

原子从低能态跃迁到激发态。

这样激励时，振荡频率与辅助辐射有关。为了摆脱这种相依性，我们企图用辉光或借助于量子放大器预先放大的激光光束来激励分子，这种装置应该具有很高的频率稳定度。

图 17 示出了这种振荡器的结构。用甲醛分子作为工作物质。精确度为四位数的甲醛跃迁频率同作为放大器的 He-Xe 激光器 ( $\lambda \sim 3.5$  微米) 的跃迁频率正好吻合。

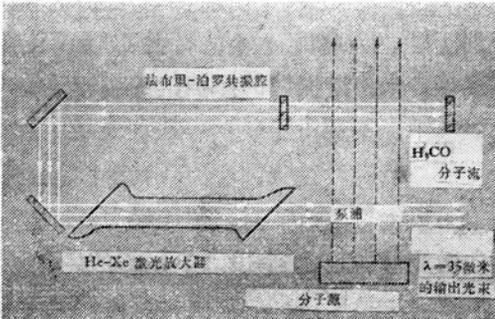


图 17 分子束光频标准示意图。

另一种引人注目的光频标准是自调激光器。它的反馈假设由反射镜来完成，这一反

射镜在激光辐射作用下自动出现 (见图 18)。如果用“适当的”物质放入垂直的光波中，则

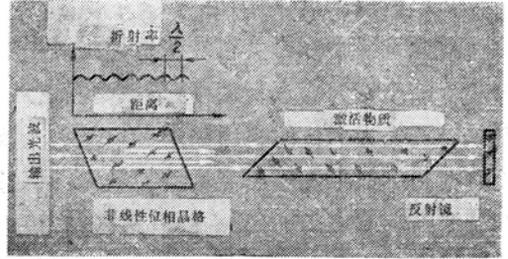


图 18 自调激光器图示。

在场为极大值的那些地方 (由于非线性现象) 物质的折射率将产生变化。其结果，就会在物质中形成很多折射率的跃变，这种跃变乃是能够反射光束的特殊立体晶格。这种激光器就具有自动调制谱线频率的特性。

初步计算表明，最近就能制成稳定度为  $\frac{\Delta\nu}{\nu} \sim 10^{-13}$  或更高的光波段频率标准。

这里所举的例子，只是激光器的某些应用，并不包罗万象。但仅此也足以证明，量子电子学将要进入人类活动的各个领域。

译自 H. Г. Басов; *Природа*, 1967 (Окт.),

№10, 17~27

## 激光在精密测量中的应用

### 1. 前言

激光的出色特点，已为人们所熟知<sup>[1]</sup>，关于它的应用也有许多叙述<sup>[2]</sup>。激光在计量方面的应用是极有前途的一种应用，由于接二连三的研究正在进行，所以这里尽可能避免与迄今为止的那些讲述相重复，只限于介绍激光在精密测量中的应用及其必要的基础知识。同时，文中略去了有关一些建议和设计的介绍，而对基础实验完成了的或产品化

了的东西则作尽可能详尽的叙述。至于激光器的构造和特性，请参阅文献 1 等综述性文章。

### 2. 激光应用于精密测量的条件

能够用于精密测定的是气体激光，但须更进一步满足下面三个条件：

- (a) 单波型振荡；
- (b) 激光波长稳定；

(c) 激光输出稳定。

这些将依次进行简单的叙述。

### 2-1 单波型振荡

激光一般是在以其自发辐射为扩展中心的几个波长处同时进行振荡(多波型振荡),但对以波长为单位的精密测定必须是单一波长的振荡。如果发展出高增益的激光管、且其谐振腔反射镜间的间隔在 30 厘米以下仍能振荡,那么这一点便很容易办到。但是,在某些情况下反而希望获得双波型振荡,利用波长极其相近的两束激光进行测量,这是激光的特色,被认为在今后是有应用价值的。

### 2-2 激光波长的稳定

以  $\nu_m$  表示光谱线的中心频率(在可见区为  $4 \sim 7 \times 10^{14}$  赫),以  $\Delta\nu_m$  表示半宽度( $\sim 10^9$  赫),以  $\nu_c$  表示谐振腔的谐振频率,以  $\Delta\nu_c$  表示它的半宽度( $\sim$  几兆赫),这时(参考图 1)激光的振荡频率  $\nu_0$  可近似地表示为:

