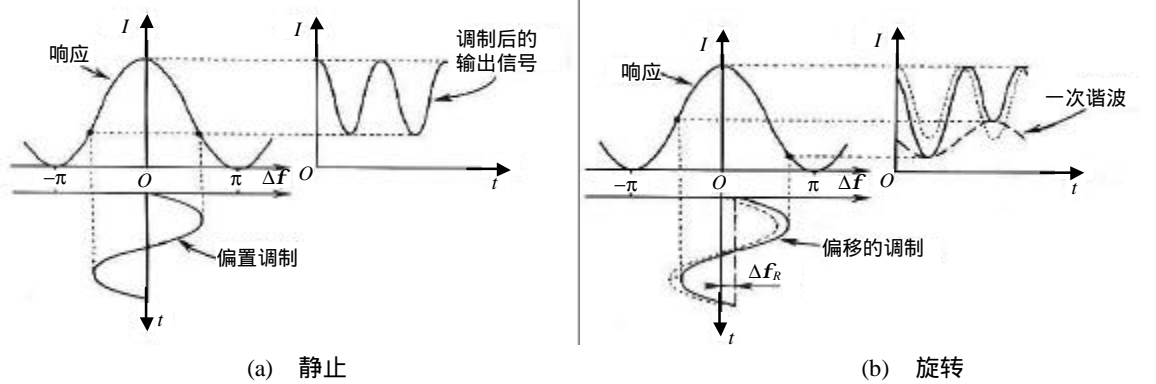


图3 正弦波偏置调制

## 2 Y分支集成光学调制器分析

### 2.1 驱动电压

由于Y分支集成光学相位调制器的两个光路均处于相位调制的工作状态，一般采用质子交换x切铌酸锂光波导，其单偏振特性得到保证。在外加电极电压V的作用下， $G = \frac{G}{V} \iint E |E|^2 dx dy$ ，定义为表征电光相互作用电光重叠因子，E为外加电场的水平分量，E是归一化的光基模(TE模)电场在波导截面上的分布，其表达式为<sup>[3]</sup>

$$|E|^2 = \frac{4y^2}{w_x w_y^3 \pi} \exp\left[-\left(\frac{x-p}{w_x}\right)^2\right] \exp\left[-\left(\frac{y}{w_y}\right)^2\right] \quad (7)$$

式中 p为光波导中心偏离y轴的位置坐标； $w_x$ 和 $w_y$ 分别是光波导在x、y方向上的最小模场尺寸，如图4所示。

由于式(7)中的 $|E|^2$ 与 $w_x$ 、 $w_y$ 和p有关，而G又与G和W有关，因此G与 $w_x$ 、 $w_y$ 、p、G、W有关，故电光重叠因子A需要5个待优化的参量。从理论分析， $G=f(w_x, w_y, p, G, W)$ ，实质上是确定此函数在5个自变量情况下取极大值的问题，但此函数绝非解析函数，只能运用计算机数值求极值<sup>[3]</sup>。

### 2.2 调制带宽

因光纤陀螺中使用的Y分支相位调制器的电极是集总参数型，其频率特性主要受限于电极电容与负载电阻所确定的时间常数<sup>[4]</sup>，即

$$\Delta f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (8)$$

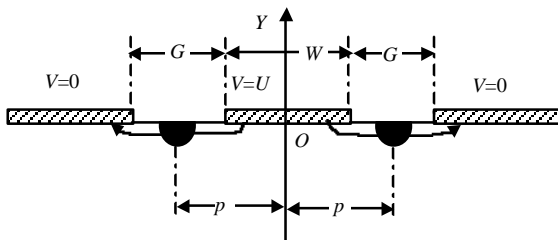


图4 电极与光波导之间的相互位置

为了计算调制带宽，必须知道电极电容，为此，利用保角变换中的施瓦兹变换，求得电极单位长度的电容 $C_0$ ，如图5所示。这里，不忽略电极厚度，其结果比把电极当成零厚度平面的准确度要高。由图5a所示，设 $G=b$ ， $W=a$ ，电极厚度为t，则从u平面到z平面的变换

$$\frac{du}{dz} = \sqrt{(z^2 - A^2)(z^2 - D^2) / (z^2 - B^2)(z^2 - C^2)} \quad (9)$$

