

激光

在计量技术中的应用

譯 文 集

中国计量科学研究院情报室編

目 录

计量与测试

1. 激光在计量上的应用……………(日)三桥庆喜 (1)
2. 激光的应用……………(日)伊藤昇司等 (28)
3. 长度测量用的激光干涉仪
……………(苏)В. П. Коронкевич等 (47)
4. 用激光作温度探测器
……………(西德)U. Kogelschatz (55)
5. 采用环形激光器的流量计
……………(苏)Е. П. Гершт (61)
6. 用激光多普勒法测量流速
……………(西德)B. Lehmann (65)
7. 用激光干涉仪测量振动…………… T. Licht (75)
8. 用激光干涉仪测量振幅和振型
……………(美)H. A. Deferrari等 (82)
9. 测量机械冲击的光学调频系统
……………(美)L. D. Ballard 等 (102)
10. 激光在生产透镜和物镜中的应用
……………(日)K. Matsumoto (110)
11. 环形激光器和环形激光干涉仪
……………(西德)F. Malota (117)

长度与时间频率基准

1. 激光的频率稳定和长度基准
……………(日)稻田光一 (129)

2. 用分子飽和吸收激光研究3.39微米甲烷
譜綫的压强位移和加寬
..... (美) R. L. Barger 等 (157)
3. 波长3.39微米多模激光輻射的甲烷飽和
收吸..... (苏) Н. Г. Басов 等 (164)
4. He-Ne 激光頻率的研究和穩定
..... (苏) Н. Б. Кошеляевский等 (166)
5. 用甲烷吸收綫穩定激光..... (172)
6. 用甲烷穩定的氮氖激光器的頻率穩定性
..... (美) H. Hellwing (176)

穩 頻 方 法

1. 單頻穩定 He-Ne 激光器.....(苏)Ленкова (182)
2. 氣體激光器的頻率穩定
..... (美) A. D. White (189)
3. 在6328埃激光內氖的飽和吸收
..... (美) P. H. Lee 等 (206)
4. 在充有 Ne 同位素混合物的增益管的 6328
埃激光內 Ne 的飽和吸收
..... (美) W. G. Schweitzer (209)
5. 用0.633微米 He-Ne 激光器研究碘蒸汽
的吸收輪廓和反 Lamb 下陷
..... (美) J. D. Knox等 (214)
6. 用处在交變磁場中的氖吸收室穩定氮氖
激光頻率.....(西德) V. Bodalaj (219)
7. 用外界吸收室得到穩定氣體激光頻率信
号的分析.....(西德) V. Bodalaj (223)
8. 用处在交變磁場中的氖吸收室穩定氮氖

激光頻率.....(西德) V. Bodalaj (231)

9. 氦氖激光波长作为长度副基准

..... (西德) V. Bodalaj (255)

波 长 比 对

633 毫微米氦氖激光波长的复現性

.....(美、英、西德) K. D. Mielenz等 (267)

谐振腔理论

激光光束和諧振腔

..... (美) K. Kogelnik等 (277)

激光在计量上的应用

三桥庆喜*

1. 引 言

“激光”(Laser)这个词, 英語的意思是“輻射的受激发射光放大器”(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), 可以说它是由量子电子学成果产生的一門新的有趣的科学技术。1960年, Maiman 采用紅宝石成功地实现了方向好的、非常細的、高强度的、单色性好的紅光的振蕩。到目前为止, 已經发现两千种以上的介質可以作激光用, 振蕩光譜的波长从0.2微米的紫外綫扩展到990微米的毫米波。激光的連續輸出可达8,800瓦, 脉冲輸出可达10亿瓦, 能有如此巨大的輸出功率, 是过去不敢想像的。

在发现激光振蕩的初期, 物理学家对激光的研究, 着重解释振蕩的机制, 进行理論方面的研究。此后, 为了扩大振蕩波长的范围, 增大輸出功率和提高方向性、单色性、稳定性等方面的性能, 以及使装置小型化、牢固化和寿命长, 应用了电学、物理学、化学、机械等各个領域的科学知識。激光的价值, 开始作为單純的可見光源, 引起了应用光学工作者的兴趣; 随着激光的发展, 在电学、物理学、化学、机械、土木、建筑、医疗等一切領域中已进入試用的阶段。因此, 激光即将

