

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	
25		30		25		80	
专业：		物理学类		年级：		2023 级	
姓名：		姚昊廷		学号：		22322091	
日期：		2025.3.11		教师签名：			

双光栅测量微弱振动位移量实验

【实验报告注意事项】

1. 实验报告由三部分组成：
- (a) 预习报告：阅读实验讲义，弄清实验原理，了解实验需要测量的物理量，完成预习思考题。将预习报告带到实验室并在开始实验前由实验教师或助教检查。预习成绩低于 10 分（共 20 分）者不能做实验。

(b) 实验记录：认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名（用铅笔记录的被认为无效）。保持原始记录，包括写错删除部分。离开前请实验教师或助教检查记录并签名。

(c) 分析讨论：处理实验原始数据，对数据的可靠性和合理性进行分析；按规范呈现数据和结果；分析物理现象（含回答实验思考题，写出思考过程）；最后得出结论。
2. 实验报告就是将预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来，加上本页封面。实验记录须手写，预习报告和分析讨论部分手写或打印均可。
3. 每次完成实验后的一周内交实验报告（特殊情况不能超过两周），每份报告必须注明姓名和学号，合作者和学号，否则按零分处理。

目录

1 双光栅测量微弱振动位移量实验 预习报告 3

1.1 实验目的 3

1.2 仪器用具 3

1.3 实验原理概述 3

1.4 实验前思考题 9

2 双光栅测量微弱振动位移量实验 实验记录 11

2.1 实验内容、步骤、结果 11

2.1.1 实验内容和步骤 11

2.2 实验过程遇到问题记录 11

3 双光栅测量微弱振动位移量实验 分析与讨论 12

3.1 分析与讨论 12

Appendices 13

双光栅测量微弱振动位移量实验 预习报告

1.1 实验目的

1. 了解利用光的多普勒频移形成光拍的原理并用于测量光拍拍频。
2. 学会使用精确测量微弱振动位移的一种方法。
3. 应用双光栅微弱振动测量仪测量音叉振动的微振幅。

1.2 仪器用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	双光栅微弱振动测量仪	1	DHGS-1 型，半导体激光器： $\lambda=650\text{nm}$ ，功率 2-5mW；音叉谐振频率：500Hz 左右。
2	数字示波器	1	DS1000E(D)
3	信号发生器	1	MFG-2000

1.3 实验原理概述

1. 位移光栅的多普勒频移

多普勒效应是指光源、接收器、传播介质或中间反射器之间的相对运动所引起的接收器接收到的光波频率与光源频率发生的变化，由此产生的频率变化称为多普勒频移。

由于介质对光传播时有不同的相位延迟作用，对于两束相同的单色光，若初始时刻相位相同，经过相同的几何路径，但在不同折射率的介质中传播，出射时两光的位相则不相同，对于位相光栅，当激光平面波垂直入射时，由于位相光栅上不同的光密和光疏媒质部分对光波的位相延迟作用，使入射的平面波变成出射时的褶（折）曲波阵面，见图 1。