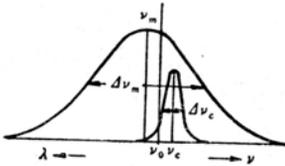


图 1  $\nu_m$ ,  $\nu_c$ ,  $\nu_0$  的相对位置之一例。

$$\nu_0 = \frac{\nu_m \nu_c (\Delta\nu_m + \Delta\nu_c)}{\nu_m \Delta\nu_m + \nu_c \Delta\nu_c} \quad (1)$$

$$\simeq \nu_c + (\nu_m - \nu_c) \frac{\Delta\nu_c}{\Delta\nu_m} \quad (2)$$

其中  $\nu_c$  为

$$\nu_c = N \cdot \frac{c}{2nd} \quad (3)$$

这里,  $N$  为大的整数,  $c$  为光速,  $d$  为谐振腔的镜间间隔,  $n$  为谐振腔间介质的折射

率。

由(2)、(3)式,振荡频率  $\nu_0$  因  $d$ 、 $n$ 、 $\nu_m$ 、 $\Delta\nu_c$ 、 $\Delta\nu_m$  各项而变,以此顺次对各项作一简单考察。

i)  $d$ : 如果支持谐振腔反射镜的台受到  $\Delta T$  的温度变化,则由于

$$\alpha \Delta T = \frac{\delta d}{d} = -\frac{\delta \nu_c}{\nu_c} \quad (4)$$

$\nu_c$  将受到  $\delta \nu_c$  的变化。这里,  $\alpha$  是支持台材料的热膨胀系数。就是说为使激光波长保持例如  $10^{-7}$  的稳定性,则  $d$  的稳定性必须保持到  $10^{-7}$ ,为此用  $\alpha$  小的材料(如殷钢、融石英等)来作谐振腔的撑挡,并将装置放入恒温槽中。不过由于激光器是发热的放电管,故环境温度控制在  $1/100$  度是极其困难的。用殷钢或融石英时,预计只用温度控制要使激光波长稳定到  $10^{-8}$  是困难的。

再者,由于同样的理由,若谐振腔的反射镜受到振动,与此相应地振荡波长亦将变动,并表现为输出噪音。为此,要求反射镜保持机械结构的严固性,例如采用把反射镜固定在石英管两端面那样的结构。

ii)  $n$ : 在外反射镜激光装置中,若激光管和反射镜间空气的折射率  $n$  发生变化,则这部分光程差  $nd$  亦变化,由(3)式  $\nu_c$  亦将变化。在空气中,  $1^\circ\text{C}$  的温度变化, 3 毫米汞柱的气压变化,均给出  $1 \times 10^{-6}$  的折射率  $n$  的变化,因此,对高稳定度的情形就成问题。空气的抖动和反射镜的振动是同等重要的问题。为了获得高稳定度,就应作成内反射镜形,或在反射镜与激光管间抽真空<sup>[4]</sup>。同时,也可以利用这个  $n$  的变化来控制激光振荡波长。

iii)  $\nu_m$ 、 $\Delta\nu_c$ 、 $\Delta\nu_m$ : 自发辐射的中心频率  $\nu_m$  因激光管内气体压力引起的压力效应,外电场或内电场引起的斯塔克效应,磁场引

起的塞曼效应,原子与电子流碰撞引起的多普勒效应等而发生改变。这些,在光谱学中都是从理论上和实验上已了解到的<sup>[6]</sup>,其偏移的程度一般在 $10^{-7}\sim 10^{-8}$ 数量级。(2)式中 $\nu_m$ 只表现在比第一项小的修正项中,由此可见 $\nu_m$ 变动的影晌不成问题。然而,如后文所述,激光振荡波长的稳定通常是以 $\nu_m$ 作标准的。即调节共振器内的光程差 $nd$ ,使 $\nu_c$ 与 $\nu_m$ 一致,由自动控制而获得 $\nu_0=\nu_c=\nu_m$ 的稳定振荡。结果,在这种情况下 $\nu_m$ 的变化直接和被控激光波长的再现性相联系。

