

# 声光效应与光拍法测光的速度

## 目的和要求：

通过测量利用声光效应产生的光拍频波的波长和频率，采用双光束位相比较法测量光速。要求理解光拍频波的概念，掌握光拍法测量光速的原理和技术。通过对衍射光频谱的观测，了解声光效应的原理及驻波法产生光频移的实验条件和特点。

## 主要内容：

首先调节光路，用共焦球面扫描干涉仪观测激光通过声光晶体后产生的各级衍射光的频率和强度分布特点；然后选定某级衍射光，进一步调节光路，测量远程光光程的改变，采用双光束位相比较法测量光拍的波长和频率，根据测量原理得到光速。

## 重点和难点：

一是激光通过声光晶体后产生的各级衍射光的频率和强度分布特点的观测，二是双光束位相比较法测量光拍的波长和频率。远程光光路调节是本实验的难点。

## 仪器设备：

光速测量仪，共焦球面扫描干涉仪，频率计，示波器



## 补充资料：

要理解和完成本实验，除阅读本实验的讲义外，还需要阅读讲义第八单元“激光技术”的绪言部分和实验 8-1 “He-Ne 激光的纵模、横模分析”，以了解什么是激光模谱及其频率和强度分布特点，和测量激光模谱的共焦球面扫描干涉仪的原理。

### 1. 激光输出的模谱

二能级跃迁产生“单一频率”的激光谱线都有一定的线宽。首先，光谱线具有测不准关系决定的“自然线宽”；其次，增益介质为气体时，分子无规则运动相互碰撞导致激发态寿命缩短，会产生“碰撞增宽”，分子在激光输出方向的正反向运动会形成“多普勒增宽”。

激光在光学谐振腔中多次往返，被增益介质反复放大，当增益与损耗达到平衡时，在谐振腔中形成稳定的光场分布，产生稳定的激光输出。由于激光具有线宽，增益会随频率改变。

在谐振腔中，只有驻波场才是稳定的，称为“腔膜”。在激光线宽范围内，只有那些满足驻波条件，腔长是半波长的整数倍的频率才能被增益介质放大，只有超过增益阈值那些频率才真正被放大，从而形成激光输出的模谱。激光纵模的形成如图 1 所示。

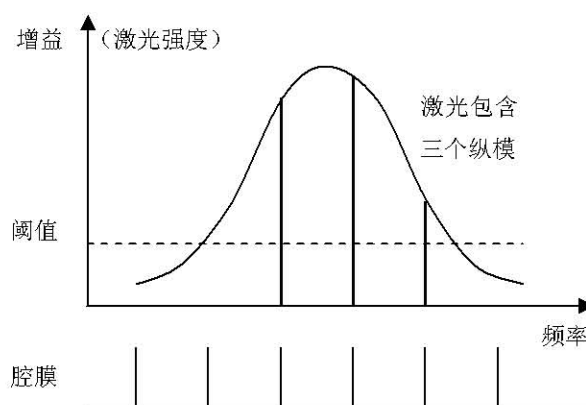


图 1 激光输出的频率和强度分布

### 2. 共焦球面扫描干涉仪

共焦球面扫描干涉仪是由二个半径等于腔长的球面半透半反镜构成。其中一面镜子固定，另一面镜子由加有锯齿波电压的压电陶瓷环驱动，从而使腔长  $L$  在很小的范围内做周期性线性变化。其光路如图 2 所示。

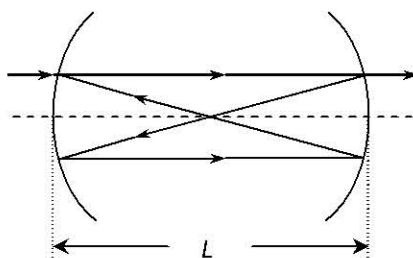


图 2 共焦球面扫描干涉仪的光路图

由图可见，光入射后反射  $4m$  ( $m=0,1,2,\dots$ ) 次透射，若相邻两次透射的光程差  $4L$  是波

长  $\lambda$  的整数倍： $4L = K\lambda$ ，则两束光产生干涉极大。腔长的改变可得到不同波长的干涉极大，当腔长变为  $L'$  时，则波长  $\lambda'$  产生干涉极大。