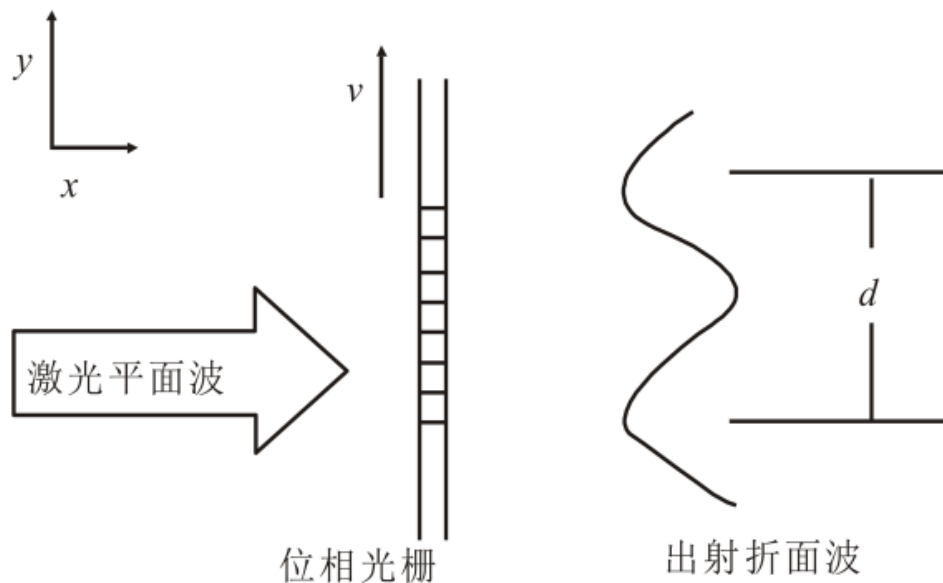


图 1: 出射的折曲波阵面

激光平面波垂直入射到光栅，由于光栅上每缝自身的衍射作用和每缝之间的干涉，通过光栅后光的强度出现周期性的变化。在远场，我们可以用大家熟知的光栅衍射方程即 (1) 式来表示主极大位置：

$$d \sin \theta = \pm k \lambda \quad k = 0, 1, 2 \dots \quad (1)$$

式中：整数 k 为主极大级数， d 为光栅常数， θ 为衍射角， λ 为光波波长。

如果光栅在 y 方向以速度 v 移动，则从光栅出射的光的波阵面也以速度 v 在 y 方向移动。因此在不同时刻，对应于同一级的衍射光射，它从光栅出射时，在 y 方向也有一个 vt 的位移量，见图 2。

这个位移量对应于出射光波位相的变化量为 $\Delta\varphi(t)$

$$\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta s = \frac{2\pi}{\lambda} vt \sin \theta \quad (2)$$

把 (1) 代入 (2) 得：

$$\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} vt \frac{k\lambda}{d} = k 2\pi \frac{v}{d} t = k \omega_d t \quad (3)$$