$\Delta\nu_c$ 、 $\Delta\nu_m$ 的变化一般很小,且如上所述,当 $\nu_c=\nu_m$ 时,这项的影响变为零。

### 2.3 激光输出的稳定

气体放电管比之热辐射体,一般说,其光强度的变动是较大的,加之这个气体放电管是作为放大振荡源使用的,故这一切变动都被大大地放大。为此,对要求激光输出稳定的精密测定(例如,光电测量)而言,激光输出的稳定就成为必要。对一般目的,采用恒流回路等方法使激励电源稳定往往就够了。当更进一步需要高稳定度时,用光电管接收一部分激光,将其输出电压与预先设定的规定电压相比,将差加以放大,而驱动控制系统,这就是所谓的光控制方法<sup>[7]</sup>。为获得 $10^{-8}$ 以上的高稳定输出的激光,应该同时对波长加以稳定。

## 3. 单波型、稳定化的激光器

### 3.1 单波型激光器

在气体激光器中,已报导了从约2800埃的紫外区到500微米的远红外区1000条以上的谱线的激光振荡,其中约200条激光线的装置已有商品出售。日本正在生产的有He-Ne激光器(1.15微米、6328埃),氩激光器(5145埃、4880埃及另外10根线)。特

别是作为He-Ne激光器单波型振荡用的全长约15厘米的激光管,正在出售。如果配以由平面镜和置于20厘米的间隔处的3米以上曲率半径的反射镜的谐振腔则易得完全的单波型。

### 3.2 通过温度控制实现的波长稳定

如2.2所述,用融石英或殷钢作共振器的撑挡,把整个激光器浸入恒温槽的办法,是最简单的波长稳定化措施。限于恒温槽的精度,仅可以得到 $10^{-7}\sim 10^{-8}$ 的稳定性。已有外透镜形的(美帝贝尔电话实验室<sup>[8]</sup>)、内透镜形的(加拿大国家研究委员会<sup>[9]</sup>,澳大利亚国家标准实验室<sup>[10]</sup>) (图2)。

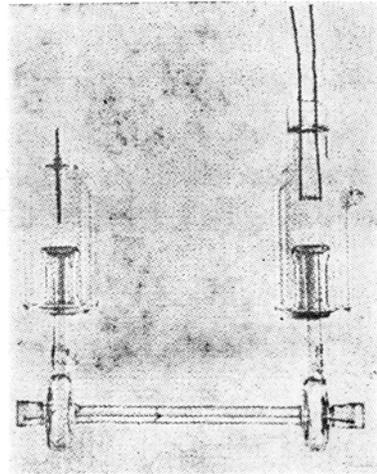


图2 内米勒形全石英气体激光器<sup>[10]</sup>。

再者,为了很好地进行温度控制,在低膨胀系数的谐振腔内侧插入短的、膨胀系数高的物质,其上安置反射镜,用类似于双金属的方法来实现温度补偿<sup>[4][12]</sup>。

### 3.3 通过内调制实现稳定

使谐振腔的 $nd$ 值上下摆动,由控制系统使 $\nu_c$ 的振动中心和 $\nu_m$ 重合,这是进行波长稳定的一种方式。

i) 通过单纯的反射镜振动进行稳定的装置:如果用电磁方法将一块反射镜以频

率  $f$  进行振动。若其振动中心频率  $\nu_c$  和  $\nu_m$  不重合, 则如图 3 所示, 激光输出亦以频率  $f$  进行调制。但是, 如果和  $\nu_m$  重合, 则  $f$  的成分变得极小,  $2f$  的成分变得极大, 这样就可以对电磁振动子的直流成分进行自动控制而达到稳定波长之目的。在英帝国家物理实验室<sup>[11]</sup>, 这种方式大约稳定到  $2 \times 10^{-8}$ 。

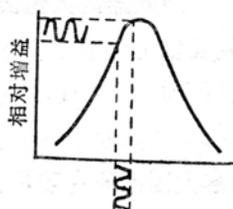


图 3 反射镜的振动与激光输出的关系。

光谱物理公司的产品(图 4)是由压电晶体调制, 用自动或手动的方式进行同样的控制的。(该装置用殷钢构成撑挡架, 因此, 为避免外磁场的磁致伸缩效应起见, 用  $\mu$  合金(钹镍合金)将全体包起来, 且用  $\text{Ne}^{20}$  代替 Ne)。

