



e.2 组合干涉仪实验

【实验背景】

干涉测量技术是一种利用光的干涉现象来测量某些物理量微小变化的技术，一般情况下，它是将一束光通过光学元件分为两束，一束作为参考光,另一束作为测量光，测量光落在被测物体上或通过被测样品，然后再将这两束光重新汇合形成干涉图样，利用干涉图样的变化，检查出目标某个物理量的微小变化。

这种测量方法由于大多采用高稳定度的、长相干的激光作为光源，因此一般都具有大量程、高分辨率、高精度、对目标影响小的特点，被广泛应用在国民经济的各个领域。

该技术在实际应用中，根据使用环境和要求的不同，往往采用不同的光路结构。本实验主要搭构三种较为常见的光路结构，1) 迈克尔逊干涉仪，2) 马赫-曾德尔干涉仪，3) 萨格奈克干涉仪，以熟悉它们的结构和特点。

在地球大气层中，电磁波通过大气时可能发生折射现象。空气折射率本身影响通过空气的电磁波波长。折射率的随机起伏产生了传输噪声。精密的计量技术也关心空气折射率的知识。以精密截止波导为例，只要波导内未被抽成真空，空气的折射率(或者说空气的相对介电常数)会对截止波导的性能有一些影响，问题只是影响的大小。因此，这方面的知识引起人们的关切。空气的相对介电常数和折射率是基本的物理参数，它与空气的温度、压强、湿度有关，与入射波的频率有关。而当空气的温度或者压强等因素变化时，折射率变化很小，所以这一小变化量可以通过光的干涉测量。本实验内容之一就是利用自搭建的迈克尔逊干涉仪和马赫-曾德尔干涉仪研究空气的折射率与压强的关系。

压电陶瓷是一种具有电致伸缩特性的功能陶瓷，材料在电场的作用下，几何尺寸会发生变化，一般变化量非常微小，每伏引起的变化量通常在 $\text{\AA}$ 这个量级。这种微小的变化量非常适合于微小位移量的控制、操作和微细加工，因此广泛地被应用在生物医学、超精密机械等微小尺寸操控领域。

本实验另一研究内容是采用激光干涉原理，通过光干涉条纹的变化对压电陶瓷的压电



特性进行观察和研究。通过本实验可以对压电陶瓷的压电特性和微小位移量的测量手段及方法有一个比较深入的认识和了解。

【实验目的】

- 1.熟悉并搭建三种干涉仪结构。
- 2.研究空气折射率与压强的关系。
- 3.利用迈克尔逊干涉仪研究压电陶瓷特性。

【实验原理】

1.迈克尔逊干涉仪

迈克尔逊干涉仪作为一种十分古老的干涉仪，于 1880 年由迈克尔逊发明，并主要由此于 1907 年获得诺贝尔奖金。迈克尔逊干涉仪基本光路结构如图 e.2.1，常被用来测量物体的微小位移变化。从光源 1 发出的一束相干光经分束镜 2 一分为二，分为两束。一束透射光落在反射镜 M1 上，另一束反射光落在反射镜 M2 上，M1、M2 分别将这两束光沿原路反射回来，在分束镜 1 上重合后射入扩束镜 3，投影在白屏 4 上， 如果我们对光路调整的合适，将在白屏上看到一系列的明暗相间的干涉条纹，这些干涉条纹会随着 M1 或 M2 的移动而移动，且非常敏感，只要反射镜移动半个波长，干涉条纹就移动一个周期，而光波长一般都在微米量级，因此它具有很高的灵敏度和分辨率。

