

四频环形激光器用于精密测角

环形激光课题组
(中国计量科学研究院)

环形激光测角速度和角度的原理是基于1913年和1925年 Sagnac 和 Michelson 等人的环形干涉仪的试验。1962年 Macek 等人把激光管置于环形腔内构成环形激光器。在环形腔中，正反传播的两列激光行波的频率差正比于激光器迴转的角速度，而拍频数则对应于激光器转过的角度，计算公式可由广义相对论导出^[1]，

$$\Delta f = \frac{4A}{L\lambda} \cdot \Omega, \quad (1)$$

$$N = \int \Delta f dt = \frac{4A}{L\lambda} \theta, \quad (2)$$

式中 N 为脉冲数， θ 为转角， $\frac{4A}{L\lambda}$ 为比例因子（对固定腔为常数）。(1),(2)两式表示出 $\Delta f-\Omega$ 及 $N-\theta$ 间的线性关系。但实际上由于增益介质的反常色散，两列行波间的能量耦合，以及由于非涅耳-斐索效应引起的折射率的各向异性等原因，使环形激光器的输出特性并不是如上所述的理想的线性关系而具有零漂、模牵引、锁定三项误差。零漂是指转速以外的原因引起的环形激光器输出。由于零漂存在，环形激光器的输出特性曲线有平移，在图1的示意图中 AA 线变为 $A'A'$ 线。模牵引是由于腔中增益介质的反常色散引起的，从而引起比例因子的变化。在图2中相当于输出特性曲线有一转角， AA 线变为 BB 线。闭锁是由于反向散射和非均匀损耗引起的，当系统处于低转速时，两行波间的频率由于相互作用而同步，此时无拍频输出，称为闭锁。系统转速升高才能脱离闭锁。系统正好脱离闭锁的转速值称为闭锁阈值 Ω_L 。此时

$\Delta f-\Omega$ 的关系如图3所示，并可表示为^[1]

$$\Delta f = \frac{4A}{L\lambda} (\Omega^2 - \Omega_L^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

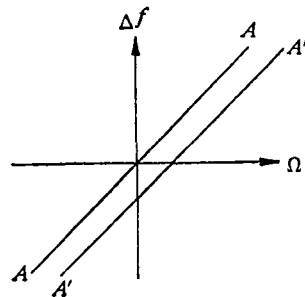


图1 零漂移影响

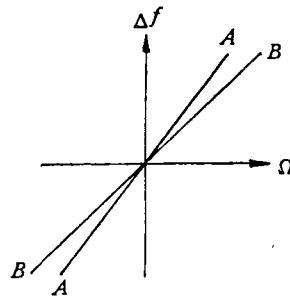


图2 模牵引影响

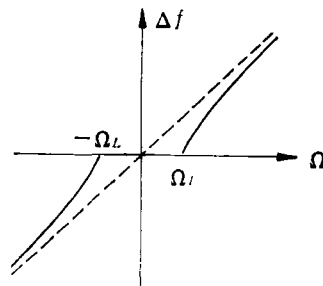


图3 闭锁影响

此式表明,当 $\Omega \gg \Omega_L$ 时, Δf 与 Ω 的关系才趋于线性。为减小和消除零漂的影响常用稳频、稳放电电流、对称平衡放电和稳增益等方法进行控制。为克服锁区,常采用机械抖动偏频、磁光偏频、磁镜以及四频差动偏频等方法。

四频差动偏频是用差动磁光偏频技术使环形激光器的工作范围避开锁区,其谐振腔由四面反射镜组成,激光增益管置于其中,同时在腔中放置旋光水晶片和法拉第磁室(图4)。由于它们对圆偏振光的互易性和非互易性的偏振色散,使正反行进的两列行波分裂为四个频率。图5表示出由于水晶片对左右旋光的折射率不等,使得 ν_{\pm} 分开,而 ν_{\pm} 在法拉第室的作用下又裂开 $\Delta\nu_H$,且由下式决定,

$$\begin{aligned} \Delta\nu_H &= -\Delta\nu_{\pm} \\ &= \nu_{\text{右旋}} - \nu_{\text{左旋}} = \frac{1}{\pi} \frac{c}{L} V l_2 H, \quad (4) \end{aligned}$$