*日本技术院电气試驗所

.. 50047 1 -

以激光技术、激光工程这样一門新的独立分支而出現。

激光的应用領域之一是在計量上的应用。激光在計量上的应用是随着激光性能的提高而得到进一步发展的。在激光应用中很早就做出了实用的具体装置。本文将介紹激光的現狀与激光的特性，并列举激光在計量上应用的具体示例。

2. 激光的現狀和特性

激光的基本原理，是1958年 Townes 等人所預見的。1960年，Maiman 用紅宝石取得了輝煌的成果。此后，激光技术得到了迅速的发展。在1960年，Javan 等人用氦氖气体激光器实现了第一次連續振蕩。其后相繼制出了半导体激光器（1962年），巨脉冲激光器（1962年）、环形激光器（1963年）、二氧化碳激光器（1964年）、模同步激光器（1964年）等重要的激光器。振蕩波长从0.25微米到990微米达到4个数量级的范围，輸出从10微瓦到100千兆瓦，实际上达到16个数量级的范围。最近微微秒脉冲的实现，高次諧波激光，参量激光器中的激光振蕩頻率的調制技术，外差技术等等都得到迅速发展，随之使激光装置的长寿命和稳定性等性能在激光应用中得到了进一步的发展。表1示出了激光器的現狀。

激光的特征如前所述，除了振蕩頻率范围非常寬、輸出能量非常大外，用相干性所表示的单色性与方向性也很好。激光在計量上的应用，几乎全是利用它很高的相干性，下面对此加以詳細說明。

2.1 单色性（时间相干性）

图1示出光源的种类和单色性。木阳、螢光灯等光源的光譜是带状的，而且是所謂白光(a)。若降低放电管的气压，則譜綫为綫状的，放电气体的原子射出特有的顏色（相当于所謂

表 1 主要激光器的现状和特性

特 性 激 励 方 法 种 类	波 长 λ (微米)	调 谐 范 围 (微米)	速 调 输 出 (瓦)	脉 冲 输 出 (瓦)	效 率 %	频 率 宽 度 Δf (赫)	光 束 的 散 射 角 $\Delta \Omega$ (弧度)	相 干 性
气 体 放 电	0.25~990	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	$\sim 10^6$	$\sim 10^6$		$1 \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	优
	0.332(紫外), 0.540(绿)	50毫瓦	10千瓦					
	0.633(红), 1.15, 3.39	~ 1			0.1	2.0	0.5毫弧度	
	0.488(蓝), 0.515(绿)	~ 1000			0.1			
	蓝, 绿, 黄, 红 10.6 (红外)	8,800 ⁽¹⁾			~ 30			
固 体 红 宝 石 玻 璃 YAG FAP	0.694 (红)	$10^{-3} \sim 10^2$	2	$\sim 10^{11}$	$10^9 \sim 10^{11}$	$10^{-2} \sim 10^{-3}$		良
	1.06 (红外)			20千兆瓦	~ 2			
	1.06 (红外)			100千兆瓦 ⁽²⁾	~ 5			
	1.06 (红外)	$0.98 \sim 1.16^{(3)}$	200		~ 5			
	1.06 (红外)	$(0.6 \sim 4.0)$			~ 6.3			
溶 液 无机液体 有机 电 注 半 导 体 掺 入	1.06 (红外) 可见 ⁽⁵⁾			10兆瓦 5兆瓦	~ 1 $\sim 80^4$			
	0.25~22	0.07		$\sim 10^3$	~ 70	$10^{16} \sim 10^{12}$	10^{-1}	可
	0.85(77°K), 0.9(室温)	0.05						

表註: (1) 使用长约200米的巨大放电管, (2) 使用激光放大器, (3) 用YAG激光的二
次谐波 (0.53微米, 绿), 激励钕盐、钕酸盐结晶, 得到的频率调谐范围为0.98~1.16微米 (频率宽度
45,000千兆赫), (4) 用YAG激光的输出激光色素 (碱性苋香红) 所得到的转换效率, (5) 可见光的波
长范围是0.38~0.78微米。

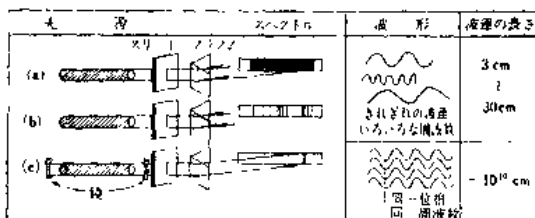


图 1 光的种类和单色性

图中文字注解:

(a) 高压气体放电, (b) 低压气体放电, (c) 气体激光器
 スペクトル—光谱; スリット—狭缝; プリズム—稜鏡;
 波連の長さ—波列的长度; きれぎれの波連—いろいろな周波数
 数——一段波列的各种频率; 同一位相——同一相位; 同一周
 波数——同一频率

氖灯(b))。这种光是由自发发射原子的能态降低时作为衰减振荡辐射出的光,所以短波行进的长度到3~30厘米时,若将此称为波列,则波列与波列的相位关系就完全混乱了。因此,在放电管两端安上镜子,装配为光谱谐振腔而构成(c),即为气体激光器装置。这时从原子所辐射的光中,符合谐振腔的谐振条件的光,在这两个镜子之间来回反射,促使同一频率的光射出(所谓受激发射),这样,光的波列变长,振幅也被放大。激光的意思是由受激发射放大的光,这说明了上述的事实。单色性用光的频率宽度 Δf 表示,它的值越小表示单色性越好,它与波列的长度之间有下列关系:

$$\left. \begin{aligned} \Delta f \cdot \Delta t &= 1 \\ \Delta l &= c \cdot \Delta t = c / \Delta f \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 c 是光速, Δf 是相干时间, Δl 是相干距离。原来作为单色性最高的长度基准所使用的 ^{86}Kr 灯(波长6,057.80211埃,1

埃 $=10^{-10}$ 米) 的頻率寬度是 400 兆赫, 相干距離約為 80 厘米, 而用穩定後的氦氖激光 (波長 1.15 微米, 頻率 2.6×10^{14} 赫) 觀察得到的最小頻率寬度是 2 赫, 相干距離為 10^{10} 厘米, 這就証實了激光具有非常高的單色性。相干距離也稱為可干涉距離。單色性能夠用圖 2 的邁克爾遜干涉儀測量。用半透鏡將從光源射出的光束一分为二, 分別用固定鏡 M_1 和可動鏡 M_2 反射後

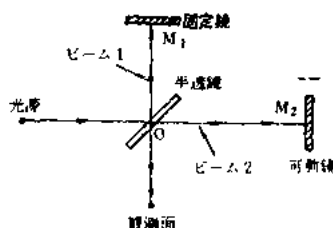


圖 2 單色性的測量

圖中文字註解:

ビーム 1—光束 1 ビーム 2—光束 2

使其在觀察面重合, 這時光束 1 與光束 2 的相位因光程差 $= 2(OM_1 - OM_2)$ 而不同, 如圖 3 所示同相位的情形互相加強,

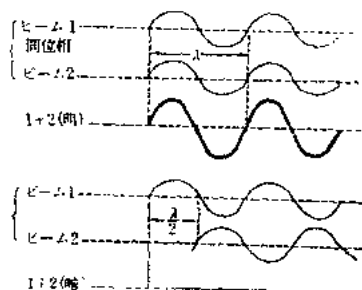


圖 3 相干性的解說

圖中文字註解:

ビーム 1—光束 1 ビーム 2—光束 2 同位相—同相位

观察面变得明亮。移动可动鏡，改变了光程差，而使光束 1 和 2 相互减弱，观察面变暗。現在，若光的波列长为 Δl ，移动可动鏡，設光程差为 ΔL 以上，光束 1 和 2 已經变得不相干，观察面的明暗不变，这样做能够求波列的长度，即能求单色性。所以单色性能够用可干涉距离的值表示、以原来的单色光而言，光程差只有在 20~30 厘米以下才能进行干涉测量，由于激光的出现，就可进行光程差非常长的干涉测量。

2.2 方向性（空间相干性）

空間的相干性是表示光束的空間相位分布。在激光的情况下，如图 4 (b) 所示，因为从 S_1, S_2 所发出的光的相位一致，所以通过图中的双狭缝后重合，在观察面上即可得到明暗的干涉条纹。而原来的单色光，如图 4 (a) 所示，从針孔射出的光一分