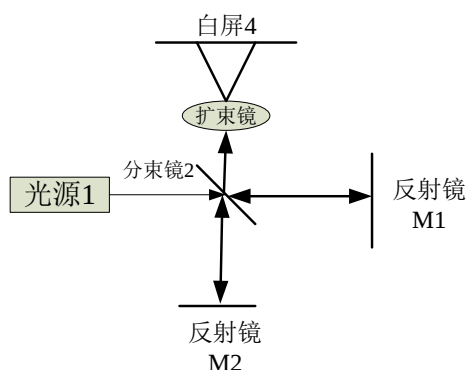


图 e.2.1 迈克尔逊干涉仪光路示意图



2. 马赫-曾德尔干涉仪

马赫-曾德尔干涉仪的光路结构如图 e.2.2 所示, 从光源 1 发出的一束相干光经分束镜 2 一分为二, 分为两束。一束透射光落在反射镜 M1 上, 另一束反射光落在反射镜 M2 上, M1、M2 分别将这两束光反射至分束镜 3 上, 并使这两束光重合, 进入扩束镜 4, 如果调整合适, 我们可在扩束镜后的白屏 5 上看见一系列明暗相间的干涉条纹。这种干涉仪主要用于测量透明物质的折射率的变化, 光纤传感器中的干涉仪大多采用这种光路结构。

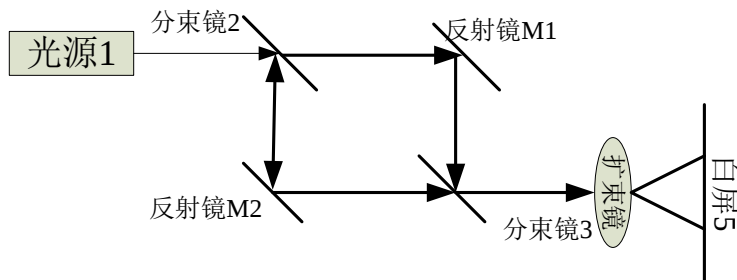


图 e.2.2 赫-曾德尔干涉仪光路示意图

3. 萨格奈克干涉仪

萨格奈克干涉仪的光路结构如图 e.2.3 所示, 光路由一个分束镜 2 和三个反射镜 M 组成, 它的光路比较特殊, 两束光沿着相同的路径反向传播。由于两束光的传播路径严格重合, 因此任何实际样品的影响都是同时作用在两个光束上的, 且大多数情况下作用相互抵消, 我们观察不到变化, 但这种干涉仪对角度的变化却有反映。假设干涉仪绕垂直于光路平面的轴转动, 则一束光将顺着转动方向传播, 而另一束光将逆着转动方向传播, 这将引起光程差的变化, 从而引起干涉条纹的移动。目前广泛应用于航空、航天领域的的激光陀螺、光纤陀螺就是基于该原理。

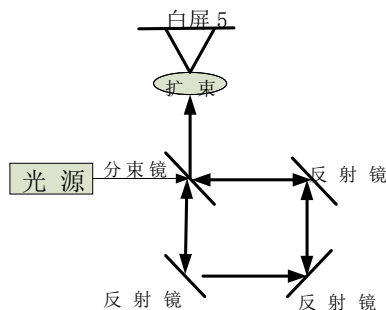


图 e. 2. 3 萨格奈克干涉仪光路示意图



4.空气折射率与压强的关系

根据麦克斯韦电磁理论可知空气的折射率为：

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (\text{e.2.1})$$

(e.2.1)式中， ϵ_r 为空气的相对介电常数， μ_r 为相对磁导率。根据电磁波在介质中传播的极化理论以及理想气体方程，经过推导可得折射率与压强和温度的关系

$$n - 1 = c' \frac{P}{T} \quad (\text{e.2.2})$$

查阅资料可知，通常，在温度处于 15-30℃ 范围时，空气折射率可用下式计算：

$$(n-1)_{t,P} = \frac{2.8793P}{1+0.003671t} \times 10^{-9} \quad (\text{e.2.3})$$

(e.2.3) 式中温度 t 的单位为℃，压强 P 的单位为 Pa。此式计算结果可作为折射率的理论值。例如室温为 $t=20^\circ\text{C}$ ，大气压强 $P=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，空气折射率 n_0 的理论值为：

$$n_0 = 1 + \frac{2.8793 \times 1.01325 \times 10^5}{1 + 0.003671 \times 20} \times 10^{-9} = 1.000272$$