式中  $A = a$ ， $B = a + (t/\pi)$ ， $C = b - (t/\pi)$ ， $D = b$ 。从z平面到w平面的变换为

$$\frac{dw}{dz} = (B + C) / \sqrt{(z^2 - B^2)(z^2 - C^2)} \quad (10)$$

显然，根据图5c，即可得到电极单位长度电容为

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{K(k)}{K(k')} \quad (11)$$

式中  $k=2(BC)^{1/2}/(B+C)$ ,  $k'=(1-k^2)^{1/2}$ ,  $K$  表示第一类完全椭圆积分。由于式(11)中表达的电容未考虑铌酸锂衬底和SiO<sub>2</sub>缓冲层,  $C_0$ 只能是纯电极的电容。所以还要考虑缓冲层和衬底形成的电容, 分别为<sup>[5]</sup>

$$C_b = 2e_0 e_{eq} \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \quad (12)$$

$$e_{eq} = \frac{e' e_{ox}}{e' e_{ox}} \quad k_1 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi a}{2t_{ox}}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi b}{2t_{ox}}\right)} \quad (13)$$

式中  $k_1' = (1-k_1^2)^{1/2}$ ,  $e_{ox}$ 是SiO<sub>2</sub>的相对介电常数,  $e'=(e_{11}e_{33})^{1/2}$  是LiNbO<sub>3</sub>的等效准静态各向同性的相对介电常数, 本文设定 $e_{ox} = 4$ , 且 $e' = 34.7$ 。此外,  $t_{ox}$ 为SiO<sub>2</sub>层厚度, LiNbO<sub>3</sub>衬底的电容 $C_s$ 应为<sup>[5]</sup>

$$C_s = 2e_0 \sqrt{e_{11}e_{33}} \frac{K(k_2)}{K(k_2')} \quad (14)$$

式中  $k_2'=(1-k_2^2)^{1/2}$ ,  $k_2=a/b$ 。则得到的单位长度的总电容是

$$C_{total} = 2C_0 + \frac{C_b C_s}{C_b + C_s} \quad (15)$$

### 3 计算结果

实现最佳电光相互作用, 即电光重叠因子 $\tilde{A}$ 最大的计算结果( $l = 1.3 \mu\text{m}$ )如表1所示<sup>[3]</sup>, 在给定电极间距 $G$ 时可以从表1中获得电极优化设计的 $W$ 、 $p$ 等参量数值及归一化的 $\tilde{A}$ 即 $S$ 的值。由于三电极结构需要两路光波导工作, 通常都要求两波导的调制处于推挽状态, 所以优化计算时要求两波导的电光重叠因子相等。

表1 光波导偏离y轴的最佳值 $p$ 和归一化的电光重叠因子 $S$

$G/\mu\text{m}$	$W/G=1$		$W/G=1.33$		$W/G=2$		$W/G=4$		$W/G=6$	
	$P/\mu\text{m}$	$S$	$P/\mu\text{m}$	$S$	$P/\mu\text{m}$	$S$	$P/\mu\text{m}$	$S$	$P/\mu\text{m}$	$S$
2	2.6	0.075 6	2.7	0.083 8	3.2	0.094 5	5.0	0.106 7	7.0	0.110 3
4	4.0	0.087 1	4.5	0.090 9	5.8	0.094 8	9.8	0.098 3	14.0	0.099 2
6	5.2	0.079 0	6.2	0.080 7	8.2	0.082 2	14.6	0.083 4	20.6	0.083 7
8	6.0	0.070 1	7.3	0.070 6	10.2	0.070 9	18.4	0.070 6	26.6	0.070 4
10	7.0	0.063 4	8.6	0.063 4	12.0	0.062 9	22.2	0.061 8	32.2	0.061 3

电极单位长度的总电容包括电极电容、SiO<sub>2</sub>缓冲层电容和LiNbO<sub>3</sub>衬底电容, 其数值如表2所示。当 $W > 13 \mu\text{m}$ 时, 本文的计算程序未能收敛, 所以无法计算结果。考虑到表2中已计算部分以完全能够满足实际需要, 故未再改进程序。通过验算, 可以确定已给数值的正确性。运用式(8), 假定负载电阻 $R = 50 \Omega$ , 代入表2总电容值, 即可求出3 dB带宽, 一般均远大于1 GHz, 对于光纤陀螺的调制信号已足够用。

