

光电译文

第 3 集

北京光电技术研究所

激光参量测试专集

目 录

绝对激光频率测量	(1)
亚毫米和远红外激光频率的绝对测量	(2)
激光的测量技术—波长和频率的测量	(9)
关于利用粗线条衍射光栅测量红外激光束参量的可能性	(13)
激光器波长稳定性的测量	(16)
测量脉冲固体激光线宽技术	(20)
激光辐射功率密度测量仪	(22)
对激光波长进行绝对测量的装置	(24)
激光功率和能量仪器	(26)
测量知激光脉冲时硅光二极管的速度及线性的分析和测量	(27)
激光测量仪参量的测试方法	(47)
红外光谱范围激光波长的测定	(52)
激光的测量技术—振荡模的选择和谐振	(55)
激光的测量技术—模式分析	(61)
激光束的干涉测量	(67)
关于利用多普勒位移测量激光频率的问题	(70)
高斯激光束参数的快速测量技术	(73)
光谱线碰撞加宽的测量方法	(75)
激光器输出反射镜上场的相位分布的测量	(77)

绝对激光频率测量

译自——‘Physics Today’ April 1972, P17-18

如果知道作为长度标准的频率的精确值，或是知道作为频率标准的波长的精确值，就可确定光速 C 。虽然波长测量在可见光至近红外区（三微米左右）是很容易完成的，但至今测量较长波长还有困难，而目前对频率的测量仍限制在微波范围。美国国家标准局在科罗拉多州的一个研究组最近报道了最佳绝对频率测量值，他们的方法是使用最初在麻省理工学院所用的金属—金属二极管进行振荡器混合。

这个研究组进行了一系列的实验，完成了与国家标准局（NBS）铯频率标准有关的3.39微米、88京赫（1京赫= 10^{12} 赫）氦氖激光的一连串频率测量。（之所以进行一连串实验，是因为两个频率差多于12的系数就不能进行直接比较）。在单独的研究中已经求出了激光的波长值。

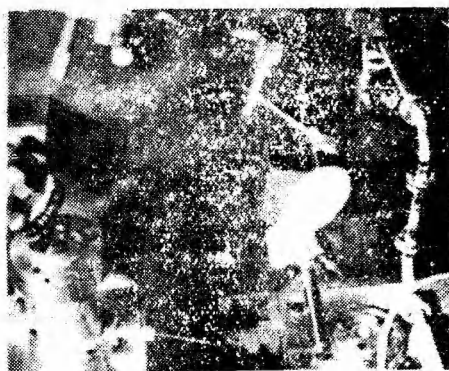
目前的结果为 $88,376245 \pm 55 \times 10^{-8}$ 京赫，达到了 6×10^{-7} 的精度，但仍没有增加光速 C 的精度。这个研究组计划用稳频激光器重复进行以上一系列实验，他们期望所得的频率测量值精度达到 0.5×10^{-8} 。得出较精确的光速 C 值有助于天文研究，或是某些只受光速 C 精度限制的研究。精确的高频技术对于原子物理学确定吸收共振的实际中心很有价值。

美国国家标准局的研究组和麻省理工学院的杰凡（Javan）研究组都进行了绝对高频的测量研究，杰凡（Javan）研究组从1965年就开始将频率测量扩展到远红外，作为向较高频率测量的第一步。在微波区域，用硅点接触二极管中产生的谐波进行频率测量。

杰凡（Javan）研究组在致力于研究半导体点接触二极管的变化之后，试图研究金属—金属二极管的混频。至1968年，研制成功响应时间短至 10^{-12} 秒的金属—金属点接触二极管，并有可能使响应时间达到 10^{-13} 至

10^{-14} 秒（红外区域）。1969年他们用这种半导体二极管实现了二氧化碳的9微米跃迁与28微米水蒸汽谱线的合成。在1970年他们报道了当时所测量的脉冲一氧化碳激光的58京赫（52微米）谱线的最高频率。

与此同时，国家标准局用镍-钨二极管也着手进行和麻省理工学院相同的高频率测量。他们从氘化氢0.89京赫（337微米）谱线的十二次谐波合成出10.7京赫（28微米）的水蒸汽谱线，并继续做了一系列实验，通过几个二氧化碳频率才得出目前测量值。最后是用88千兆赫的辐射与R（30）10.2微米二氧化碳谱线的三次谐波拍频再加一个48京赫的速调管来测量



亚毫米和远红外激光频率的绝对测量

译自——The Radio and Electronic Engineer 第42卷 第7期

提要:

对照谐波发生以及在点接触型二极管中混频、拍频检测的基本频率标准,直接测量了氰化氢激光器和水蒸汽激光器的发射频率。对氰化氢(HCN)激光器(337微米)所测得的频率值为: 890760.2 ± 0.2 兆赫; 对水蒸汽(H_2O)激光器(118微米)所测得的频率值为 2527952.5 ± 1.5 兆赫。此外,在10.7京赫(兆兆赫)水蒸汽(H_2O)激光器谱线进行了初步测量。

1、引言

将激光频率和光速的直接测量(不借助波长测量)用于发展甚高分辨率光谱学和时间标准及频率标准是重要的新的一步。至今只能在微波范围和微波以下范围将振荡频率直接与9千兆赫的铯频率标准相比较或直接与例如石英晶体振荡器这样的二次频率标准相比较,因为在这个范围内的这些频率标准正是其本身。在亚毫米和红外激光器问世之后,可利用谐波混频技术使频率测量达到88京赫(3.39微米)使微波和红外技术连系在一起⁽¹⁾。在理论上,有可能获得 10^{-11} 量级的精度,而目前的光速值— 3×10^7 的精度限制了波长的直接测量⁽²⁾。

氦-氟激光频率。美国国家标准局所做的一系列实验所用的都是连续波激光器。

国家标准局做了一项单独的而又和一系列研究有关的实验,他们制作了一台甲烷稳定的氦-氟激光器并测量了这台激光器的激光波长,精度达 10^{-8} — 3.3922314 微米。国家标准局的另一个研究组将他们的激光器调谐到甲烷吸收频率上,所得频率为 $88.376245 \pm 55 \times 10^{-8}$ 千兆赫,因此,

光速 $C = 2.9979267 \times 10^{-8} \pm 20$ 米/秒

这与已知的光速值: $2.9979250 \times 10^{-8} \pm 10$ 米/秒相符。这个研究组指出与此同时,另一个研究组进行了波长的精确测量,测量结果可能使光速值精度达 10^{-8} 提高了三倍。