当空气温度不变（或波动较小时），空气折射率 n 与压强 P 有线性关系：

$$n - 1 = cP \quad (\text{e.2.4})$$

(e.2.4)中， c 为常数。

设压强为大气压 P_0 时折射率为 n_0 ，由上式有：

$$\frac{P}{n-1} = \frac{P_0}{n_0-1} \quad (\text{e.2.5})$$

下面讨论如何利用干涉仪测量大气压 P_0 时折射率为 n_0 。

4.1 利用自搭建迈克尔逊干涉仪研究空气折射率与压强的关系

在迈克尔逊干涉仪的一光路加上长为 L 的空气室，如图 e.2.4

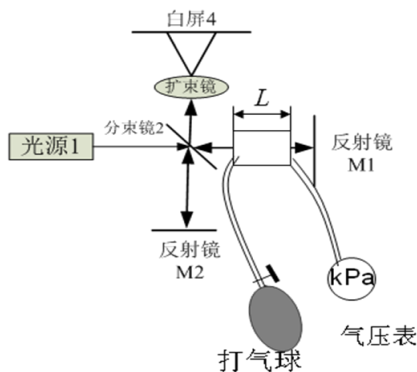


图 e.2.4 迈克尔逊干涉仪研究空气折射率与压强关系光路示意图

压强从 P 变化到 P_0 引起光程差的变化，从而引起干涉条纹级数变化（或者说条纹移动），设干涉条纹的变化数为 m ，根据干涉理论知光程差的变化为

$$\Delta \delta = 2L(n - n_0) \quad (e.2.6)$$

(e.2.6)式中， λ 为入射光波长，光线入射和反射两次经过空气室，所以光程差变化 $2L(n - n_0)$ 。

由(e.2.5) 与(e.2.6) 式可得大气压强下空气折射率 n_0 的表达式

$$n_0 = 1 + \frac{\Delta m \lambda}{2L \Delta P} P_0 \quad (e.2.7)$$

由(e.2.7)式可知，只要测出管内压强由 P 变化到 P_0 时的条纹变化数 m ，即可算出大气压强下空气折射率 n_0 。从(e.2.7) 式可以看出，实验中只要多次测出条纹变化数为 Δm 时，管内压强变化 $\Delta P = P_1 - P_2$ ，将其取平均代入(e.2.8)