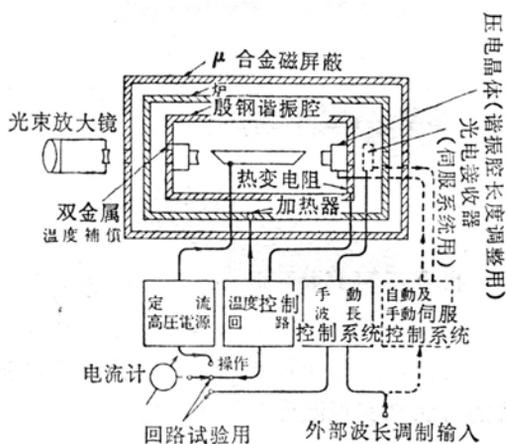


图 4 单波型稳定激光器(光谱物理公司<sup>[12]</sup>)。

坂井等正在对这种方式进行研究<sup>[13]</sup>。

ii) 磁调谐高稳定装置: 这是由霜田-杰万在美帝麻省理工学院创制的<sup>[14]</sup>。它是内反射镜形装置, 其构造示于图 5, 其外观

示于图 6。用四根殷钢棒将装有反射镜的法兰盘固定, 若在这根棒上绕上线圈并通以直流电, 则因磁致伸缩效应, 殷钢棒将伸缩数微米, 因此能够调节镜的间隔、倾角等。如果封入作为 Ne 的同位素  $\text{Ne}^{20}$  或  $\text{Ne}^{22}$  使之作单波型振荡, 并使镜的间隔作半波长变化, 那么 1.15 微米的激光输出就成为图 7 那样。

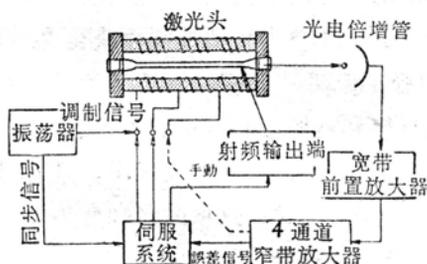


图 5 磁调谐稳定激光器结构图<sup>[14]</sup>。

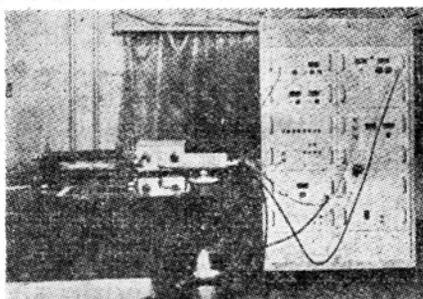


图 6 磁调谐稳定激光器外观(日本电子公司)。

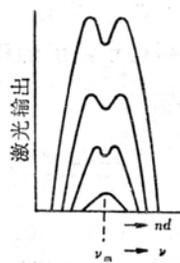


图 7 拉姆凹陷。

就是说, 当放电强度比振荡阈值稍高一点时, 仅仅出现小峰。然而, 若再稍加强激发, 则在小峰中部出现凹陷。这叫做拉姆(Lamb)凹陷, 因为最先是由拉姆从理论上预言的

[15]。这个凹陷的中心对应于自发辐射时的中心频率  $\nu_m$ 。(这时,若用天然氖,则峰形的对称性将遭破坏。)为了将振荡经常自动地控制在凹陷的中心,在线圈上同时通以交流电( $\sim 70$  赫),使平面镜作微小振动,这时的激光输出用光电倍增管接收,调整平面镜间的间隔,激发电平和镜的平行度以获得第一第二第三等三个零微分点。在霜田的实验中,已经实现了  $5 \times 10^{-10}$  程度的波长稳定度。在东大霜田研究所以及计量研究所正在更进一步研究这一问题,日本电子公司已有产品。

### 3.4 由外调制控制的稳定

3.3 所述的是使反射镜作实际的振动来进行调节的方法,然而,还有一种用外部装置来检知波长偏移,对反射镜作准静态调节的方法。在前者,激光的振荡波长是振动的,只不过其中心和  $\nu_m$  重合而已,而在后者,其特长则是可以控制频率常与  $\nu_m$  重合。兹叙述一个例子。

i) 利用塞曼吸收的方法 [16]: 将 He-Ne 激光引入在轴线方向上加有磁场的吸收池(He-Ne 混合气体)(参考图 8(a))。这时,由于塞曼效应,分成图 8(b)的右旋和左旋圆偏振光的两条吸收光谱。若振荡频率  $\nu_0$  与  $\nu_m$  不重合,则两偏振光成分的吸收就不同。因此,如果通过  $\lambda/4$  电光开关使激光成为右旋或左旋圆偏振光交替进入吸收池,那么在光电倍增管上,由于吸收的差别将出现交流成分。将此输出放大,经相位甄别,再引入附于一面激光反射镜的压电晶体,通过这一自动控制系统,使交流成分为零。这样  $\nu_0$  即与  $\nu_m$  重合。