对上述干涉条件微分得： $4\Delta L = K\Delta\lambda = K(\lambda' - \lambda)$ 。由此，当镜间距离的变化量  $\Delta L$  改变  $\lambda/4$  时，则有  $K\lambda' = (K+1)\lambda$ 。即  $K$  级的波长  $\lambda'$  发生干涉极大时，波长  $\lambda$  的  $K+1$  级同时产生了干涉极大，因此二者无法分辨。这个波长差或频率差由上述干涉极大条件及其微分可导出为：

$$\Delta\lambda_{SR} = \frac{\lambda}{K} = \frac{\lambda^2}{4L}, \quad \Delta\nu_{SR} = \frac{c}{4L}$$

称为干涉仪的自由光谱区，是决定干涉仪能够测量的不重序的最大波长差或最大频率差，即干涉仪测量有意义的范围。在入射光波长确定后，每个扫描干涉仪的自由光谱区是确定的。

实验中，从示波器测出重复出现的频谱间距，根据自由光谱区的给定数值，即可标定激光模谱的频率间隔。

## 扩展阅读：

说明：

本材料是根据网络文章摘编而成。按年代排序，兼顾各种测量方法。许多光速的测量值及其精度不完全一致，有的甚至多达 3 种以上，难以一一核对。仅供参考，引用需谨慎。

## 光速的测量简史

真空中的光速是最古老的物理常数之一。光速的符号为  $c$ ，来自英语中的 constant，意为常数；或者拉丁语中的 celeritas，意为迅捷。根据现代物理学，所有电磁波，包括可见光，在真空中的速度是常数，即是光速。强相互作用、电磁作用、弱相互作用传播的速度都是光速，根据广义相对论，万有引力传播的速度也是光速，且已于 2003 年得以证实。

17 世纪前人们以为光速为无限大，包括弗兰西斯·培根、约翰内斯·开普勒和勒内·笛卡尔在内，普遍认为光速是无限的。最早于 1629 年，荷兰物理学家艾萨克·毕克曼(Isaac Beeckman)提出一项试验，一人将闪光灯反映一面镜子，约一英里，以测量光速。伽利略认为光速是有限的，1638 年他请二个人提灯笼各爬上相距仅约一公里的山上，第一组人掀开灯笼，并开始计时，对面山上的人看见亮光后掀开灯笼，第一组看见亮光后，停止计时，这是史上著名的测量光速的掩灯方案，这种测量方法实际测到的主要只是实验者的反应和人手的动作时间，所以伽利略的尝试没有成功。

1676 年，丹麦天文学家奥勒·罗默(Ole Romer)从木星每隔一定周期（约 1.75 天）出现的一次卫星蚀的整年连续观测，得出光速为有限值的结论。在罗默时代只知道地球轨道半径的近似值，惠更斯取半径为  $1.497 \times 10^8 \text{ km}$ ，根据罗默的数据推算出光速约为  $c = 2.143 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。地球绕日是椭圆轨道，远日点(7 月 4 日)为  $1.521 \times 10^8 \text{ km}$ ，近日点(1 月 3 日)为  $1.471 \times 10^8 \text{ km}$ ，后人用照相方法测量木星卫星蚀的时间，根据罗默法求得的光速为  $c = (2.99840 \pm 0.00060) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

1728 年，英国天文学家詹姆斯·布拉德雷 (James Bradley) 在 1725 年发现恒星在一年的

不同时间表观位置会发生变化，即光行差现象。他根据恒星光行差求得  $c = (2.95 \pm 0.05) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

1849年，法国物理学家斐索(Armand Hippolyte Louis Fizeau)是第一位成功用实验测定地面光速的人。实验方法大致为：光从半镀银面反射后，经高速旋转的齿轮投向反射镜，再沿原路返回。如果齿轮转过一齿所需的时间，正好与光往返的时间相等，就可透过半镀银面观测到光，从而根据齿轮的转速计算出光速。他在巴黎的苏冷与达蒙玛特勒相距 8633 米的两地进行测量，用旋转齿轮法测得  $c = (3.153 \pm 0.005) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