式中 $\omega_d = 2\pi \frac{v}{d}$

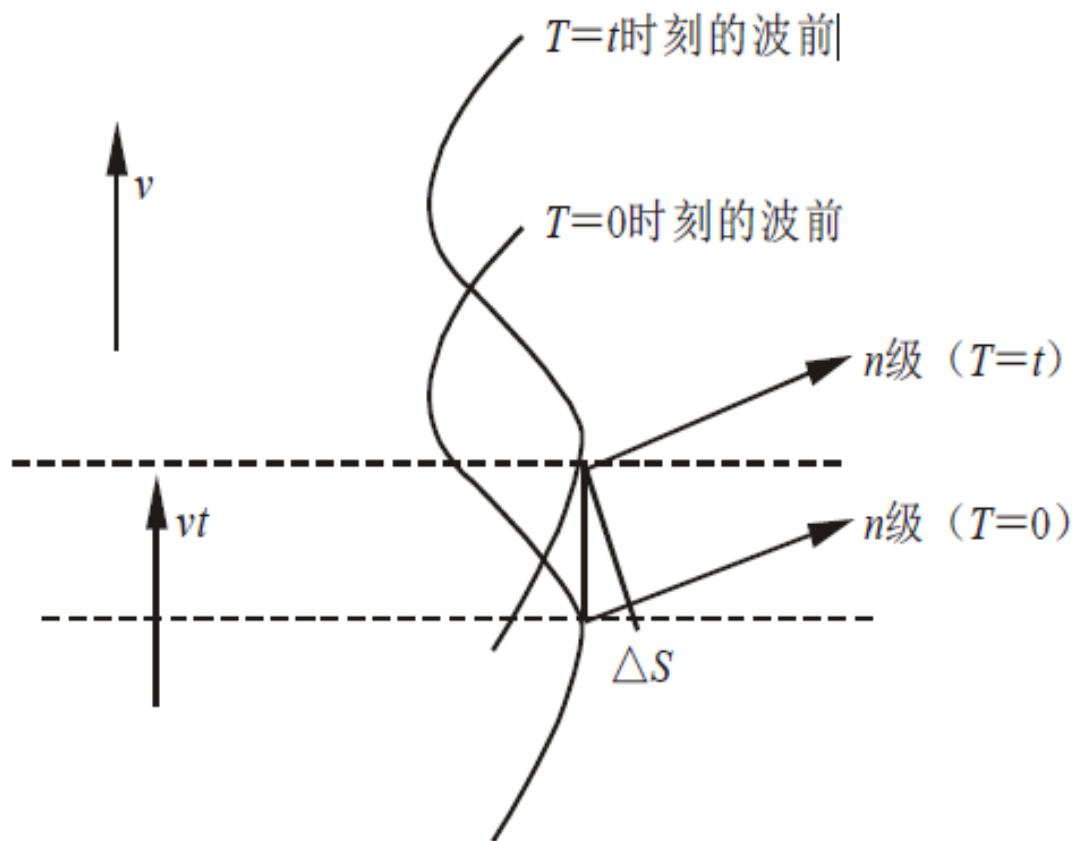


图 2: 衍射光线在 y 方向上的位移量

若激光从一静止的光栅出射时；光波电矢量方程为

$$E = E_0 \cos \omega_0 t$$

而激光从相应移动光栅出射时，光波电矢量方程则为

$$E = E_0 \cos[(\omega_0 t + \Delta\varphi(t))] = E_0 \cos[(\omega_0 + k\omega_d)t] \quad (4)$$

显然可见，移动的位相光栅 k 级衍射光波，相对于静止的位相光栅有一个 $\omega_a = \omega_0 + k\omega_d$ 的多普勒频移，如图 3 所示。

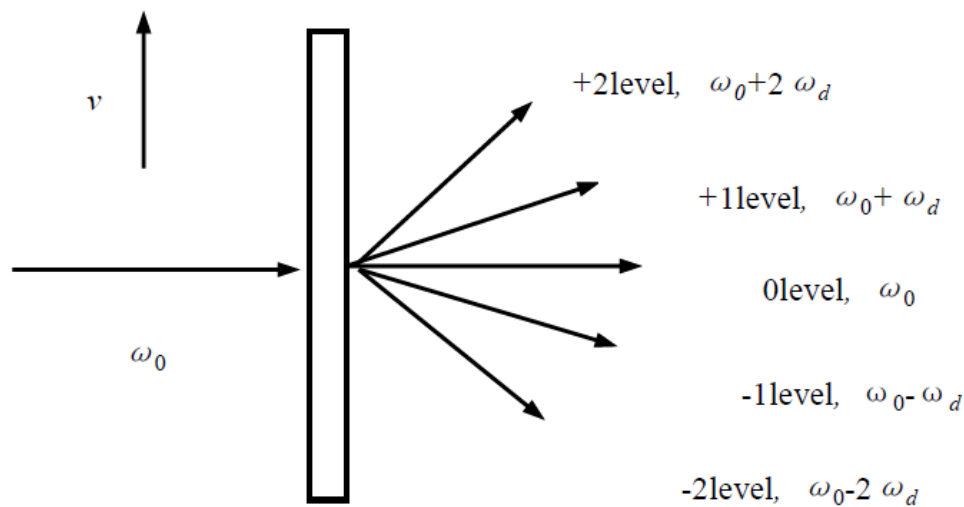


图 3: 移动光栅的多普勒频移

2. 光拍的获得与检测

光频率很高，为了在光频 ω_0 中检测出多普勒频移量，必须采用“拍”的方法，即要把已频移的和未频移的光束互相平行迭加，以形成光拍。由于拍频较低，容易测得，通过拍频即可检测出多普勒频移量。本实验形成光拍的方法是采用两片完全相同的光栅平行紧贴，一片 B 静止，另一片 A 相对移动。激光通过双光栅后所形成的衍射光，即为两种以上光束的平行迭加，如图 4 所示。