式中 c 为光速, V 为费尔德常数, H 为磁场强度,

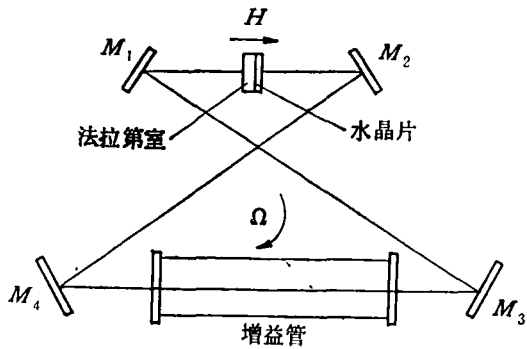


图4 四频环形激光器原理图

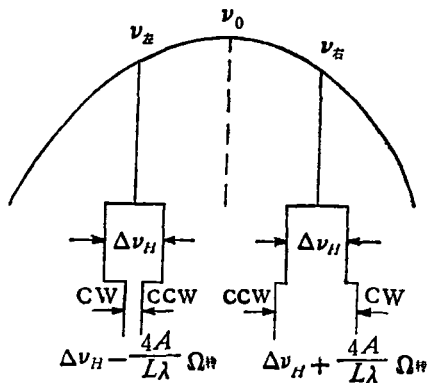


图5 四频形成示意图

CW 为顺时针行进行波 CCW 为逆时针行进行波

度, l_2 为火石玻璃厚度。

差动环形激光器的四个频率即由上述过程建立。当激光器转动时就输出相应于角速度和转角的差频及拍频数,并可按下列公式进行计算:

$$\Delta f_{\text{拍}} = \Delta\nu_{\pm} - \Delta\nu_{\mp} = \frac{8A}{L\lambda} \Omega \quad (\text{顺时针转时}), \quad (5)$$

$$\Delta f_{\text{拍}} = \Delta\nu_{\pm} - \Delta\nu_{\mp} = \frac{8A}{L\lambda} \Omega \quad (\text{反时针转时}), \quad (6)$$

$$N_{\text{拍}} = \frac{8A}{L\lambda} \theta. \quad (7)$$

上列各式是对应于理想空腔的公式,实际上由于腔中具有增益介质,因而拍频与腔不对称造成的差损、差增、朗缪尔流差等因素有关,可写成

$$\begin{aligned} \omega_{\text{拍}} &= (1 + K)2\omega_{\text{拍}} + (K_{1,2} - K_{3,4}) \\ &\quad \times (\omega_H + \omega_B) - 4k\nu K \\ &\quad + \frac{c}{2L} [f(\xi_{3,4}) + f(\xi_{1,2})](\gamma_2 - \gamma_1), \quad (8) \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{2} (K_{1,2} + K_{3,4}), \\ -\frac{c}{2L} f(\xi) &= \frac{\tau(\xi) - \rho(\xi)}{\beta(\xi) - \theta(\xi)}. \end{aligned}$$

K 是由于模牵引、模推斥及辐射捕获效应等因素而产生的比例系数修正因子, ω_H, ω_B 分别为磁光效应和转速引起的顺传和逆传光之间的频差, ω_B 为由于塞曼效应而产生的增益介质谱线的频率分裂量, k 为波数, ν 为朗缪尔流速, ρ, τ 分别为自烧孔和互烧孔对频率的修正; β, θ 分别为自烧孔和互烧孔引起的光强修正; γ 为损耗。

显然(8)式中包含了零漂项,

$$\begin{aligned} \omega_{\text{拍}} &= (K_{1,2} - K_{3,4})(\omega_H + \omega_B) - 4k\nu K \\ &\quad + \frac{c}{2L} [f(\xi_{3,4}) + f(\xi_{1,2})](\gamma_2 - \gamma_1). \quad (8') \end{aligned}$$