$$n_0 = 1 + \frac{\Delta m \lambda}{2L \Delta P} P_0 \quad (e.2.8)$$

同样可计算出大气压强下空气折射率 n_0 。

另外，由(e.2.5) 与(e.2.6) 式消去 n_0 ，可得压强与折射率 n 的表达式



$$n = 1 + \frac{m\lambda}{2L(P - P_0)} P \quad (\text{e.2.9})$$

借助(e.2.9) 式可研究空气折射率与压强的关系。

4.2 利用自搭建马赫-曾德尔干涉仪研究空气折射率与压强的关系

将长为 L 的空气室，放入马赫-曾德尔干涉仪的一个光路中，如图

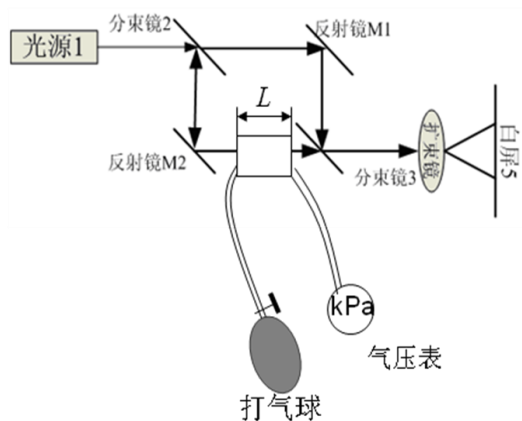


图 e.2.5 马赫-曾德尔干涉仪研究空气折射率与压强的关系光路示意图

由于光线只经过一次空气室，和上述迈克尔逊干涉仪研究空气折射率相似讨论，大气压强下空气折射率 n_0 的表达式

$$n_0 = 1 + \frac{m\lambda}{L(P - P_0)} P_0 \quad (\text{e.2.10})$$

或者测出条纹变化数为 Δm 时，管内压强变化 $\Delta P = P_1 - P_2$ ，得

$$n_0 = 1 + \frac{\Delta m \lambda}{L \Delta P} P_0 \quad (\text{e.2.11})$$

另外，可得压强与折射率 n 的表达式

$$n = 1 + \frac{m\lambda}{L(P - P_0)} P \quad (\text{e.2.12})$$

5. 压电陶瓷特性研究

在简单情况下，压电材料受到与极化方向一致的应力 T 时，在极化方向上产生一定的



电场强度 E ，它们之间有一简单的线性关系 $E=gT$ ；反之，当与极化方向一致的外加电压 U 加在压电材料上时，材料的伸缩形变 S 与电压 U 也有线性关系 $S=dU$ 。比例常数 g 、 d 称为压电常数，与材料性质有关。由于 E 与 T 、 S 与 U 之间具有简单的线性关系，因此我们就可以将正弦交流电信号转变成压电材料纵向长度的伸缩，成为声波的波源；同样也可以使声压变化转变为电压的变化，用来接收声信号。

压电陶瓷片（如钛酸钡、锆钛酸铅等）是由一种多晶结构的压电材料做成的，压电陶瓷的特点是在直流电场下对铁电陶瓷进行极化处理，使之具有压电效应。一般极化电场为 $3\sim 5\text{kV/mm}$ ，温度 $100\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，时间 $5\sim 20\text{min}$ 。这三者是影响极化效果的主要因素。压电陶瓷具有敏感的特性，可以将极其微弱的机械振动与电信号相互转换。在简单情况下，压电材料受到应力 T 时，在极化方向上产生一定的电场强度 E ，这称之为正压电效应，它们之间有一简单的线性关系 $E=gT$ ；反之，当外加电压 U 加在压电材料上时，材料的伸缩形变 S 与电压 U 也有线性关系 $S=dU$ ，这称之为逆压电效应。比例常数 g 、 d 称为压电常数，与材料性质有关。利用正压电效应可以制成电源，超声波接收器，打火机点火装置。利用逆压电效应可以制成蜂鸣器，扬声器，超声波发射器等。

压电陶瓷材料每伏电压产生的形变量只有几十 nm ，所以这一小量的测量可以利用干涉技术测量。本实验中采用的管状压电陶瓷如图 e.2.6，长度 40mm ，壁厚 1mm ，在内外壁上分别镀有金属电极以便施加电压，在陶瓷管的一端装有激光反射镜，在迈克尔逊干涉仪中充当反射镜。当在它的内表面加上电压（外表面接地）时，圆管伸长，反之加负电压时，圆管缩短。由迈克尔逊干涉理论可知，当压电陶瓷上加电压 U 导致压电陶瓷的形变量 S 与条纹的移动数目 N 的关系为

$$s = N \cdot \frac{\lambda}{2} = d \cdot U \quad 444 \quad (\text{e.2.13})$$

则压电常数

$$d = \frac{N \cdot \frac{\lambda}{2}}{U} \quad (\text{e.2.14})$$

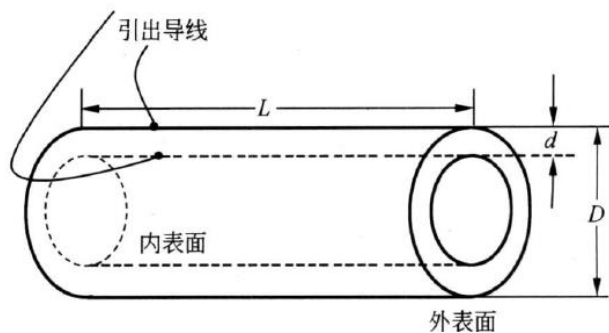


图 e.2.6 管状压电陶瓷示意图

如果压电陶瓷加三角波驱动电压并连接到示波器上 CH1，观察屏替换为光电二极管作为接收器并连接到示波器 CH2 通道上，双踪示波模式下。如图 e.2.7 可观察到加在压电陶瓷的上驱动电压为三角波扫迹，而光电二极管接收到的光强信号在示波器上为一系列类似正弦波的波形，波峰相当于干涉条纹明文中心，波谷相当于干涉条纹暗文中心，一个周期三角波内所包含的正弦波数目，相当于扫过光电二极管条纹数目。驱动电压幅度越大，三角波峰值越大，一个周期三角波内所包含的正弦波数目也就越多（请思考为什么？）