ii) 其他:用多孔筛的方法 [17],用 2 支激光管的方法 [18],用法布里-珀罗标准具的方法等都作为建议被提出。

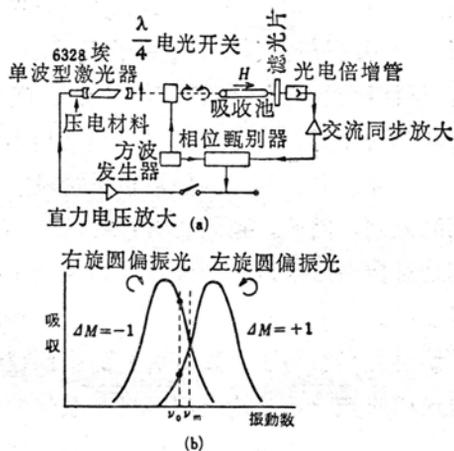


图 8 利用塞曼效应的波长稳定 [16]。

### 3.5 激光波长的稳定性与真空波长的测定

在美帝国家标准局,以  $\text{Hg}^{198}$  灯的绿线作为标准通过法布里-珀罗标准具,从光学上测定了 He-Ne 激光(6328 埃)的波长稳定性 [17]。用熔石英撑挡,不作任何控制时的稳定性为  $5 \times 10^{-7}$ ,以手动方法不断地调整使单波型输出最大时,是  $5 \times 10^{-8}$ 。

此外,英帝国家物理实验室对用  $\text{He}^3$ - $\text{Ne}^{20}$  同位素的二种(已经伺服控制的)激光器,以  $\text{Kr}^{86}$  作标准,测定了真空波长 [28],结果得到  $\lambda_{\text{真空}} = 6329.9138$  埃及  $6329.9145$  埃。二者之差被认为是由于气体压力以及放电条件的差异产生的,然而,这些值与用天然 Ne 时的真空波长  $6329.9141$  埃以  $1 \times 10^{-7}$  的精度相一致。

## 4. 利用激光的精密测定

### 4.1 激光在精密测定上的应用

众所周知,利用光的干涉作长度精密测定有二种干涉仪 [25]。一种是干涉条纹计数器,是在移动干涉仪一臂的反射镜时对干涉条纹的移动数进行计数的测定方法。另一种是干涉规,它是测量三波长以上的干涉条纹

的尾数，再用重迭法进行测定的方法。干涉仪以往所用的光源 (Cd 灯、Hg<sup>198</sup>、Kr<sup>86</sup> 灯等)，干涉距离较短，能测定的最大长度为 20~50 厘米，超过这个长度时必须采用中继法。对气体激光，其干涉距离可以说没有实用上的限制，因此，用它代替过去的光源，尤其是对数十厘米以上的大尺寸精密测定，是能发挥其威力的。与此同时，它使干涉仪的设计也变得容易了。迄今为止的干涉仪，是由这样的光学系统构成的，这个系统的参考面位于测定面移动范围的中央，但是在激光的场合中，这样的考虑由于干涉距离十分长而变得不必要。

利用谐振腔反射率的关系，可以制成单根谱线的激光器。但至少到目前为止，制成稳定激光器的只是 He-Ne 激光器 (6,328 埃或 1.15 微米)，因此，在这种情况下，适宜用干涉条纹计数法来测定。实际上后面三个应用例子都是这种方式。在这情况下，考虑到可动镜移动的机械精度、光路中空气的抖动及其他条件，实现精密测定的适用范围在数米左右。

另一方面，由重迭法(干涉规法)实现的精密测定，或许因为多于三根谱线振荡的稳度激光器迄今尚未制成，所以它作为激光的应用尚未见到。在这点上，使氩激光器在可见区数根谱线处同时振荡是可能的，所以制成适合这个目的的氩激光器只是时间长短的问题。在这种情况下，如果按照梭井的解释<sup>[2]</sup>，以  $5\lambda/100$  作为能测的干涉条纹尾数的精度，到数米是最有效的。

这样，只要以激光作光源，用迄今的干涉测定法，能够作有效精密测定的长度，估计为 30 厘米到 5 米。对这个以上的长度，必须探索能有效利用激光特点的独特方法。作为一个例子，有关光拍的利用将在 4.5 节叙述。