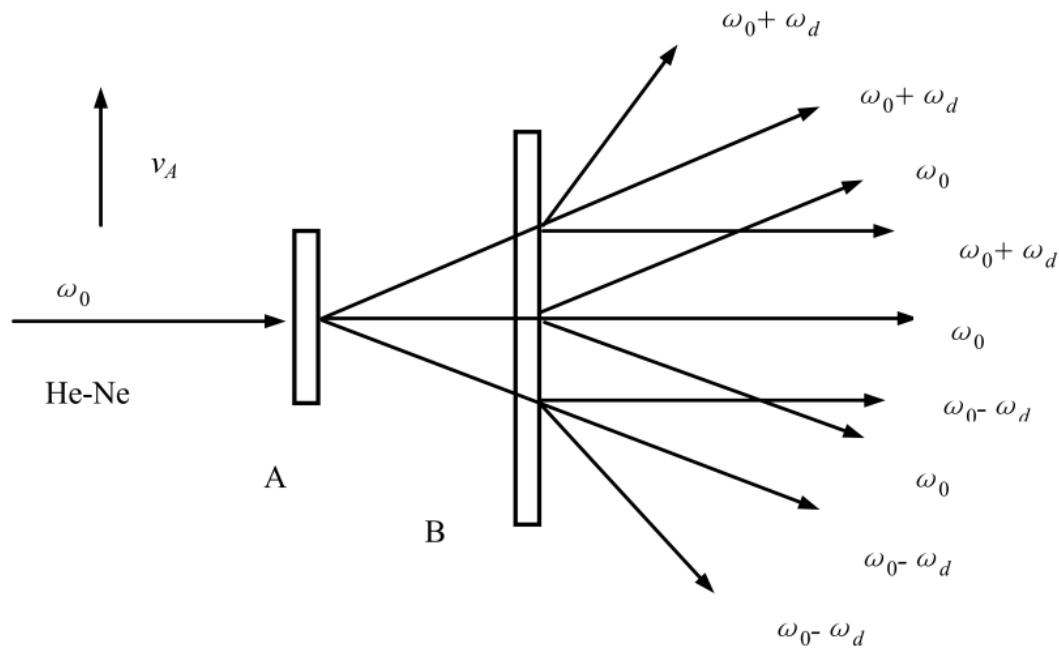


图 4: 激光通过双光栅后所形成的衍射光

光栅 A 按速度 v_A 移动，起频移作用，而光栅 B 静止不动，只起衍射作用，故通过双光栅后射出的衍射光包含了两种以上不同频率成分而又平行的光束。由于双光栅紧贴，激光束具有一定宽度，故该光束能平行迭加，这样直接而又简单地形成了光拍。如图 5 所示。

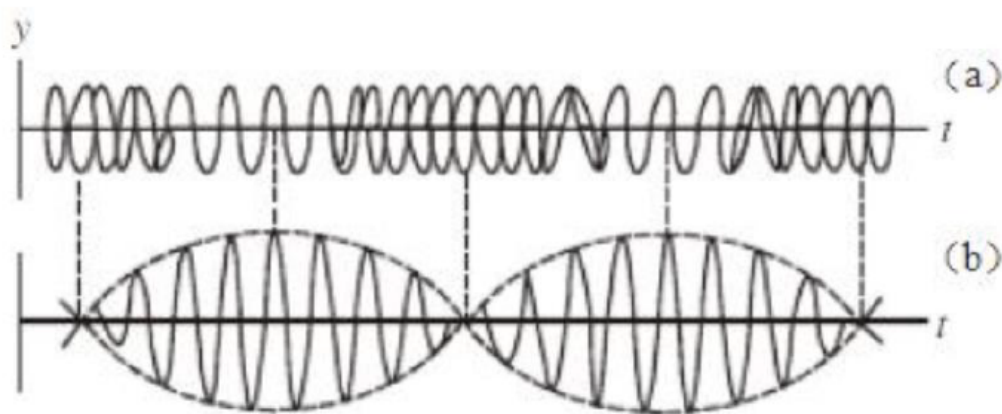


图 5: 频差较小的两列光波叠加形成“拍”

当激光经过双光栅所形成的衍射光叠加成光拍信号。光拍信号进入光电检测器后，其输出电流可由下述关系求得：

$$\begin{aligned} \text{光束 1:} \quad E_1 &= E_{10} \cos(\omega_0 t + \varphi_1) \\ \text{光束 2:} \quad E_2 &= E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_1] \quad (\text{取 } k=1) \end{aligned} \quad (5)$$