麻省理工学院的杰凡(Javan)研究组停止了较高频率测量的研究,而开始对具有极窄共振的极稳定10微米二氧化碳激光进行研究。目前正在进行两方面的实验,一是测量激光频率,另一是测量波长。波长测量的工作是和美国珀金·埃尔莫公司(Perkin Elmer Corporation)合作进行的。这项研究的目的是期望所得的光速C值达到 10^{-8} 的精度。然而,杰凡(Javan)指出:“实际上这项研究工作归属国家标准局,应当在一些研究标准的实验室进行并将测量结果加以比较”。目前,麻省理工学院的研究组仍在进行其它甚窄原子共振的精密光谱研究(例如: He^+ 和 H)。

1967年Hocker等人首次进行了激光频率的直接测量(3),他们用在800—1000千兆赫范围内的几个频率上振荡的氘化氢激光器输出与一个毫米波速调管的高次谐波在一点接触型钨-硅二极管中混频。通过调谐速调管确定频率以得到适应的拍频,这些拍频可经放大并在光谱分析仪上测量。速调管的频率是依照作为标准技术的石英晶体振荡器而进行下转换方法确定的。最近广泛发展的亚毫米波和红外激光器(4, 5)获得了波长长于20微米的近百条波长连续激光谱线,还在10微米左右波长范围获得了200条谱线。

应用Hocker等人所采用的速调管谐波**直接混频**技术很难测量超过3京赫(100微米)的频率,而且扩展至88京赫范围的测量是通过用几台经过适当挑选能在1—200千兆范围内产生拍频的激光器进行谐波混频实验才可实现的。例如,测量32京赫(9微米)二氧化碳激光频率是用氘化氢891千兆(337微米)激光谱线的12次谐波与10.7京赫(28微米)水蒸汽激光谱线有效地混频,然后再将后者的三次谐波与二氧化碳激光频率混频(7-9)。

在过去的四年期间,用这些技术直接测量了氰化氘(DCN)、水蒸汽(H_2O)、重水蒸汽(D_2O)、二氧化碳(CO_2)、一氧化碳(CO)和氦-氖(He-Ne)激光频率(1,10-13)。所测的最高频率是(约为 10^{-6})氦-氖激光的88京赫(3.39微米)的发射频率(1)。

这项工作的最重要方面之一是发展了具有接近红外频率的响应时间的适宜的混频器。一个极可观的进展是在频率超过3京赫范围时,用金属-氧化物-金属(MOM)型二极管取代了微波硅-钨点接触混频器(12)。对3.39微米氦-氖激光谱线的测量证明这种二极管的截止频率超过88京赫。与此相同的另一进展是采用根据约瑟夫森效应原理制成的超导点接触型器件(14)。特别是证明了能够在铌-铌点接触二极管中将高达400次的X-带速调管的谐波与78微米(3.8京赫)的水蒸汽激光谱线混频以获得能够进行放大和测量的拍频(14)。这种获得极高次谐波混频的能力可能超过金属-氧化物-金属或金属半导体点接触混频器,但目前频率上限的实验值为3.8京赫范围,这要比后者的截止频率低二十倍(15)。

本文所述的内容是测量光速精度达 10^{-8} 研究计划的一部分,这个计划是利用谐波的逐级混频、用一个毫米波速调管进行拍频检测方法和用一台氘化氢激光器与一台水蒸汽激光器作为转换振荡器对二氧化碳9微米的激光发射进行波长和频率的直接测量(16)。本文涉及氘化氢激光的891千兆赫频率的测量和锁定以及水蒸汽的2.5京赫(118微米)和10.7京赫(28微米)激光谱线的频率测量。

2、亚毫米激光器

2.1 氘化氢激光器

氘化氢激光器是目前频率在1—10京赫范围内的功率最大的连续波光源。在直流放电激励条件下能产生几条很强的谱线,即频率为890、805和964千兆赫。这些谱线是由于氘化氢分子 $11'0$ 和 040 振动能态上的转动能级间的合适的粒子数反转产生的。

表1:表明了甲烷(CH_4)和氮气(N_2)对半混合所生成氘化氢分子中空心阴极放电的尺寸和运转条件。激光器无需进行冷却,因为激光输出最佳值时管壁温度约 $100^{\circ}C$ 。为了获得尽量窄的输出频率,最重要的是放电正极柱应有特别稳定的条纹。在以上条件时,在891千

表1 氟化氢和水蒸汽激光器的运转条件

	频率 (赫)	长度 (米)	直径 (毫米)	谐振腔型	电流 (安)	电 压 (千伏)	压力 (托)	输出功率 (毫瓦)
氟化氢 激光器	891千兆	8.5	100	共 焦	0.7	4.5	0.13	75
	805千兆	8.5	100	共 焦	0.7	4.5	0.13	25
	964千兆	8.5	100	共 焦	0.7	4.5	0.13	30
水蒸汽 激光器	2.5京赫	6.0	50	共 焦	1.0	2.8	0.3	20
	3.8京赫	8.0	50	折叠共焦	1.0	3.3	0.4	10
	10.7京赫	8.0	50	折叠共焦	0.5	4.8	0.4	100

兆赫上的激光频率宽度只有几千赫。(而无条纹放电使输出频率宽度增大约一个数量级)。用殷钢稳定的谐振腔内放置相距8米的两块曲率半径为10米的反射镜形成近似共焦谐振腔,用一厚0.05毫米45°角的聚乙烯腔分束器耦合输出能量。在一端装置双反射镜的作用是将反射镜调谐到与主谐振腔成直角时使输出耦合在 $0 \sim 4r^2$ 范围变化,其中 r 是分束器的振幅反射率。调谐主谐振腔可获得单模输出,因为在这个频率上激光多普勒增益外形远小于谐振腔模间隔 $C/2L$, L 为腔长, C 为光速。在891千兆赫频率上的激光输出为50~75毫瓦,这个功率值要比在964和805千兆赫频率上的输出功率小2~3倍,是用高莱池测量输出功率。

2.2 水蒸汽激光器

水分子在亚毫米和远红外区域有许多发射谱线,这些谱线是由于100, 020和001振动态中转动能级的微扰作用而产生的⁽¹⁹⁾。有意义的主要是118微米(2.5京赫)和28微米(10.7京赫)两条谱线。水蒸汽激光器的结构基本上与氟化氢激光器的结构相似,表1列出水蒸汽激光器的合适尺寸和运转条件。放电系统需用水冷。在2.5京赫(118微米)上的强输出激光时,谐振腔近似共焦,两块曲率半径为8米的反射镜相距6米。用一片45°0.01毫米厚的聚丙烯薄膜进行输出耦合,其双反射镜系统与氟化氢激光器的相似。虽然采用这个型式的谐振腔能够获得频率为10.7京赫(28微米)的合理输出功率,而将腔长增长到8米并用折叠共焦结构,即一面是平面镜,另一面是曲率半径为15米的凹面镜,可使模纯度和输出功率有显著提高。典型输出功率在10.7京赫时是100毫瓦,在2.5京赫时是10毫瓦。