#### 4.2 标准尺的自动测定

英帝国家物理实验室研制了用激光在 15 分钟内以 1 毫米的间隔自动测定 1 米的标准尺的装置<sup>[20]</sup>。激光器如 3.3 i) 所述，现在的测定精度是 0.25 微米。

装置的略图示于图 9。标尺 A 装载在一个通过油压机构以恒定速度 (约 2 毫米/秒) 在床子上移动的可动台上，其刻度线成象在光电显微镜 B 内的狭缝上。激光通过两个半透镜被分割成为直通成分和往返于可动台一端 D 的来往成分，然后汇合造成干涉花样。由可动台移动引起的干涉条纹的移动通过光电二极管-干涉条纹计数装置进行测定。刻度线的象通过光电显微镜的狭缝时所产生的信号使一个计数装置的开关打开，计数开始；如果下一个刻度线来到，则将这个计数装置关闭，而开启另一个计数器。这样交替地使用两个计数器。由于可动台的移动速度是一定的，故干涉条纹中一条以下的尾数，可用干涉条纹间隔与刻度线在时间轴上的相对位置来决定，其精度是 0.02 微米。计算值与室温、大气压、水蒸气含有率的测定值一起在纸带上打孔，将这些送入数字计算机，则就能获得标尺线的误差。

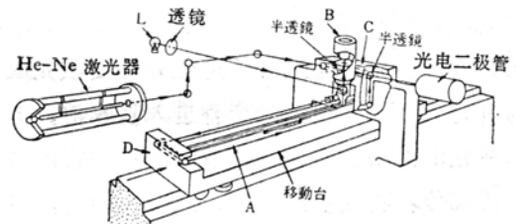


图 9 用激光的标准尺自动测定装置<sup>[20]</sup>。

#### 4.3 激光干涉测长仪

激光干涉测长仪<sup>[21]</sup>已由卡特勒·哈默 (Cutler-Hammer) 公司<sup>[22]</sup>、以及光机构 (OPTO-Mechanism) 公司<sup>[23]</sup>投产。设置在机械

的可动台上的屋脊棱形反射镜的移动量用干涉条纹计数法测定，其用法示于图 10。而卡特勒·哈默公司的产品结构示于图 11。

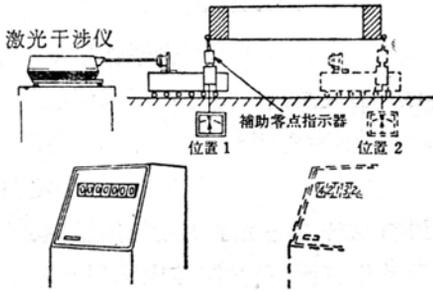


图 10 用激光干涉仪进行的测定。

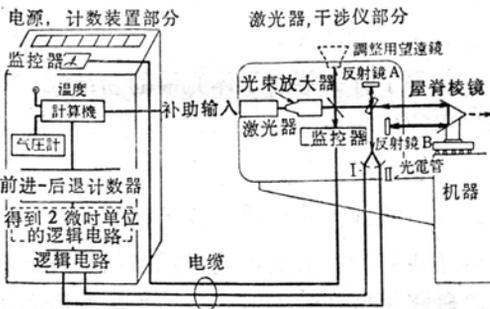


图 11 激光干涉仪。

在图 11 中，采用波长为 He-Ne 6,328 埃、反射镜间距为 10 厘米的小型激光装置，其波长通过温度控制稳定至  $1 \times 10^{-7}$ 。所用的是迈克尔逊型干涉仪，用两个光电接收器来测定干涉条纹中相位相差  $90^\circ$  的两点的强度，干涉条纹的前进和后退相抵消，并被计数。同时，空气的温度以及气压的变动引起的波长变化在计算过程中直接补偿。其结果用 7-8 行数字显示（以吋为单位），并可打印在纸带上。

由产品广告得到的这两种产品的主要规格示于表 1。

表 1 激光干涉仪的主要规格

	卡特勒·哈默	光机构*
测定范围	100 吋	200 吋
精度	0.000030 吋或 0.000010 吋/1 吋的被测长度	0.000004 吋 + $0.5 \times 10^{-6} \times$ 测定长
往返精度	$\pm 0.000010$ 吋	$\pm 0.000003$ 吋
最大移动速度	60 吋/分	120 吋/分