光电流：

$$\begin{aligned} I &= \xi (E_1 + E_2)^2 \\ &= \xi \{ E_{10}^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_1) + E_{20}^2 \cos^2[(\omega_0 + \omega_d)t + \varphi_2] \\ &\quad + E_{10} E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d - \omega_0)t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \\ &\quad + E_{10} E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d + \omega_0)t + (\varphi_2 + \varphi_1)] \} \end{aligned} \quad (6)$$

图中 ξ 为光电转换常数

因光波频率 ω_0 甚高，在式 (6) 第一、二、四项中，光电检测器无法反应，式 (6) 第三项即为拍频信号，因为频率较低，光电检测器能做出相应的响应。其光电流为

$$i_S = \xi E_{10} E_{20} \cos[(\omega_0 + \omega_d - \omega_0)t + (\varphi_2 - \varphi_1)] = \xi E_{10} E_{20} \cos[\omega_d t + (\varphi_2 - \varphi_1)]$$

拍频 $F_{\text{拍}}$ 即为：

$$F_{\text{拍}} = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{v_A}{d} = v_A n_\theta \quad (7)$$

其中 $n_\theta = \frac{1}{d}$ 为光栅密度，本实验中 $n_\theta = 1/d = 100$ 条/mm

3. 微弱振动位移量的检测

从式 (7) 可知， $F_{\text{拍}}$ 与光频率 ω_0 无关，且当光栅密度 n_θ 为常数时，只正比与光栅移动速度 v_A ，如果把光栅粘在音叉上，则 v_A 是周期性变化的。所以光拍信号频率 $F_{\text{拍}}$ 也是随时间而变化的，微弱振

动的位移振幅为:

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} v(t) dt = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} \frac{F_{\text{拍}}(t)}{n_{\theta}} dt = \frac{1}{2n_{\theta}} \int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt \quad (8)$$

式中 T 为音叉振动周期, $\int_0^{T/2} F_{\text{拍}}(t) dt$ 表示 $T/2$ 时间内的拍频波的个数, 如图 6 所示。所以, 只要测得拍频波的波数, 就可得到较弱振动的位移振幅。