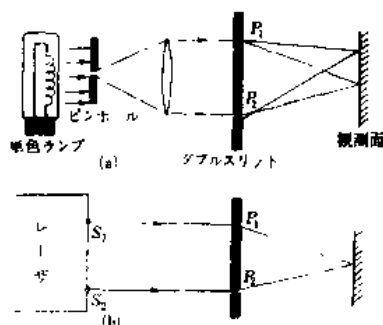


图 4 空间相干性的测量

图中文字註解

単色ランプ—単色灯，ピンホール—針孔，ダブルスリット—双狭縫，
レーザー—激光。

为二而不能重合，故得不到干涉条纹。原因是从单色灯的各部分射出的光的相位性关系不是一定的，在观察面上一經平均化，就不出現明暗的干涉条纹。空間相干性根据下面两种情

况：(a)扩大针孔开口面的大小，(b)扩大双狭缝间隔，作为相位相同的开口面的大小，可以比较空间干涉性的程度。空间的相干性，作为方向性一般是用光束的发射角来表示的。两者之间有如下关系：

$$\Delta\theta = 2.44 \frac{\lambda}{D} \quad (\text{弧度}) \quad (2)$$

式中 $\Delta\theta$ 是光束的散射角， D 是表示空间相干性的光源开口面的直径， λ 是波长。气体激光的光束发射角为 10^{-4} (弧度) 左右。在原来的光源中，弧光灯具有较好的方向性，但其发散角为 10 (弧度) 左右。这就表明了激光的优越性。

光的方向性与光的会聚性有密切的关系，将直径 D 的单色光用焦距 F 的透镜聚焦时，在聚焦面上所得光斑的直径 R 以下式表示：

$$R = F \cdot \Delta\theta = 2.44 \frac{F}{D} \lambda \quad (3)$$

上式表明方向性越好，聚焦光斑越小。所以若将单色性、方向性好的激光聚焦，则能使能量集中在直径为几个波长左右的光斑上，即使输出较小的激光，在聚焦面上的能量密度也非常高，例如输出为 3 毫瓦的氦氖气体激光，能与 1000 瓦的水银灯相匹敌。

图 5 示出一种方法，即从炽热光源中取出而提高其单色性和方向性的光。(a) 示出各种不同频率的光向着不同的方向前进，(b) 用针孔限制光的前进方向而提高其方向性，(c) 是用滤色镜提高单色性的情形，若合用(b)，(c)，则在一定的方向上可得到单色的光。经这样改进后，能量将受到损失。另外制造频率宽度 10^{10} 赫 (约 1 埃) 以下的滤色镜是非常困难的，同时价格昂贵，达 100 万元。人工得到与激光同样的单色光是不可能

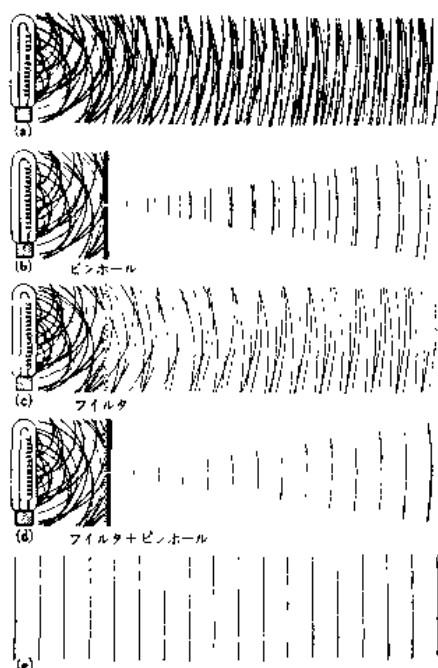


图5 炽热光源性能的改进

图中文字註解:

ピンホール—針孔 フィルタ—濾色鏡 フィルタ+ピンホール—濾色鏡
与針孔合用

的，这样所得的单色光如图(c)所示呈球面波，随着光的前进，能量向空間发散。如图(e)所示，激光是平面波，即使传布很远，能量也不发散。方向性良好，能以很窄的光束射到很远的距离。

激光的单色性好，是由于构成激光器振腔的反射鏡具有波长选择性（类似于濾色鏡），并且利用原子固有能级跃迁的原因；再者，激光的装置是用受激发射的，能使它的頻率寬度很

窄。方向性好是由于受激振荡光在直径很小的长放电管内往返，即可以认为是通过若干个针孔。

3. 激光在计量上应用的基本考察

以上所述的激光特性是适用于计量技术的，这是激光在计量上应用的基本原理。

激光在计量上应用有下述三种分类方法：（1）按激光的不同应用范围、用途来分类；（2）按使用激光的种类不同来分类；（3）按使用激光的不同特性来分类等。方法（1）、（2）容易理解，而且不易引起混乱，但是过于烦琐。第（3）类方法的优点是从激光应用于计量的原理上来把握的。但是，相干性、单色性、方向性、平行性、聚合性、大功率、高能量等特性互有关联，笼统分类是有困难的。本文基于激光应用的考察方法来分类，比较有意义，具体可见表2：