2.3 金属-氧化物-金属(MOM)二极管

如果 R , r_s 和 C 分别是点接触检波器的势垒电阻、扩展电阻和接连电容(图1),那末,当 $r_s \ll R$ 时,频率 ω 的信号产生的势垒电压与 $(1 + \omega^2 r_s^2 C^2)^{-1/2}$ 成正比。对于金属-半导体点接触二极管,例如钨-硅二极管,其向上转移频率大约是3京赫⁽²⁰⁾,而这频率很少使用。若将点接触二极管的用途扩展到红外频率,至少要分别或同时减小 r_s 或 C 。使用金属-氧化物-金属(MOM)器件达到了这个目的,金属-氧化物-金属器件中用金属代替了半导体(减小 r_s)并且采用了能够减小电容 C 的很细触须。通过电子隧穿过两金属间的氧化膜而达到检波目的。

目前实验所用的二极管有一精细的钨触须(经放在氢氧化钾溶液中电解至所需尺寸),用一差动螺杆使这个钨触须轻轻接触金属柱(图2)。典型的触须长度为1~2毫米,直径为2~8微米,尖端半径为50毫微米。金属柱可用镍或铅笔芯(石墨)制成,因为这两种材料实

验效果最好（在Q-带频率上实验了大约20种金属和合金，都能起到检波作用）。

可将金属-氧化物-金属（MOM）二极管的作用看作两级过程：1）触须在辐射场中起行波天线的作用；2）电流经天线流向起检波作用的结。实验证明第一个作用是确实存在的⁽²¹⁾，检测得的信号表明天线⁽²²⁾对于辐射坡印廷矢量(Poynting Vector)和触须间夹角的依赖关系。特别是实现最佳耦合要有一个角度，图2所示结构是为产生891千兆赫和2.5京赫辐射的条

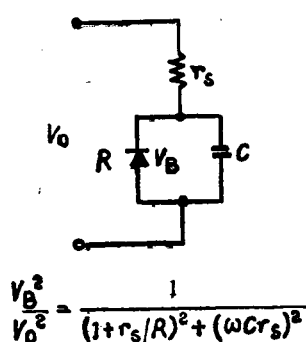


图1. 二极管的等效电路

件。二极管的结构尽量做得开放些，以使激光和微波源的辐射能在宽阔的角度范围聚焦在二极管上（图2）。

格林（Green）等人考虑到检波级⁽²³⁾，他们指出根据电子隧穿金属-绝缘体-金属结的理论模型，可定性解释某些实验数据。

为了获得最佳拍频信号，对于二极管的调谐严格地取决于机械调节和辐射功率的大小。当辐射出现时，在极高频上形成结可能是重要的。目前的良好接触只能延续一天左右时间，虽然制造技术的改进终究会解决这个难题。

2.4 激光束的聚焦

图3所示是两台激光器的输出激光会聚在点接触二极管上的光路图。用于氦氖发射的是一块焦距为90毫米的TPX（聚4甲基戊烯）透镜⁽²⁴⁾。采用8米共焦谐振腔并使输出激光窗和透镜间距离大约一米，那末所得聚焦点尺寸约为 2×10.89 京赫。在2.5（和10.7）京赫水蒸汽谱线情况时，采用一离轴抛物面反射镜聚焦以减少吸收损耗。从已知的激光腔内光束参量可计算出光斑尺寸为 5×10.7 京赫和 3×12.5 京赫。