\* 仪器较佳精度的参数。

#### 4.4 用激光控制刻线机

美帝麻省理工学院及其他公司已把用激光进行反射光栅刻线机的控制问题纳入计划，然而因需长时间连续使用，激光的寿命就成问题。在低强度的高次光谱仍能观察到的那些点，激光被用来检查反射光栅。

#### 4.5 利用光差拍的长度测定

在以双波型振荡的激光器中，以  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  表示其波长，以  $f$  表示两波长间的差拍的频率。当构成图 12 那样的迈克尔逊干涉仪时，光电检测器倍增管的输出由下式给出

$$I = A_1(1 + \cos 2\pi ft) + A_2 \{1 + \cos 2\pi f(t - 2x/c)\},$$

这里  $2x$  是  $M_2$  反射的光和  $M_3$  反射的光的光程差。对输出作频率  $f$  的调谐放大时，有

$$I_f = \frac{1}{\sqrt{2}} [A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(4\pi fx/c)]^{1/2}.$$

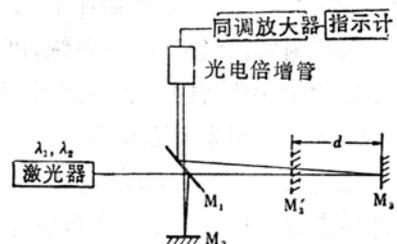


图 12 利用光的差拍进行长度测定。

(下转第 35 页)

## 以快速运动的枪炮弹泵浦激光器

据报导,苏修正在研究被枪炮加速的快速运动体泵浦中等功率激光器的可能性。

据苏修物理研究所的拉宾诺维奇 (M. S. Rabinovich) 说,现代武器的发射能量范围,从普通步枪的几千焦耳到炮弹的几百千焦耳。其重复率为每秒 10 发到 30 发;效率为 1% 时,1 千焦耳能量可产生 10 焦耳激光。

将子弹能量转化为泵浦能量的机理可能是子弹前沿的压缩波所产生的闪光或者是由子弹产生的磁流体发电能。

在闪光的场合下,1 呎的程长保持约 3 公里/秒的速度,就会产生足够强的泵浦闪

光,特别是当它通过一股高发射率的喷气流时,更是如此。

在磁流体的场合下,当子弹横过一个强磁场,电能由感应产生。被运动体电离的气体提供必要的传导电路。

拉宾诺维奇已观察到速度为 3 公里/秒、程长约 30 厘米时,可产生几十兆瓦的脉冲功率。

他认为可用爆炸泵浦法为实验室激光器建立碰撞泵浦系统,而不求助于电容器组。

译自 *Electronic Design*, 1967 (Sept. 27), 15, № 20, 32

(上接第 29 页)

因此,当反射镜  $M_3$  移动一距离  $d$ , 而输出由极大值变到下一个极大值 (任一正弦波的周期都行) 时,则得

$$d = c/2f.$$

假如  $d$ ,  $f$  从实验中求出,则可以求出光速  $c$ ; 反之从  $c$  和  $f$  可以求  $d$ 。在这种情况下,  $d$  的测定精度依赖于  $c$  值的精度以及  $I_f$  的相位的测定精度。

### 4.6 激光测距仪

从精密测定的观点来看,有前途的是使用激光作为距离测定器的激光测距仪。采用红宝石激光器的巨脉冲,通过从目标散射回来的光脉冲的时间间隔来测定距离的装置,已由雷瑟恩、休斯、马丁等公司投产。野外便携型(重量约 20 公斤)的测定精度,对 10 公里的被测距离为几米。它在原理上和光电测距仪相似,但以气体激光器代替迄今的水银灯之后,则方向性好,强度大,因此可以

期待提高精度。这样的装置已由光谱物理公司用 He-Ne 激光器,电光系统公司用氩激光器试制成功。人造卫星(使用 360 个屋脊棱形反射镜)的距离测定实验<sup>[26]</sup>也已进行。

### 5. 结束语

以上叙述了单波型稳定激光器的现状和对精密测定的应用例子。解说前者的比重之所以大是因为目前在实用上大都只是用激光器代替迄今的光源。在这种场合,同时利用激光的相干性、方向性、高强度等特性,至于激光的特别应用,则须进一步研究、探索。这样就要求激光的寿命至少能确实保证 1000 小时以上。这将成为激光小型化的困难,是无论如何都必须解决的问题。

### 参考文献(略)

译自 田幸敏治,《精密机械》,1966, 32, № 9 (9月), 660~666