（a）相干性的应用

（a-1）频率的应用（时间应用计量）

（a-2）光学的应用（空间应用计量）

（b）细光线的应用

（c）新的应用方法

（a）频率的应用 激光就是继微波、毫米波以后更高频率（比微波高 $10^3 \sim 10^5$ 倍）的相干电磁波，因此积极地被采用了。光学的应用，在原来的光学技术上，即使原理清楚，由于不能得到优质的光源，实现也是不可能的，不能得到所需要的测量精度。加上需要测量时间长等原因，光学测量方法不能得到广泛的应用。但是激光的出现，加之新的应用技术的发现，使原先的光学计量法能得以实用化。利用上述两个可相干性的测量方法，激光的电场强度与普通的频率一样，为：

表 2

分 类	具 体 例 子	测 量 对 象	信 号	測量技术 測量仪器	应用激光 的 特 性	特 征	
应用激光相干性的測量	频率的应用	激光多普勒仪	速 度 轉 速 流 速 振 动	频率的 变 化	两个频率 的 混 合 (示波計 数器)	系频率非常高 的电磁波。能 够选出用途广 的輸出	精度高 測量范 围大
	光学的应用	干涉仪	长 度 位 移	相 位 的 变化	两个光波 重合的攝 影胶卷	系可相干距离 长而輸出也 大的光源。能 得到大的率 值功率	測量范 围大, 測 量时, 問 短, 精 度高
		等离子区 探测	等离子区 密度				
应用細光綫的 測量	激光測 距仪	距 离	时間的 幅 度	計数器	能够得到高輸 出而非常短的 脉冲幅光, 細 光綫达到很远	精 度 高, 測 量 簡 便	
	激光經 緯仪	方 向	强 度 变 化	电视攝 影机			
新的 測量	激光陀 螺仪	轉 速 方 向	振蕩頻 率差	計 数 器	激光的振蕩理 論与广义相对 論理論相符合	精 度 高, 不 受重 力影 响	
	光 譜 分 析	物質的 組 成	发 光	光 譜 仪	能够聚集时 間的空 間 能 量	測 量 簡 便, 測 量 时 間 短	

$$A(x, y)\sin(Kz - \omega t) \quad (4)$$

其中 x, y, z 是坐标, $A(x, y)$ 是光的振幅, $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$ 是波数, λ 是光的波长, $\omega = 2\pi f$ 是光的角频率, f 是光频, c 是光速。

因为完全是作为正弦波来表示的, 故从测量的对象中取出必要的信息, 在这个正弦波中添入那个信息即可。但是由于光的角频率很高, 不能直接观察它的变化, 所以需要一定的检测技术。为此, 一般要将激光一分为二, 一束射向测量对象(通过

或者反射），另一束作为参考光使用。以频率的语言来说就是将两者混合，以光学的语言来说就是将两者重合。分别检测作为时间、空间的强度变化的差拍信号或干涉条纹。原理如图 6 所示。

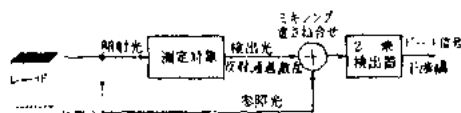


图 6 利用其相干性的激光在计量上的应用

图中文字註解：

レーザー—激光器，検出光—检测光 散乱—散射，ミキシング—混合并重合
乗検出器—倍乘检测器 ビート信号—差拍信号 干渉縞—干涉条纹
参照光—参考光

将检测光与参考光分别假设为 $A_1 \sin(kz_1 - \omega_1 t)$ 与 $A_2 \sin(kz_2 - \omega_2 t)$ ，检测器的输出，根据倍乘检测特性（肉眼，光电元件，摄影胶卷皆是能量检测器，即检测与振幅平方成比例的值）给出

$$I_{\text{輸出}} = \langle \{A_1 \sin(kz_1 - \omega_1 t) + A_2 \sin(kz_2 - \omega_2 t)\}^2 \rangle$$