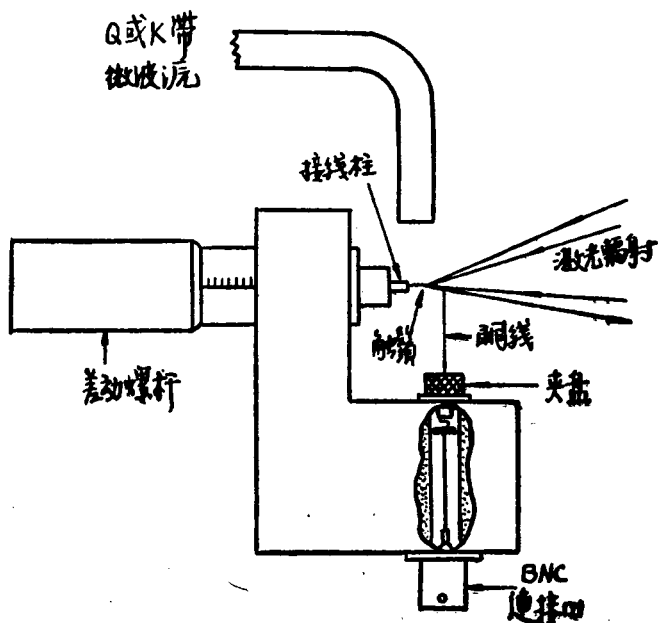


图2. 自由空间二极管座

3. 频率测量

进行这些实验时对点接触二极管的基本要求不仅能对甚高频响应而且能产生进行表2

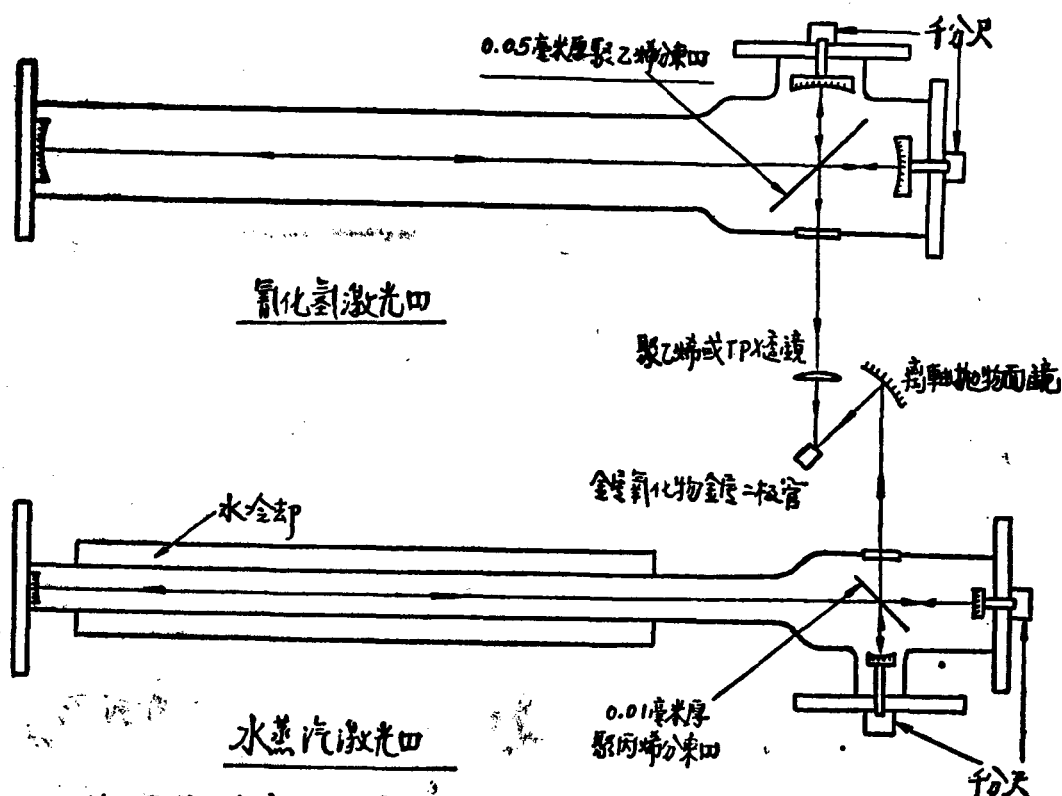


图3. 激光输出聚焦在直接接触二极管上的氰化氢和水蒸汽激光。

混频实验的高次谐波。已经发现这完全取决于相当任意的因素，如接触的压力和面积。唯一的工作标准是试验和纠正误差过程以及调节接触和辐射波在接触上的相对功率至最佳程度以获得特定拍频。二极管的直流电流-直流电压特性通常是非线性的，但不容易从其有关的产生高频谐波特性得出结论。

用与Hocker等人所用的相似方法测量了氰化氢激光频率⁽³⁾。用商品硅-钨点接触二极管

表2 谐 波 混 频

激光器1	激光器2	微 波	毫 频(赫兹)
氰化氢891千兆赫	—	74千兆赫	$891 - 12 \times (\sim 74) \approx 30$ 兆
氰化氢 ⁸⁹¹ ₈₀₅ 千兆赫	—	29千兆赫	$891 - 805 + 3 \times (\sim 29) \approx 30$ 兆
氰化氢 ⁸⁹¹ ₉₆₄ 千兆赫	—	36千兆赫	$964 - 891 + 2 \times (\sim 36) \approx$ 兆
氰化氢891千兆赫	水蒸汽2528千兆赫	36千兆赫	$3 \times 890 - 2528 + 4 \times (-36) \approx 30$ 兆
氰化氢891千兆赫	水蒸汽10718千兆赫	29千兆赫	$12 \times 891 - 10718 + (\sim 29) \approx 30$ 兆

测定了74千兆赫速调管的输出。用聚乙烯和TPX（聚4甲基戊烯）透镜将激光束聚焦，使聚焦光束通过二极管座的圆锥形小孔投射到接触点上。典型的钨触须直径为25微米，尖端直径为几个毫微米。对于频率在891千兆赫的几毫瓦输入功率，所获得检波信号为10毫伏。调节74千兆赫速调管可在30兆赫范围内在速调管的12次谐波和891千兆赫之间拍频，并在光谱分析仪上放大和显示。从一石英晶体振荡器将速调管锁相至一参考信号放大器。在最后一级采用了特殊谐波混频技术以得到超过硅变容二极管梳形发生器的30千兆赫范围的频率（图4），这就避免了用通常所用的双锁相系统的复杂性，在这个双锁相系统中是将74千兆赫速调管锁至较低频锁相速调管的谐波上。从15兆赫参考石英晶体产生的相位噪声使拍频在半高位置展宽到大约20千赫（图5）。表3所示激光中心频率在891千兆赫的频率值。

表3 激 光 频 率

激 光 器	频 率 (兆 赫)	均 方 根 (误差兆赫)
氰 化 氢	890760.2	± 0.2
水 蒸 汽	2527952.5*	± 1.5

*激光器位于拉姆凹情况(Lambdip)

另外，用间隔任意调节的金属-氧化物-金属点接触二极管进行了测量实验，从氰化氢激光观测到891、805和964千兆赫谱线间的混频。将激光器调谐到合适程度就可使这三条谱线同时振荡，因而只有用聚乙烯或TPX透镜将激光器的输出激光束会聚到点接触部位。表2所列的差频是从29和36千兆赫速调管所得的谐波。通过垂直置于二极管上方的开端波导(Open-ended Waveguide)将微波辐射投射到二极管上（图2）。图6表明891和964千兆赫谱线的拍频的基波和二次谐波。用一个低噪声0~1000兆赫放大器和一台1~110兆赫波谱分析器观测拍频信号。典型的信噪比为40分贝。拍频信号宽度小于20千赫，因为激光器谐振腔的稳定性产生的任何展宽都会抵消第一级。在891和805千兆赫谱线间进行拍频可得到相似结果。

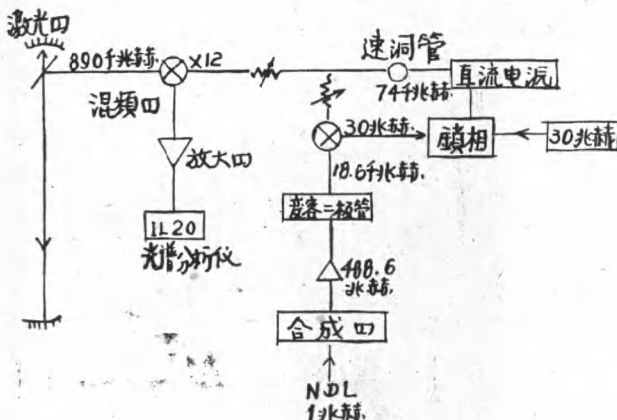


图4. 测量氰化氢激光891千兆赫频率的微波系统

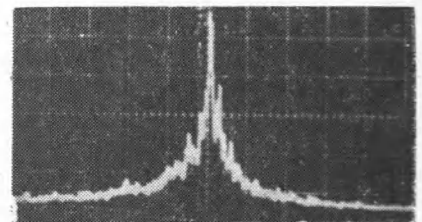


图5 891千兆赫与74千兆赫的12次谐波之间的拍频信号

由于氰化氢激光是从红外区域频率测量而来的一个很重要的转换标准，所以发展了将891千兆赫输出锁频至一吸收参考频率的技术。

用比较简单的方法实现了这一点，方法是在稳定性约为 2×10^{-8} 均方根的890579.60 $\pm$

0.08兆赫频率上,在二氟乙烯($\text{CH}_2=\text{CF}_2$)中将频率锁定至近似相符的吸收谱线上几分钟。布瑞特里等人(Bradloy)进行了更详细论述⁽²⁶⁾。理论和实验表明了这条吸收谱线不受强度大于 10^{-10} 量级的杂散电场或磁场的影响。这个方法是用400赫信号加在装有一面谐振腔反射镜的压电晶体上进行激光频率调制。将调制输出频率通过一个盛有气体的盒然后用相敏探测器接收。然后用电机驱动电位计和放大器将一直流校正信号反馈到激光器。