该式右边各项因素变化时零漂值 $\omega_{\text{拍}}$ 亦随之变化,这样在用作导航和测角时就会带来误差,所

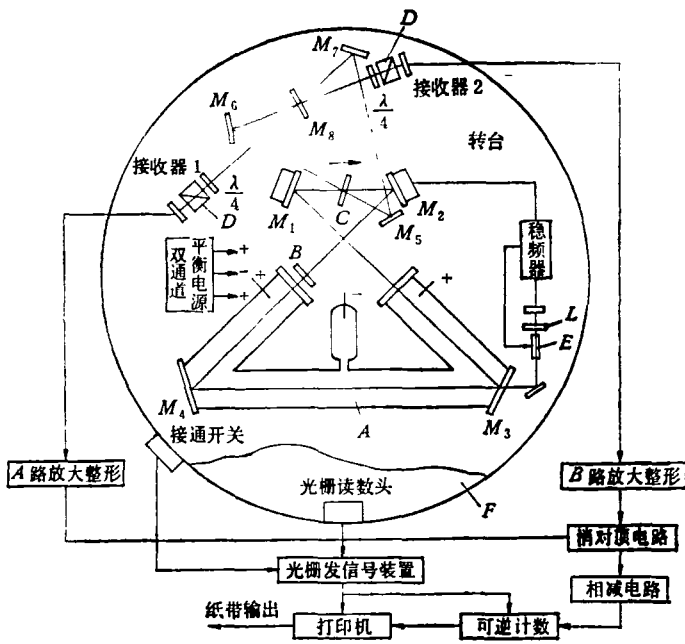


图6 实验装置图

A为半内腔式增益管；B为水晶片；C为法拉第室；D为偏振分光镜； $\lambda/4$ 为1/4波片； M_1-M_4 为全反射腔片； M_5-M_7 为反射镜片； M_8 为分光镜；L为偏振片；E为铌酸锂晶体；F为64800线的光栅盘

以 $\omega_{漂}$ 的大小以及是否稳定仍是评定环形激光器的重要精度指标。

在上述原理的基础上建立了实验装置如图6所示，为控制激光器的零漂采取了稳频、稳增益、稳电流及稳光强的措施，其频率稳定度可达 7×10^{-9} ，放电不平衡度为 1×10^{-6} 。稳频原理如图7所示。

用该试验装置，在转台静止时可以测试环形激光器的零漂数值，在转台迴转时可以测出每 10° 角所对应的拍频数以及每 1° 角所对应的拍频数。

经测试，该环形激光器件的零漂值为 $\sigma_{随机} = \pm 1\text{Hz}$ ，整圆测角精度为 $\sigma \leq 3''$ （每 10° 角取数）。在 $0-10^\circ$ 范围内，每 1° 角测量结果重复精度 $\sigma < 0.5''$ 。

由(8)式可见影响零漂的因素是较多的，由于频率的变化，磁场对器件塞曼效应的差、增益、损耗、差损的变化均可带来零漂，并可按照下列式子计算：

$$\Delta\nu_{漂} = \frac{1}{2\pi} \Delta\omega_{漂} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\partial K_{1,2}}{\partial \xi} - \frac{\partial K_{3,4}}{\partial \xi} \right) d\xi (\omega_H + \omega_R) - \frac{\partial K}{\partial \xi} 4kv d\xi + \frac{1}{2\pi} \frac{c}{2\langle L \rangle} \times \left[\frac{\partial f(\xi_{3,4})}{\partial \xi} + \frac{\partial f(\xi_{1,2})}{\partial \xi} \right] \times d\xi (\gamma_2 - \gamma_1), \quad (9)$$

$$\Delta\nu_{漂} = (K_{1,2} - K_{3,4})\nu_B, \quad (10)$$

$$\Delta\nu_{漂} = \left(\frac{\partial K_{1,2}}{\partial G} - \frac{\partial K_{3,4}}{\partial G} \right) \nu_H dG - \frac{\partial K}{\partial G} \cdot \frac{4kv}{2\pi} \cdot dG, \quad (11)$$

$$\Delta\nu_{漂} = \left[\frac{\partial K_{1,2}}{\partial \gamma} - \frac{\partial K_{3,4}}{\partial \gamma} \right] \nu_H d\gamma - \frac{\partial K}{\partial \gamma} \cdot \frac{4kv}{2\pi} d\gamma, \quad (12)$$

$$\Delta\nu_{漂} = \frac{1}{2\pi} \frac{c}{2\langle L \rangle} [f(\xi_{3,4}) + f(\xi_{1,2})] \times d(\gamma_2 - \gamma_1), \quad (13)$$