$\langle \rangle$ 表示测定时间内的平均。因为激光角频率 ω_1, ω_2 不能检测它的时间响应，所以只能观察与测定仪器响应速度成比例的平均值，所以

$$I_{\text{輸出}} = \frac{1}{2} (A_1^2 + A_2^2) + A_1 A_2 \cdot \cos \{k(z_1 - z_2) - (\omega_1 - \omega_2)t\} -$$

$$A_1 A_2 \cos \{k(z_1 + z_2) - (\omega_1 + \omega_2)t\}$$

第三项也是非常高的频率，得到的仅是变化的平均值而已。

$$\therefore I_{\text{輸出}} = \left. \begin{aligned} &\text{直流分量} \\ &+ A_1 A_2 \cos(\Delta\phi - \Delta\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $\Delta\phi = k(z_1 - z_2)$, $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$

但是，由于激光可以看成平面波，故設 $A_1(x, y) = \text{常数} \equiv A_1$ 。

在应用頻率时， $\Delta\phi = 0$ 即检测器的信号是用 $\Delta\omega$ 作为正弦变化的差拍信号得到時間变化的信号的。所謂光学的应用可以說是一种測量方法， $\Delta\omega = 0$ 即用 $\Delta\phi$ 作为正弦变化的干涉条紋得到空間变化的检测信号。頻率应用方法是固定座标 z_1, z_2 ，即空間的位置关系一定，将具有時間量綱(因次)的測量对象作为時間量綱，即作为差拍信号 $\Delta\omega$ 来測量的方法。光学应用方法設時間量綱为一定，将具有空間量綱的測量对象作为空間的量綱，即作为干涉条紋 $\Delta\phi$ 进行空間測量的技术。

頻率的应用即時間的測量本質上是綫性的，为了得到空間信息，或者空間的多个排列測定元件或者改变測量時間，即需要作扫描的技术。对此，在光学的应用上，本質上处理的是二維信息，这是它的主要特征。我們知道激光在选择時間測量和空間測量方面，具有很大的自由度。

(b) 细光线的应用 这是应用激光具有很好的方向性，射程远，并且非常細的光綫仍然不向空間散发的特性，即可作直綫的基准使用。因此能作为无接触測量的光源使用。这种方法以時間量綱測量空間量綱的測量对象或者反之。不論那种情形，也不是絕對需要測量激光的相干性的。在空間与時間的測量中存在測不准关系，

$$\Delta x \cdot \Delta t \simeq 1 \quad (6)$$

該式表示，若測量時間长，空間的座标 Δx 則不确定，若直接求出空間的座标，時間則不确定。所以，若应用在空間的非常細的激光光束，則意味着能进行時間量綱的高精度測量。此外，若应用以微微秒脉冲那样短的時間間隔的振蕩激光，則意味着能进行空間量綱的高精度測量。

(c) 新的測量方法 从改进原来电-光技术的簡單思考方法

来看，它是一种难于理解的应用。即它是利用被测对象改变激光振荡条件使激光振荡频率变化的现象，或者是应用激光来实现当前电磁波不能达到的高能量密度的特点，如此等等皆属于新的测量方法这一类。

4. 频率的应用方法

所谓多普勒效应是指波动的波源与观察者的相对位置发生变化时，观察者观察到波的频率发生的变化（频率随运动的变化变高或变低）。用激光照射运动物体，如果将反射、透射、散射的光与参考光混频后检测，则得到与运动物体的速度成比例的拍频信号。通过分析拍频信号，就可以计量速度、转速、流速、振动等量。假设照射光（参考光）与检测光的角频率分别为 ω_1 和 ω_2 ，运动物体的速度为 v ，光速为 c ，则得到：

$$\omega_2 = \left(1 + \frac{v}{c}\right) \omega_1 \quad (7)$$

通过(5)式得到拍频信号为

$$\Delta\omega = \omega_b = \frac{v}{c} \omega_2 \quad (8)$$

激光与原来的微波相比，由于频率约高 $10^3 \sim 10^5$ 倍，所以作为拍频与微波测定相比，对于同一拍频的微波频率，它可以测定 $10^3 \sim 10^5$ 分之一的低速。若以氦氖激光（波长 0.633 微米、频率 4.7×10^{14} 赫）为例，如果能测量 1 赫的拍频，则能测定 10^{-7} 米/秒的低速。此外，若能检测 10 千兆赫的拍频信号，则能测定 10^3 米/秒的高速。因为在电子学中，频率测定的精度极高，这就表明激光多普勒仪也能以高精度进行测定。

4.1 速度的测量

如图 2 所示，用迈克尔逊型干涉仪，以速度 v 移动可动