1856年，鲁道夫·科尔劳施(Rudolf Kohlrausch)和威廉·爱德华·韦伯(Wilhelm Eduard Weber)分别用静电单位(esu, electrostatic units)和电磁单位(emu, electromagnetic units)这两种单位对同一电量进行了精确测量，麦克斯韦根据他们的数据计算出电磁波在真空中的波速值为  $c = 3.1074 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。此值与菲佐的结果十分接近，这对人们确认光是电磁波起过很大作用。此方法的依据是电磁场波动方程。J.C.麦克斯韦根据他所建立的电磁场理论中的波动方程指出，电磁波在真空中的传播速度等于静电单位电量与电磁单位电量的比值，只要在实验上分别用这两种单位测量同一电量（或电流），就可算出电磁波的波速。

1862年，傅科(Jean Bernard Léon Foucault)是用旋转镜法测得空气中光速的第二人，结果是  $c = (2.980 \pm 0.005) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。旋转镜法的原理早在 1834 年就已为惠更斯提出，它主要用一个高匀速转动的镜面来代替齿轮装置，由于光源较强，而且聚焦得较好，因此能极其精密地测量很短的时间间隔。原理和斐索的旋转齿轮法大同小异，另外，傅科还利用这个实验的基本原理，首次测出了光在水(介质)中的速度  $v < c$ ，这是对波动说的有力证据。

1874年，考尔纽(M.A.Cornu)改进了斐索的旋转齿轮法，测得  $c = 2.9999 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。他是第三位在地面上测到光速的。

1879年，美国物理学家迈克耳逊(Albert Abraham Michelson)把齿轮法和旋转镜法结合起来，用正八面钢质棱镜代替了旋转镜法中的旋转平面镜，创造了旋转棱镜法装置。他在相距 35373.21 米的两个山峰上完成的实验测得  $c = (2.99910 \pm 0.00050) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。1882年，他得到  $c = (2.99853 \pm 0.00060) \times 10^8 \text{ m/s}$ ，这个结果被公认为国际标准，沿用了 40 年。迈克耳逊的另一个著名试验是测定以太是否存在的实验，合作者是莫雷，被称为迈克耳逊-莫雷实验。

1926年，迈克耳逊进行光速测量已近五十年，付出了极大的努力。他根据 1600 次的实验结果，最后得到光速测定值为  $c = (2.99796 \pm 0.00004) \times 10^8 \text{ m/s}$ ，成为当时公认的最精确值。可是在推算真空中的光速时，迈克耳逊用的是空气的相速折射率，而非群速折射率，这一错误在 1929 年被伯奇发觉。改正后，1926 年的测量结果应为  $c = (2.99798 \pm 0.00004) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

1941年，安德孙(W.C.Anderson)用克尔盒法测得： $c = (2.99776 \pm 0.00006) \times 10^8 \text{ m/s}$ ，1951年贝格斯格兰用同样方法测得  $c = (2.997931 \pm 0.000003) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。克尔效应是一种电致双折射效应，可以得到线偏振光，配合尼科尔棱镜检偏，可由高频交变电场控制光的快速通断。克尔盒法是斐索旋转齿轮法开启的遮断法的发展，能对信号的发出和返回接收时刻自动记录。

1949年，阿斯拉克逊(Aslakson)用雷达法测得  $c = (2.997923 \pm 0.000024) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。雷达法用三角学测量地面两点间的距离，用电子技术测量电磁波通过该距离的时间，从而求得光速。