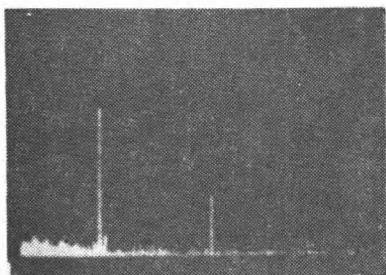


图6 891和964千兆赫辐射间的拍频信号

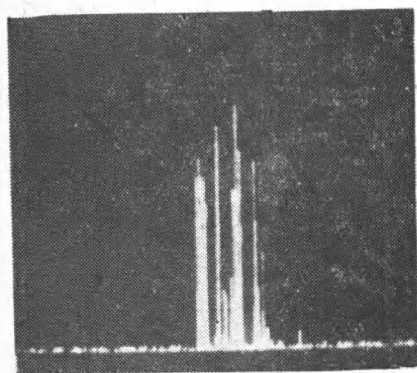
用低噪声前置放大器和1—110兆赫频谱分析器进行检测的。频谱分析器中带宽为10千赫时的平均信噪比约为20分贝(图7)。在微波产生的大约20千赫半高上的信号全宽度为75~100千赫。拍频信号的稳定仅仅偶然优于 ± 1 或2分贝,而经常出现 ± 5 分贝波动,波动时间为几秒钟。这些波动不能与激光输出中任何调制变化按比例相关连,因为这些输出要稳定的多。拍频的热漂移为 ~ 60 千赫/分钟。水蒸汽激光器是单模运转,并可置于拉姆凹陷状态。所测量的频率可读到六位数,如表3所示。采用一速调管谐波在硅点接触二极管中直接混频所得数值与弗兰克尔(Frenkel)等人所得数值完全相符(2527952.8 ± 0.1 兆赫均方根)。表3中数字不精确的原因是氰化氢激光位于891千兆赫谱线中心,因为这个频率不能在2.5京赫测量时间上进行直接监视。

3.2 10.7京赫水蒸汽激光谱线

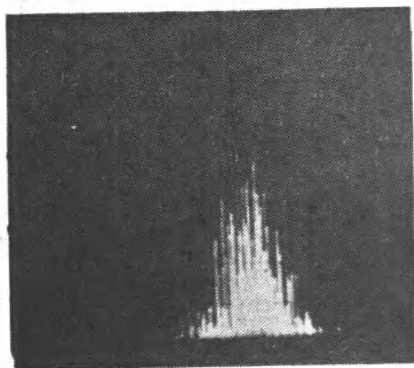
用891千兆赫氰化氢激光谱线的12次谐波与速调管的29千兆赫辐射进行混频的方法测量

3.1 2.5京赫水蒸汽激光谱线

将891千兆赫氰化氢激光谱线的三次谐波与36千兆赫锁相速调管的四次谐波在金属-氧化物-金属(MOM)二极管中进行混频,用这种方法测量了2.5京赫水蒸汽激光谱线的频率(表2)。对于2.5京赫10毫瓦的功率,所获得的检波信号约为10毫伏。为达到观察拍频的目的,要仔细调谐二极管的接触部位和三个辐射波的相对功率,这个拍频信号是



(a) 非锁定36千兆赫速调管
(0.1兆赫/刻度)



(b) 锁相36千兆赫速调管
(0.05兆赫/刻度)

图7 3×891 千兆赫和2.53京赫辐射的拍频信号

激光的测量技术—波长和频率的测量

译自——激光手册（日）

波 长 测 量

测量波长用的有迈克尔逊干涉仪和法布里珀罗干涉仪。方法是对一定的长度(10~20nm)使用 ^{86}Kr 长度标准光($\lambda_{\text{va}} = 605.780210\text{nm}$)进行测量后再用作为测量对象的激光进行测量,作波长的比较。

a. 633nm氦-氖激光器的波长测量: 到现在为止633nm He—Ne的真空波长的主要的测量结果的概括如表5.4.1所示。进行测量的有美国、英国、德国的标准研究所。同一激光器的短期巡回测量误差在 $\pm 5 \times 10^{-8}$ 以内这点是一致的(因为使用的 ^{86}Kr 光源和干涉仪不同从重复性上予期有这一数值),使用同一品种的另一个激光器误差是 $\pm 4 \times 10^{-8}$,品种不同的时候可以说误差是 $\pm 1 \times 10^{-7}$ 的程度,这种情况下真空波长的可靠值为:

$$\lambda_{\text{vac}} = 632.9914\text{nm}$$

(5.4.1)

这一精度可采用作为长度的付标准光源与 ^{198}Hg 和 ^{114}Cd 的精度为 5×10^{-8} 和 8×10^{-8} 大致上是相匹敌的,精度上有着足够的实用价值。

加拿大测量了用 I_2 的饱和吸收而稳频的He—Ne激光器的波长⁽⁵⁾。测量值已加在表5.4.1后边,和一般利用拉姆凹陷的稳频激光器程度相同。

了10.7京赫水蒸汽激光谱线。将速调管进行调谐产生在50兆赫范围内的拍频。获得这个拍频信号要比获得2.5京赫频率谱线困难得多,并且用上节所述的相似的放大器和探测器所得的信噪比为10~15分贝。实验装置与图3所示相似。进一步情况见参考文献28。

4、结 论

已经测量了891千兆赫氰化氢激光谱线和2.5京赫与10.7京赫水蒸汽激光谱线的频率。实验证明金属-氧化物-金属点接触二极管可作为自由间隔结构的宽带混频器。目前正在对扩展到88京赫范围频率的可靠测量技术进行实验研究。

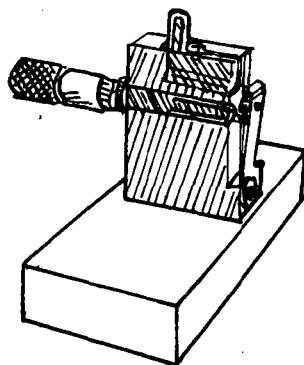


图5.4.1. 钨-钨针插接=级管

根据Engelhd搞的测量Spectraphysics的119型激光的波长在使用开始后800小时后是在 2×10^{-8} 以内基本无变化, 1500小时使用后与初期的值相比发现变小了 6×10^{-8} (3)。在20Ne的压力下能保持0.35Torr, 通过了He1~4Torr的变化时:

$$\lambda_{vac} = (632.991499 - 30.64 \times 10^{-6} p) \text{ nm} \quad (5.4.2)$$