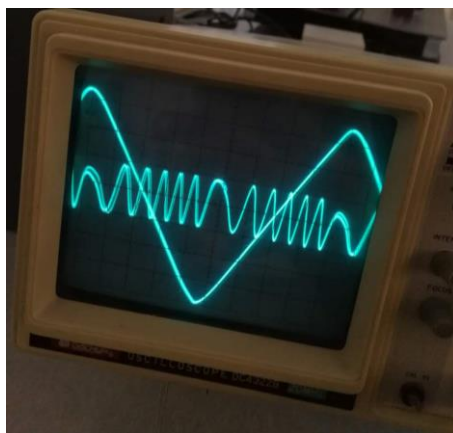


图 e.2.7 压电陶瓷振动特性图

【实验仪器】

平台（400mm×600mm×60mm）1 个；二维可调半导体激光器（635nm，3mW）1 套；二维可调分束镜 2 个；二维可调反射镜 3 个；二维可调扩束镜 1 个；白屏 2



个；气室(腔长 100mm)+压强计 1 套；压电陶瓷附件；压电陶瓷驱动电源(面板见图 e.2.8)，带开关磁性表座 9 个；光电二极管，示波器。

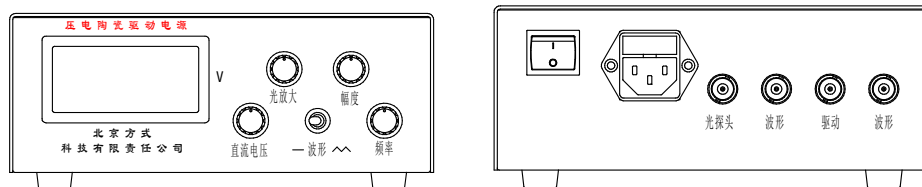


图 e.2.8 压电陶瓷驱动电源正背面示意图

【实验内容】

1.搭建迈克尔逊干涉仪研究空气折射率与压强关系。

1) 按照图 e.2.1 搭建迈克尔逊干涉仪。(注意磁性底座的使用)

2) 调整实验的光路，即先不放扩束镜，使光源 1 发出的相干光经过倾角为 45 度的分束镜，一束穿过分束镜后垂直落在反射镜 M1 上，再反射沿原光路反射至白屏，另一束反射垂直落在 M2 上，再反射穿过分束镜至白屏，仔细调节两平面镜的倾角螺钉，调节光路，使两束光线在白屏上形成的两组光点重合。另外注意反射镜 M1 和 M2 与分束镜的距离要能够放下 100mm 的空气室。调整光路中各光学元件，使两束反射光回到分束镜合并后，尽量重合，且不要回到激光器出光孔中(进入激光谐振腔的激光会使激光器工作不稳定)。安放各器件时，可按照激光器、分束镜、反射镜 M1、反射镜 M2、白屏、扩束镜顺序逐个放置，每放一个器件借助白屏和实验台上的小孔调整光路。

3) 调整光路后在白屏前放上扩束镜，微调扩束镜的相对位置，使干涉条纹变得清晰。

4) 如图 e.2.4，在其中一光路上轻轻放置空气室，切记放置时不要碰其它器件。

5) 调整打气球气阀冒，向空气室打气至气压表示值在 30-38KPa (此气压表显示的是内外压强差)，关闭气阀冒，记录气压表示数为 $P-P_0$

6) 先移动白屏，让白屏上的准线对准一条暗条纹，**缓慢**打开气阀冒，同时观察白屏上



的条纹移动情况，条纹每移动 5 条暗条纹，关闭气阀冒，将气压表示数 $P-P_0$ 和条纹移动数目记录在表 e.2.1

7) 实验完成，拧松气阀帽，将气放净，整理仪器。

8) 按照公式 (e.2.3) 计算当前温度、气压下空气折射率的理论值 n'_0 。按照公式 (e.2.7)