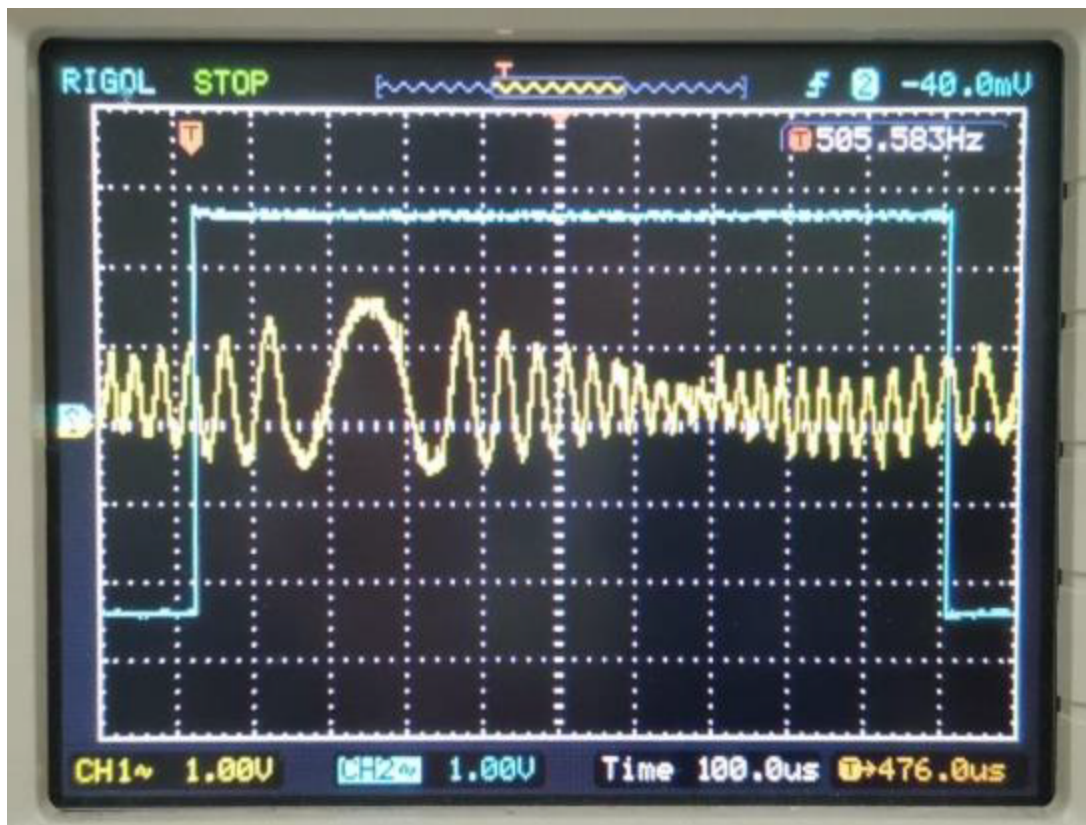


图 6: 示波器显示 $T/2$ 时间内拍频波形 (个) 数

波形数由完整波形数、波的首数、波的尾数三部分组成。根据示波器上显示计算, 波形的分数部份为不是一个完整波形的首数及尾数, 需在波群的两端, 可按反正弦函数折算为波形的分数部份, 即波形数 = 整数波形数 + 波的首数和尾数中满 $1/2$ 或 $1/4$ 或 $3/4$ 个波形分数部份 + $\frac{\sin^{-1} a}{360^\circ} + \frac{\sin^{-1} b}{360^\circ}$

式中 a 、 b 为波群的首、尾幅度和该处完整波形的振幅之比。波群指 $T/2$ 内的波形, 分数波形数若满 $1/2$ 个波形为 0.5, 满 $1/4$ 个波形为 0.25, 满 $3/4$ 个波形为 0.75。

如图 7, 在 $T/2$ 内, 整数波形数为 4, 尾数分数部分已满 $1/4$ 波形, $b = (H - h)/H = (1 - 0.6)/1 = 0.4$ 。所以

$$\text{波形数} = 4 + 0.25 + \frac{\sin^{-1} 0.4}{360^\circ} + \frac{\sin^{-1} 23.6^\circ}{360^\circ} = 4.25 + 0.07 = 4.32$$