1950年，埃森(Essen)最先采用微波谐振腔法测定微波波长 $\lambda$ 和频率 $\nu$ ，然后按公式  $c = \nu\lambda$  计算光速。测量结果为  $c = (2.997925 \pm 0.000010) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。在埃森的实验中，将波长为 10cm 的微波输入到圆柱形的谐振腔中，形成驻波后，谐振腔的圆周长和波长 $\lambda$ 有如下的关系： $\pi d = 2.404825 \lambda$ 。用干涉法测量直径  $d$  可确定波长，而频率用逐级差频法测定。测量精度达  $10^{-7}$ 。



1952 年，英国物理学家 K.D.费罗姆(K.D.Froome)用微波干涉仪法测量光速得  $c = (2.9979250 \pm 0.0000010) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。微波干涉仪法主要是，将硅晶体倍频后的 72GHz 微波分成两束，再混合形成干涉，由可移动的喇叭探测最小值，移过 970 个半个波长，实现频率 $\nu$ 和波长 $\lambda$ 的精确测量，并同时测量空气折射率，从而测出空气中的光速。此值于 1957 年被推荐为国际推荐值使用，直至 1973 年。

1957 年，兰克(D.BiH.Rank)等人用带状光谱法测得  $c = (2.997932 \pm 0.000018) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。他们用微波谱测出双原子分子或线性多原子分子的转动常数，再由红外光谱测出分子振转常数。

1966 年，Karolus 和 Helmberger 用声光频移法测得  $c = (2.9979247 \pm 0.0000025) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。声光频移法也称光拍法，原理见本实验讲义。

1972 年，美国的 K.M.埃文森等人直接测量激光频率和真空中的波长， $c = (299792458 \pm 1.2) \text{ m/s}$ 。美国国家标准局和美国国立物理实验室于 1970 年代最先运用激光测定光速，由于激光的频率和波长的测量精确度已大大提高，所以用激光测速法的测量精度可达  $10^{-9}$ ，比以前已有最精密的实验方法提高精度约 100 倍。测得的光速分别为  $c = (299792457.4 \pm 1.1) \text{ m/s}$  和  $c = (299792459.0 \pm 8) \text{ m/s}$

1975 年，第十五届国际计量大会的决议，将 1972 年 K.M.埃文森等人的测量结果作为现代真空中光速的最可靠值： $c = (299792458 \pm 1.2) \text{ m/s}$ 。由于电子学的发展，用克尔盒、谐振腔、光电测距仪等方法，光速的测定，比直接用光学方法又提高了一个数量级。60 年代激光器发明，运用稳频激光器，可以大大降低光速测量的不确定度。1973 年精度达到 0.004ppm。

1983 年，在第十七届国际计量大会上作出决定，将真空中的光速定为精确值， $c = 299,792,458$ 。1983 年 10 月 20 日，在巴黎举行的第十七届国际计量大会通过了米的新定义，在这个定义中，光速是规定值，用以取代保存在巴黎国际计量局的铂制米原器，作为定义“米”的标准：“1 米是在  $1/299792458 \text{ s}$  的时间间隔内光在真空中所传播路径的长度”。并规定，以后不需对光速进行测量了。这样光速作为常数在物理学中的根本地位被确立了下来。因此，自 1983 年以来，不管我们对光速的测量作了多少精确的修正，都不会影响到光速值，却会影响到米的长度。

近代测量真空中光速的简表：

年代	主持人	方式	光速( $10^8 \text{ m/s}$ )	不确定度(m/s)
1907	Rosa、Dorsey	esu/emu	2.99784	15000
1928	Karolus 等	克尔盒	2.99786	15000
1947	Essen 等	谐振腔	2.99792	4000
1949	Aslakson	雷达	2.99792.4	2400
1951	Bergstand	光电测距仪	2.99793.1	260
1954	Froome	微波干涉仪	2.9979275	300
1964	Rank 等	带光谱	2.997928	400
1972	Bay 等	稳频 He-Ne 激光器	2.99792462	18

1973		平差	2.997924580	1.2
1974	Blaney	稳频 CO <sub>2</sub> 激光器	2.997924590	0.6
1976	Woods 等		2.997924588	0.2
1980	Baird 等	稳频 He-Ne 激光器	2.997924581	1.9
1983	国际协议	规定	2.99792458	(精确值)