(e.2.8) (e.2.9), 可采用逐差法或者作图法处理数据得到空气折射率实验值 n_0 。计算空气折射率比误差。

$$\frac{|n'_0 - n_0|}{n'_0} \times 100 \% \quad (\text{e.2.15})$$

表 e.2.1 研究空气折射率与压强关系数据表

实验条件：大气压：_____kPa 室温：_____℃ 湿度：_____%， $\lambda=635\text{nm}$ ，空气管长 100mm

第一次	气压差 (P-P ₀) /kPa							
	条纹移动数	0	5	10	15	20	25	...
第二次	气压差 (P-P ₀) /kPa							
	条纹移动数	0	5	10	15	20	25	...

2. 搭建马赫-曾德尔干涉仪研究空气折射率与压强关系。

1) 按照图 e.2.5 搭建马赫-曾德尔干涉仪。

2) 仪器调整方法同实验内容 1.

3) 调整打气球气阀冒，向空气室打气至气压表示值在 30-38KPa（此气压表显示的是内外压强差），关闭气阀冒，记录气压表示数为 $P-P_0$

4) 先移动白屏，让白屏上的准线对准一条暗条纹，**缓慢**打开气阀冒，同时观察白屏上的条纹移动情况，条纹每移动 3 条暗条纹，关闭气阀冒，将气压表示数 $P-P_0$ 和条纹移动数目记录在表 e.2.2

5) 实验完成，拧松气阀帽，将气放净，整理仪器。

6) 按照公式 (e.2.10) (e.2.11) (e.2.12), 可采用逐差法或者作图法处理数据。计算空气折射率比误差。



表 e.2.2 研究空气折射率与压强关系数据表

实验条件：大气压：_____kPa 室温：_____℃ 湿度：_____%， $\lambda=635\text{nm}$ ，空气管长 100mm

第一次	气压差 (P-P0) /kPa						
	条纹移动数	0	3	6	9	12	...
第二次	气压差 (P-P0) /kPa						
	条纹移动数	0	3	6	9	12	...

3. 搭建萨格奈克干涉仪观察干涉现象（调整方法同前）。

4. 搭建迈克尔逊干涉仪测量压电陶瓷压电常数及研究其振动特性

4.1 压电陶瓷压电常数的测量

1) 按图 e.2.9 所示，在隔震平台上搭建一套迈克尔逊干涉仪，其中的一个反射镜采用压电陶瓷附件。

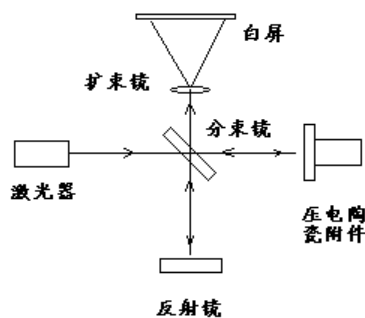


图 e.2.9 压电陶瓷特性研究光路示意图

2) 将压电陶瓷附件信号线与驱动电源背面驱动接口相连。

3) 调整半导体激光器，观察激光束距平台的高度，使各点的高度尽量相等，光束尽量平行于平台表面。

4) 调整光路中各光学元件，使两束反射光回到分束镜合并后，尽量重合，且不要回到激光器出光孔中（进入激光谐振腔的激光会使激光器工作不稳定）。

5) 观察白屏上的干涉条纹，反复调整光学元件，尽量使干涉条纹变宽（两光束基本重合后，夹角越小，条纹越宽），最好能达到扩束光斑中有 2-3 条干涉条纹。

6) 将驱动电源面板上的波形开关打到左边直流“—”状态，打开驱动电源的电源开关（在后面板）。



7) 慢慢旋转“电源电压”旋钮，观察白屏上条纹的变化，应可观察到条纹的移动，表头表示的驱动电压的大小的值也将变化。

8) 将直流电压降到最低，平静一段时间，等干涉条纹稳定后，移动白屏令白屏上的准线对准一条暗条纹，缓慢转动电压调节旋钮，观察条纹的移动。条纹每移动过参考线一条，记录下相应的电压值在表 e.2.3；每移动一条干涉条纹，代表压电陶瓷长度变化了 $1/2$ 个波长，（即 $635/2\text{nm}=317.5\text{nm}$ 。）