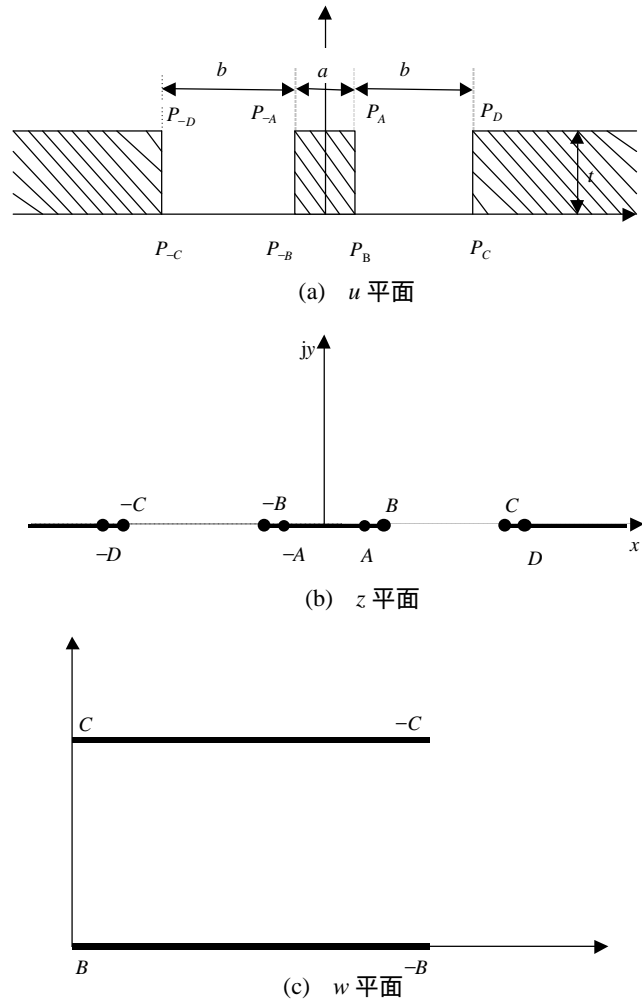


图5 非零厚度三电极结构的保角变换

表2 相位调制器电极的单位长度总电容值

$G/\mu\text{m}$	$C_{\text{total}}/\text{pf} \cdot \text{cm}^{-1}$	$C_{\text{total}}/\text{pf} \cdot \text{cm}^{-1}$	$C_{\text{total}}/\text{pf} \cdot \text{cm}^{-1}$	$C_{\text{total}}/\text{pf} \cdot \text{cm}^{-1}$	$C_{\text{total}}/\text{pf} \cdot \text{cm}^{-1}$
	$W/G=1$	$W/G=1.33$	$W/G=2$	$W/G=4$	$W/G=6$
2	1.30	1.50	1.87	2.78	3.50
4	1.70	1.99	2.52	-	-
6	1.97	2.32	2.91	-	-
8	2.20	2.58	-	-	-
10	2.55	-	-	-	-

## 4 结 论

本文以干涉式光纤陀螺的基本工作原理为基础,分析了陀螺核心器件之一的集成光学相位调制器,针对表征电光调制作用的电光重叠因子 $G$ 和电极电容进行了详细的分析和计算,得到如下结论:

1) 根据表1的计算结果,当 $G$ 选定后,可以找到归一化 $S$ 的最大值,又因驱动电压 $V=1G/(n^3yGL)$ ,所以 $V$ 与 $G$ 、 $L$ 均成反比,当 $G$ 、 $L$ 越大,驱动电压则越小,在选择 $G$ 和 $W$ 确定 $G$ 时,要综合考虑;

2) 表2的计算结果表明,三电极在电极厚度 $t=4\mu\text{m}$ 时,其每厘米长度上的总电容均小于 $5\text{ pf}$ , $3\text{ dB}$ 带宽能保证在 $L=1\text{cm}$ 时大于 $1\text{ GHz}$ ,这对光纤陀螺的要求有足够的富余量;

3) 调制器在光纤陀螺中,其Y分支波导一个用于偏置调制,另一个用于反馈相位调制,两种调制信号不同,故应分别考虑单边的双电极电容,按照电容的物理概念,单边电容在对称条件下,可等于三电极电容的一半<sup>[6]</sup>,所以 $3\text{ dB}$ 带宽的富余量就更大了。

## 参 考 文 献

- [1] Vali V, Shorthill R W. Fiber ring interferometer[J]. Applied Optics, 1976, 15(6): 1 099-1 100
- [2] Leferve H C. The fiber-optic gyroscope[M]. Boston-London: Artech House, 1993
- [3] 陈福深. 高效集成电光调制器和开关的电极与光波导的优化设计[J]. 光学学报, 1996, 16(3): 357-363
- [4] Alferness R C. Waveguides electrooptic modulators[J]. IEEE Trans-MTT, 1982, 30(8): 1 121-1 137
- [5] Ghione G, Goano M, Madonna G, *et al.* Microwave modeling and characterization of thick coplanar waveguides on oxide-coated lithium niobate Substrates for electrooptical applications[J]. IEEE Trans-MTT, 1999, 47(12): 2 287-2 292
- [6] 祝宁华, 吴正德. LiNbO<sub>3</sub> 光波导调制器的优化设计[J]. 电子科技大学学报, 1991, 20(4): 388-395

编 辑 徐培红