在保持³He2.45Torr, 通过²⁰Ne0.2~1.2Torr的变化时:

$$\lambda_{vac} = (632.991499 - 19.4 \times 10^{-6} p) \text{ nm} \quad (5.4.3)$$

是这样明确表现出来的。这里P是用Torr表示的压力值。

再有, 如把上面讲到的真空波长换算成在标准空气 (20℃, 760Torr, 10Torr水蒸气分压, 碳酸气含量0.03%) 中的波长, 可用这一波长的折射率:

$$n_s = 1.000271284 \quad (5.4.4)$$

去除它, 如在 (5.4.1) 的场合下、

$$\text{则 } \lambda_s = 632.8197 \text{ nm} \quad (5.45)$$

在使用时的空气状态与此不同时应进行必要的修正。即:

$$\begin{aligned} \left(\frac{n_s}{n} - 1 \right) \times 10^{-6} = & \{ 0.931 + 0.06(0^{12} - 3) - 0.003(t - 20) \} (t - 20) \\ & - \{ 0.359 + 0.002(\sigma^2 - 3) - 0.001(t - 20) \} (p - 760) \\ & + 0.050(f - 10) - 0.015(R - 3) \end{aligned}$$

这里 n_s 是 (5.4.4) 的值, σ 是 $1\mu\text{m}$ 中的波数 (在这个场合 $\sigma = 1.58$), t 是 $^\circ\text{C}$ 所表示的空气温度, P 和 f 是用Torr表示的气压和水蒸气分压, R 是0.01%单位的碳酸气含量。由于在这空气中的波长受每 1°C 的温度变化, 3Torr的气压变化的影响, 产生 1×10^{-6} 的 n 的变化, 所以引起 λ 的变化。在进行长度的精密测量的场合, 为了保证一定的精度必须测定光路中的空气状态, 进行修正。

b. 其它激光器波长的测量: 用 CH_4 的饱和吸收的 $3.39\mu\text{m}$ He-Ne激光器由Barger和Hall进行了预备测量的结果, $\lambda_{vac} = 3.39223103\mu\text{m}$, 精度是 1×10^{-8} (7)。同一种的装置在1970年夏拿到国际度量衡局, 与 ^{86}Kr 灯进行比较, 结果为 $\lambda_{vac} = 3.39231392$, 精度是 3×10^{-9} 。这一激光的重复性用差拍测量应能达到 10^{-11} 更好的精度, 认为这种参差不足来自激光波长, 即是比较测量的参差。(参照5.4.2)

加拿大进行了 CO_2 激光在标准空气中的波长测量 (8)。测量使用的是经过长度校正后的水晶制和钢铁制的标准尺, 测量精度达到了 1×10^{-6} , 例如在使用水晶制标准尺的场合, $P(20)$ 线是 10.58824 误差 $\pm 0.00001\mu\text{m}$, $R(18)$ 线是 10.25767 误差 $\pm 0.00001\mu\text{m}$, $R(22)$ 是 $9.25808 \pm 0.00001\mu\text{m}$ 。

美国麻省理工学院对从红外到远红外的 H_2O , D_2O 激光器的4条线进行了波长测量 (9)。用光路长4m的迈克尔逊干涉仪, 以 633nm He-Ne激光器的真空波长作为 632.9915nm 进行比较测量, 获得了作为真空波长为:

$$\text{H}_2\text{O} \quad 118.59085 \pm 0.0002\mu\text{m}$$

$$\text{D}_2\text{O} \quad 84.27907 \pm 0.0004\mu\text{m}$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 47.46316 \pm 0.0001\mu\text{m}$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad 27.97080 \pm 0.00004 \mu\text{m}$$

的成果。

频 率 测 量

开始研究激光以来,对于观测一台多模振荡激光器的模与模之间的差拍,或是具有相同振荡线的2台激光器的光混合差拍进行观测,这些都是测量激光的相对频率差,激光的频率值是由光的速度值和波长的测量值间接求出的。但自1967年由Hocker, Javan, 搞了远红外激光和微波的高次谐波混频对激光频率进行了测量以来⁽¹⁰⁾,逐步在短波长区域的激光频率成为可能测量,到1972年开始对 $3.39 \mu\text{m}$ He-Ne激光器进行了测量⁽¹¹⁾。

a. 用2波混合的长波长区域的测量: 在最初进行的混频的方法是激光(频率数 L)和微波(频率数 ν_m)的 m 次的高次谐波的2波混合通过下式:

$$\nu - M\nu_m = \nu_{\text{beat}} \quad (5.4.7)$$

产生了差拍频率的下降。差拍频率数 ν_{beat} 通常是 $20 \sim 100 \text{ MHz}$ 。由Hocker, Javan等MIT(麻省理工), NASA(宇航局)集团作了最早的报告⁽¹⁰⁾, HCN激光的 $337 \mu\text{m}$, 311线约 75 GHz 的V波段速调管的12次, 13次高次谐波分别混合成为差拍,得到了 890.7595 GHz , 964.3123 GHz 的数据与 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 的精度。接着在同一MIT测量了HCN从 $373 \mu\text{m}$ 过渡到 $310 \mu\text{m}$ 的5条线⁽¹³⁾。由Frenkel等的NASA, BTL集团在水晶振荡器上使用锁住的速调管,用伺服机构控制在 H_2O 激光的 $118.6 \mu\text{m}$ 的拉姆凹陷处,测量出频率为 2527.9528 GHz 精度是 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ ⁽¹⁴⁾。

这些测量使用的是硅和金属针(Catwhisker)的点接触元件作为混频器。另外Evenson等是用约瑟夫逊联结作为远红外区域的混频器⁽¹⁵⁾。在冷却至 2 K 的铌与铌点接触的结合,使用铌频率基准的频率(约 9 GHz)用X波段速调管的约100次非常高的高次谐波和 $337 \mu\text{m}$ HCN激光进行了混频。

b. 使用3波混合的向短波长区域的移动: 激光频率更高时用(5.4.7)的方法就困难了因此要求激光频率 L_1 时要使用二台激光和微波的3波混频。

$$\nu_1 - n\nu_2 \pm m\nu_m = \nu_{\text{beat}} \quad (5.4.8)$$

ν_2 是已经测量过的激光的频率。MIT是用(5.4.8)的方法,用 $337 \mu\text{m}$ 的HCN作为 ν_2 ,测量 $n=2, m=3$ 下 $190 \mu\text{m}$ 的 $\text{D}_2\text{O} + \text{C}_2\text{H}_2$,和 $n=3, m=2$ 的 $118 \mu\text{m}$ H_2O ,分别获得 1578.2787 GHz ,与 2527.9540 GHz ⁽¹⁶⁾。这一方法比(5.4.7)的方法的是显著地改进了S/N。MIT用(5.4.8)的方法求得了DCN从 $204 \sim 190 \mu\text{m}$ 的5条线⁽¹⁷⁾。进一步延伸到 $84 \mu\text{m}$ D_2O ,用 $337 \mu\text{m}$ 的4次获得了 3557.143 GHz ⁽¹⁸⁾。这样MIT集团用 $337 \mu\text{m}$ HCN作了实验,

$$\begin{aligned} \nu_{190} - 2\nu_{337} + 3(68 \text{ GHz}) &= \nu_{\text{beat}} \\ \nu_{118} - 3\nu_{337} + 2(72 \text{ GHz}) &= \nu_{\text{beat}} \\ \nu_{84} - 4\nu_{337} + (5.9 \text{ GHz}) &= \nu_{\text{beat}} \end{aligned}$$