9) 将驱动电压开至最大后，再从高压反方向降压并记录相应的电压值和条纹移动之间的关系值。

10) 根据表 e.2.3 数据，结合公式 (e.2.13) 可以逐差法处理数据，也可画出形变量-电压特性曲线，斜率即为压电常数。材料的压电常数就是材料单位长度在单位电压作用下的位移量，通过上述曲线，可求出平均压电常数。

表 e.2.3 测量压电常数数据表

$\lambda=635\text{nm}$ ，压电陶瓷伸长量为 $N\lambda/2= 317.5N \text{ nm}$

条纹移动数 N	0	1	2	3	4	5	6	7
形变量/nm	0	317.5	635	952.5	1270	1587.5	1905	2222.5
逐加电压/V								
逐减电压/V								
电压均值								

4.2 压电陶瓷振动特性研究

1) 取下白屏，换上光电探头，打开示波器。将压电陶瓷附件接驱动电源插口，示波器 CH1 接驱动电压波形插口。光电探头接光探头插口，示波器 CH2 接光探头波形插口。

2) 将示波器置于双踪显示，CH1 触发状态，CH1 通道与驱动电压波形相连（此接口的信号已衰减约 10 倍）。

3) 将驱动电源波形开关置于右侧“m”端，这时示波器 CH1 踪应可出现三角波形，调节驱动频率，使示波器屏上出现 1-2 个三角波。

4) 将驱动幅度调到最大，“光放大”旋钮旋到最大，CH2 通道与光探头波形相连，这时



CH2 踪应有一系列类似正弦波的波形,此为干涉条纹扫过光电二极管探头的信号.

5) 改变驱动频率和驱动幅度, 观察 CH2 踪波形的变化情况, 体会干涉条纹与压电陶瓷振动的关系, 如频率、速度和振幅与波形的关系。

【注意事项】

1. 调整光路时不能用眼睛正对激光束, 以免伤害眼睛。要用白屏接收光。

2. 为了得到粗细合适的干涉条纹, 应使重新拟合的两束光尽量重合。两束光之间的夹角越小, 干涉条纹越粗, 反之越细。在调整光路时, 应先使两束光落在同一个平面内。这可以用固定在磁性表座上的白屏来观察两束光各点的高度是否相同来确定, 然后再通过使两束光汇集于同一点来保证水平方向的夹角尽量的小。

3. 空气压强的变化应平稳而缓慢, 可通过气室本身的泄漏来实现, 条纹的变化可通过条纹经过白屏上的一个固定点来计数。

4. 应尽量避免有反射光进入激光器, 这将引起激光器工作不稳定。

5. 条纹计数时不要接触平台, 以免引起条纹的抖动。

6. 光学元件的表面严禁触摸。

7. 压强计不可超量程使用, 以免损坏。

8. 做完实验后, 务必放掉气室中的高压气体。

【思考题】

1. 按照公式 (e.2.15) 计算实验结果的相对误差能够准确反映实验结果的真实误差大小么? 为了更形象地反映实验误差大小应该如何修正相对误差?

2. 利用本实验干涉仪设计思想, 你还能想到测量什么物理量?

3. 压电陶瓷伸缩量大小与条纹移动级数有何关系?

4. 在压电陶瓷电特性实验中, 如何通过示波器上 CH2 的波形, 试算出振动的幅度, 压电常数等物理量?

5. 压电陶瓷在不同频率驱动电压下振幅是否相同?