(9)–(13)式中所用符号含义均同(8)式。经代入实际结构参数验算结果与试验结果相符。同时可以看到如果在采取稳频、稳增益、平衡放电等措施的同时，进一步提高激光器件的机械结构的稳定性，并注意选用合理的腔结构参数，就能减小随机零漂，使测角精度得到提高，这也是我们今后的目标。

每 10° 测一次角度的结果说明用四频环形激光是可以用于连续自动测角的，如果进一步改善转速稳定性、磁屏蔽、光学机械结构稳定性，并选用合理的腔结构参数，测量的精度还可以提高。由 $0-10^\circ$ 范围测量结果精度较高这一点就展现了这个前景。因为此时测量时间

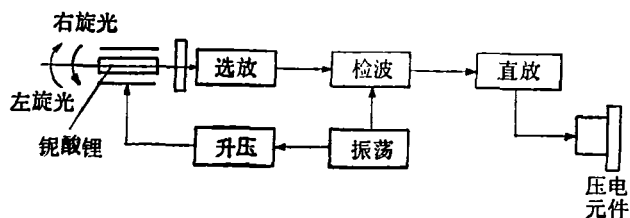


图7 稳频原理图

短,因而零漂、磁场、转速等不稳定因素影响都小。

总之,激光问世后不久,世界上就开展了环形激光的研究,至七十年代初期,由于在材料、寿命、镀膜、克服锁区等方面的进展,环形激光已成功地作为陀螺使用,目前已见报道^[2]。在测角方面,自1970年以来,也见到过一些方案原理及初步试验的报道^[3-5],但就精度和方法而言都还不够成熟。从我们的试验看来,环形激光测角精度是能够高于 $\pm 1''$ 的。虽然相对光栅、感应同步器等动态连续角度传感器说来,它还不够成熟,精度也较低,但具有提高精度的潜力,并且具有动态测量范围大,以及输出脉冲当

量较小等优点,同时在测磁场、流量、角速度及角加速度、位移、地球自转、特别是在作为光频标方面都有广阔的应用前景^[6],因而开展这项研究工作具有一定的实用意义。

参 考 文 献

- [1] F. Aronowitz, *Laser Applications*, 1(1971), 134—199.
- [2] Howard, *Laser Focus*, 14-2 (1978), 60.
- [3] Ring Laser Angle Encoder. PB-69-10115.
- [4] The Laser Gyro U. S. Paten 3854, 819.
- [5] Kouji Toyoda, *Proceed. of The Inten. Conf. on Prod. Engineer* 1974, Part 1, 433—438.
- [6] Д. П. Лукьянов, *Метрология*, 3 (1978), 26.

硅中磷、硼浓度的测量方法

杨 金 刚

(中国科学院原子能研究所)

在电子工业中,硅是重要的半导体材料,而磷、硼分别是它的施主杂质和受主杂质,因此,研究磷、硼等元素在硅片中的浓度分布,是电子工业生产中感兴趣的问题。本文介绍一种用带电粒子核反应分析这些元素的方法。这种分析方法对轻元素有较高的灵敏度,可测量杂质元素的浓度分布,并且有较高的深度分辨本领。此外,用核反应方法分析微量元素时,还不受被分析元素的物理或化学状态的影响,同时具有非破坏性、快速、直观等特点,所以在固体物理、冶

金学、电化学和材料科学等方面得到了广泛的应用。

一、分析原理

我们知道,具有一定能量的带电粒子,如 p , d , t , α 等与原子核碰撞时能产生核反应,而且不同的入射粒子与不同的靶核相互作用发生核反应的行为各不相同,例如各种可能的反应道的 Q 值、截面激发函数以及出射粒子角分布