向高频方面扩大了测量范围。

以上测量使用的是硅-金属针混频器,这种混频器测量的最高频率是 $84 \mu\text{m}$ D_2O 的频率数。

C. 金属—金属针混频器扩大使用于红外区域：测量更短波长的激光器的频率是在室温下使用金属和金属针的点接二极管。金属针一般是直径 $2\mu\text{m}$ ，长数mm程度的钨针，用电解研磨成尖锐的端与镍等的金属面进行点联接（图5.4.1）⁽¹⁹⁾。考虑到实际上是在金属与金属之间夹有一层薄的氢化物的二极管，检测机理尚不明确。明确了在 $10\mu\text{m}$ 时可以达到 $10^{-12} \sim 10^{-14} \text{W}/\text{H}_2$ 的灵敏度⁽²⁰⁾。这个元件可以进行测量 CO_2 的P枝的5条射线之间的差频⁽²¹⁾。

利用这个元件使频率数的绝对测量范围扩大了一段，NBC的Evenson等测量了 H_2O 的 $78\mu\text{m}$ 和 $28\mu\text{m}$ 的频率数⁽²²⁾。在这时使用了三个激光和微波的4波混合的方法。

$$\nu_1 - n_2\nu_2 + n_3\nu_3 \pm M\nu_m = \nu_{\text{beat}} \quad (5.4.9)$$

也就是用HCN的 $373\mu\text{m}$ 和 $373\mu\text{m}$ ， $78\mu\text{m}$ H_2O 相混合，

$$\nu_{78} - 6\nu_{337} + 2\nu_{373} - 3(29\text{GH}_2) = \nu_{\text{beat}}$$

获得了 $\nu_{78} = 3.821775\text{TH}_2$ 。

$$\text{然后 } 28 - 12\nu_{337} - (29\text{GH}_2) = \nu_{\text{beat}}$$

获得 $\nu_{28} = 10.718073\text{TH}_2$ 这时测量的 ν_{373} 是

$$\nu_{337} - \nu_{373} - 3(29\text{GH}_2) = \nu_{\text{beat}}$$

L337是与 74GH_2 速调管的第12次高次谐波的混频。HBS则进一步用这个 H_2O 的 $78\mu\text{m}$ ， $28\mu\text{m}$ ，对2条的 $10.6\mu\text{mCO}_2$ 进行了测量⁽²³⁾。混频是由：

$$\nu_{10.6} - 3\nu_{28} + \nu_{78} \pm \nu_m = \nu_{\text{beat}}$$

P (18) 是 25.359800TH_2 ，P (20)成为 28.306251TH_2 。 $10.6\mu\text{mCO}_2$ 直接与 $337\mu\text{m}$ HCN相混频有MIT的实验也在进行中⁽²⁴⁾。 $\nu_{10.6} - 32\nu_{337} + M\nu_m = \nu_{\text{beat}}$

MIT，是用响应时间 $7 \leq 3 \times 10^{-14}$ 的元件以 $28\mu\text{mH}_2\text{O}$ 和 CO_2 R (10) $93\mu\text{m}$ 相混合⁽²⁵⁾ $\nu_{9.3} - 3\nu_{28} \pm \nu_m = \nu_{\text{beat}}$ 以及用 $\tau \leq 1.7 \times 10^{-14}$ 的元件，对CO为P (13) $5.2\mu\text{m}$ 和 CO_2 为R (8)，R (10)的 $10.6\mu\text{m}$ 进行了混频⁽¹⁹⁾ $\nu_{5.2} - 2\nu_{10.6} - \nu_m = \nu_{\text{beat}}$ 在NBS用 ν_{28} ⁽²²⁾进行了测量了 $\nu_{9.3}$ 值为 32.134272TH_2 ，同一NBS用 $\nu_{10.6}$ ⁽²³⁾测量了 $\nu_{5.2}$ 值是 58.024342TH_2 。

到现在为止所看到的，激光的频率测量从微波经过 $337\mu\text{mHCN}$ 激光，到短波长的激光和频率数合成的连锁 (frequency Synthesis) 是按这样的次序发展的。频率测量的精度不断提高，正在作 $337\mu\text{mHCN}$ 激光的水晶振荡器频率锁模的试验⁽²⁶⁾。

以上是1970年前的测量频率的状况，在1972年初由NBC的Evenson等进行了 $3.39\mu\text{mHe-Ne}$ 激光的频率数为 88TH_2 的测量⁽¹¹⁾，接着进行了精度非常高的再测量⁽²⁷⁾。所谓再测量是利用 CO_2 和 CH_4 的饱和吸收， $9.33\mu\text{mCO}_2$ ， $10.18\mu\text{mCO}_2$ ， $339\mu\text{mHe-Ne}$ 激光高精度的稳频（参照5.3.2.4）。从铯的频率标准到频率数合成的连锁动作，同时求得所有的差拍频率，以高精度地求出了 CO_2 激光的频率。进一步由它和 He-Ne 激光混频测量了 $3.39\mu\text{m}$ 的频率。结果 CO_2 R (30) 为 $\nu_{10.18} = 29.442483315(25)\text{TH}_2$ ， CO_2 R (10) 为 $\nu_{9.33} = 32.134266891(24)\text{TH}_2$ ， $(\text{H}_4\text{P}(7))$ 为 $\nu_{3.39} = 88.376181627(50)\text{TH}_2$ 。在 CH_4 下对稳频的 He-Ne 激光波长的进一步测量是用 ^8Kr 长度标准光达到了 3×10^8 的精度， $\lambda_{3.39\text{Vac}} = 3.392231376(12)\mu\text{m}$ 。从这个测量结果来看光速的精度，要比现在的提高100倍，即求出：

$$C = 299792456.2 \pm 1.1 \text{m/S}$$

译自激光手册 (日)