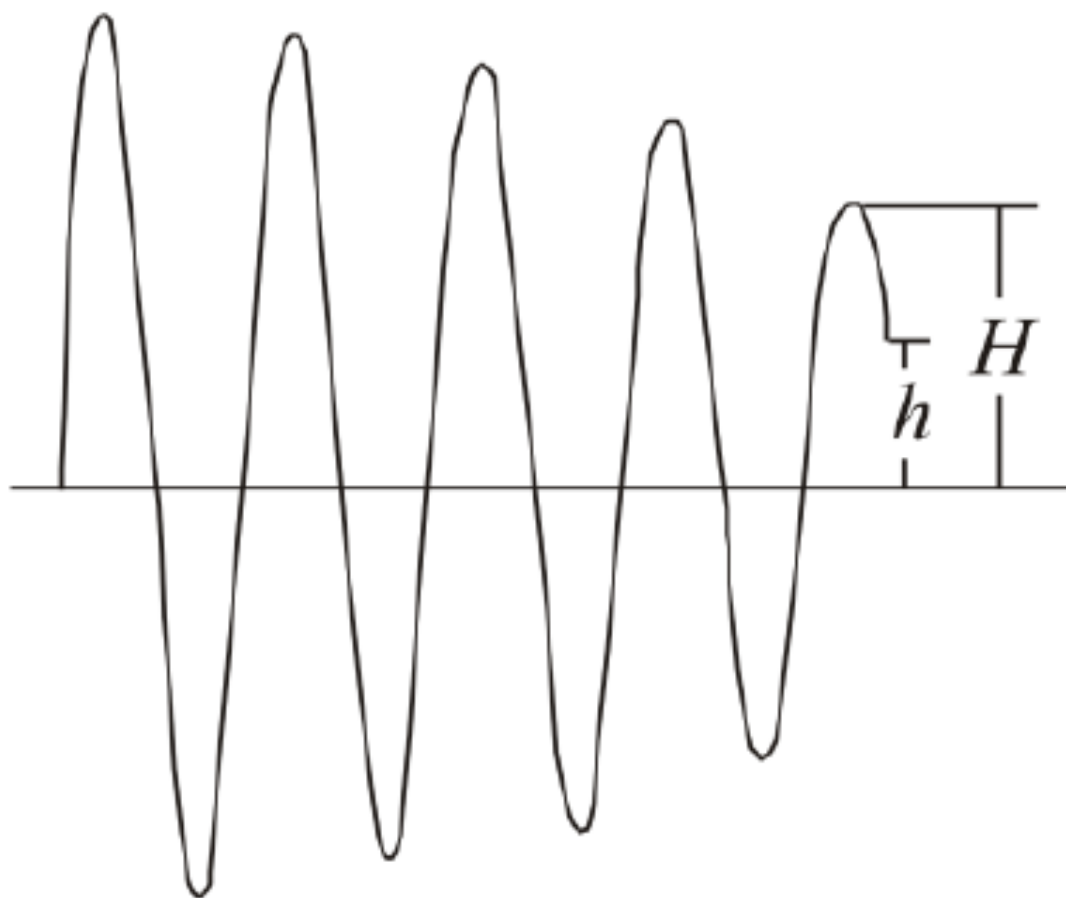


图 7: 计算波形数

1.4 实验前思考题

思考题 1.1: 简述位移光栅的多普勒频移原理。

当光栅相对于光源或观察者运动时，其周期性结构的运动会调制入射光的相位，导致衍射光的频率发生偏移。这一现象本质上是多普勒效应在周期性结构（光栅）中的体现。衍射光的频率偏移量可表示为：

$$\Delta f = \frac{mv}{d}$$

其中 m 为衍射级次， v 为光栅运动速度， d 为光栅常数。

思考题 1.2: 简述光拍的获得与检测方法和原理。

获得方法：

1. 双频激光干涉法：

(a) 方法：使用同一激光源分束为两束光，通过声光调制器（AOM）或电光调制器（EOM）对

其中一束进行频率调制，使两束光产生微小频率差 (Δf)。

(b) 原理：调制器通过外部信号（如射频驱动）改变光的相位或频率，实现两束光的频率偏移。

2. 多普勒频移法

(a) 方法：移动反射镜或被测物体，利用多普勒效应改变反射光的频率，与原参考光叠加产生拍频。

(b) 原理：运动导致光程变化，反射光频率偏移 ($\Delta f = 2v/\lambda$, v 为物体速度)，与参考光形成差频。

3. 双激光器法

(a) 方法：使用两个独立激光器，通过温度或电流微调使其频率接近，叠加后产生拍频。

(b) 关键：需稳定激光频率差，避免相位漂移。

光拍的检测方法：

1. 直接光电探测

(a) 步骤：两束光经分束器叠加后，由光电探测器（如光电二极管）接收光强信号。

(b) 探测器输出电信号的频率为两束光的频率差 (Δf)，可用示波器或频谱仪观测。

2. 外差检测技术

(a) 原理：将光拍频信号与本地振荡器 (LO) 信号混频，转换为中频信号，便于放大和测量。

(b) 应用：适用于高频 (GHz) 拍频信号的提取。

形成原理：两束频率相近的光波 (f_1 和 f_2) 在空间叠加后，合成光强为：

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \Delta\varphi]$$

其中 $f_1 - f_2 = \Delta f$ 为拍频频率， $\Delta\varphi$ 为相位差。

思考题 1.3: 简述微弱振动位移量的检测方法和原理。

基于多普勒效应，振动物体反射的激光频率会发生偏移，频移量 Δf 与振动速度 v 成正比：

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda}$$

通过积分速度信号可得到位移量。

专业：	物理学类	年级：	2023 级
姓名：	姚昊廷	学号：	22322091
室温：	22°C	实验地点：	A505 A4
学生签名：		评分：	
实验时间：	2025.3.11	教师签名：	

双光栅测量微弱振动位移量实验 实验记录

- 2.1 实验内容、步骤、结果
- 2.1.1 实验内容和步骤
- 2.2 实验过程遇到问题记录

专业：	物理学	年级：	2023 级
姓名：	姚昊廷	学号：	22322091
日期：	2025.3.11		
评分：		教师签名：	

双光栅测量微弱振动位移量实验 分析与讨论

3.1 分析与讨论

Appendices