关于利用粗条衍射光栅测量红外激光光束参量的可能性

译自——Квантовая Электроника 1976, Т.3, No. 5

В.И.古普列纽克

В.В.斯契班诺夫

Л.Д.斯米尔诺娃

В.Е.舍尔斯托必托夫

为了测量激光红外辐射参量,通常方便的办法是将一定的几小部分能量与许多测量光路耦合。在每一条光路中可以按装相应的测量仪器,该测量仪器是用很小的辐射密度计算的。通常借助于分光片及楔形镜靠付里叶反射使能量耦合。但是,在一定的辐射通量密度条件下,红外区所采用的分光片由于出现热变形,实际上开始使辐射波前失真;而当进一步增长时,密度则遭破坏。

红外激光束划分方法较为简单。这种方法利用粗条的金属丝光栅上辐射衍射现象。这种方法的优点是可以利用一个相当简单的元件形成大量的测量通路。该元件的尺寸极易于做得很大,而参量(光栅间隔及金属丝直径)可以在很大的范围内发生变化。例如在文献[1]中,对口径为 200×300 毫米的激光辐射能量及发散角进行过测量,大部分辐射(90%)实际上毫不失真地通过光栅,且可用于主要用途。由于优点明显,这种方法开始应用于测量脉冲 CO_2 激光光束参量[2];而且从文献[1]的资料中看出,这种方法成功地用于连续气体激光器。

当将类似的光栅用于大功率连续红外激光器时,尚有两个问题不明确。第一,这些光栅的耐热性问题;第二,由于因辐射而加热的光栅附近空气对流而产生的通过的一束光束及许多衍射光束的波形象差很大。本文所谈的就是对这些问题的实验及理论研究。

光栅的极限光束强度可用一般的细金属线的热平衡公式来计算。该细金属线在某一部分上由激光辐射均匀加热。在各种方案中,主要兴趣集中到红外光谱区吸收系数为 $\sigma \leq 0.03$ 的金属(金、青铜、金属钨等),以及集中到约为 10^3 K 的温度范围(接近于金子的熔点温度)。如各次研究所证实的那样,在这种情况下可以不考虑在激光辐射功率密度为 $I > 100$ 瓦特/厘米²时,超辐射对热平衡的影响,对直径很小的金属丝($d \leq 0.1$ 毫米)可以不考虑热传导对热平衡的影响。那么,为了计算光栅的热强度,可以利用下列公式:

$$I_{np} = \pi a \Delta T_{np} / \sigma$$

其中: a ——向周围介质传热的系数; I_{np} ——射到光栅上的辐射功率的极限密度; $\Delta T_{np} = T_{np} - T_0$ ——根据镀膜的机械强度及稳定性而确定的光栅的允许加热程度。

这样就根据向周围介质的散热效应来确定 I_{np} 的值。对自由对流情况来说, $a = 2 - 6$ 瓦特/(厘米²K),为了进行估算,当采用 $\Delta T_{np} = 10^3 \text{ K}$ 及 $\sigma = 0.02$ 时,就可得出 $I_{np} = 0.3 - 0.9$ 千瓦

特/厘米²。当过渡到用光栅散热的强制对流制时可以大大提高散热效应。在这种情况下为了计算 a 值使用关系式 $a = \lambda Nn/d$ (Nn —努谢利特准数; λ —空气导热系数) 及准数式 [3] $Nu = 0.49\sqrt{Re}$ 。其中: $Re = vd/V$ —雷诺准数; v —散热速度; V —空气的运动粘度。

在这种情况下, 当 $\Delta T = 10^3 K$, $\sigma = 0.02$, $d = 0.1$ 毫米时, 与散热速度的关系式 I_{np} 如下:

V , 米/秒	I_{np} 千瓦特/厘米 ²
1	2.0
4	4.1
6	5.1
10	6.2

但是, 入射到光栅的连续辐射功率极限强度的确定不仅根据光栅的机械强度, 而且根据在光栅附近由于气体的不均匀加热而出现的光束光程差值来确定。

为了解释由于光栅加热而引起的光学失真的特性及其大小, 在用电流加热光栅的情况下曾对金属丝光栅进行过模式相干研究。在这种情况下, 消耗在光栅加热上的单位长度电功率 W 符合激光辐射的功率密度, 为 $I = W/\sigma d$ 。图1为用马克逊干涉仪摄制的干涉图象。该干涉仪的一侧有一根直径为0.1毫米的单根金属丝及一单维光栅、单维光栅是用直径为0.1毫米、间隔为1毫米的金属丝制成。

从图1, a.中可以看出, 如果自由对流时, 每一对通路的光学失真在入射辐射强度为0.75千瓦/厘米²时, 可达2—4个条波长为0.63毫微米的波束。当接通距离金属丝2米的一般通风机时, 如果暗盒衬框非常大, 图象的失真则较小(图1, σ)。

图1, b.为在 $I = 0.6$ 千瓦/厘米²条件下, 自由对流时加热光栅的干涉图象。这时接近于损坏极限。从图中可以看出, 当沿光栅表面发热不均匀时, 加热的影响主要是空气密度梯度最大的加热区域范围内光束相位失真。这样, 甚至靠近热损坏极限时通过光栅的双通路上相位失真的最大值不超过红光中3—4条光带, 这就是说, 这种光栅甚至在不散热的情况下当辐射通量密度小于1千瓦/厘米²时, 也完全可以用来检验连续红外激光光束。

如同在单一金属丝的条件下, 利用气流来冷却光栅就会减小光束的失真及提高光栅损坏的极限强度。图1, 2的干涉图符合 $I = 2$ 千瓦特/厘米², 而且该干涉图是当用通风机(流向与光栅平面相符而且垂直于形成光栅的金属丝)使光栅散热的情况下获得的。光栅所引起的失真在这种情况下与值为 $2 \cdot 10^{-5}$ 弧的光学楔形镜的引入等值。这与沿气流的温度增加的线性规律有关。

选择光栅参量的方法及其用于记录红外激光辐射参量的方法等问题见文献[1], 图

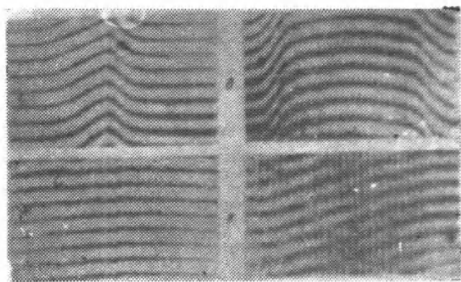


图1 用迈逊克逊干涉仪所获得的干涉图。具有单根丝的(a, b)及具有单维光栅的(b, r), 当辐射强度 $I = 0.75$ (a, b), 0.6 (b), 及 2.0 千瓦特/厘米² (2), 散热速度 $V = 0$ (a, b) 及4米/秒 (σ , 2) 时。

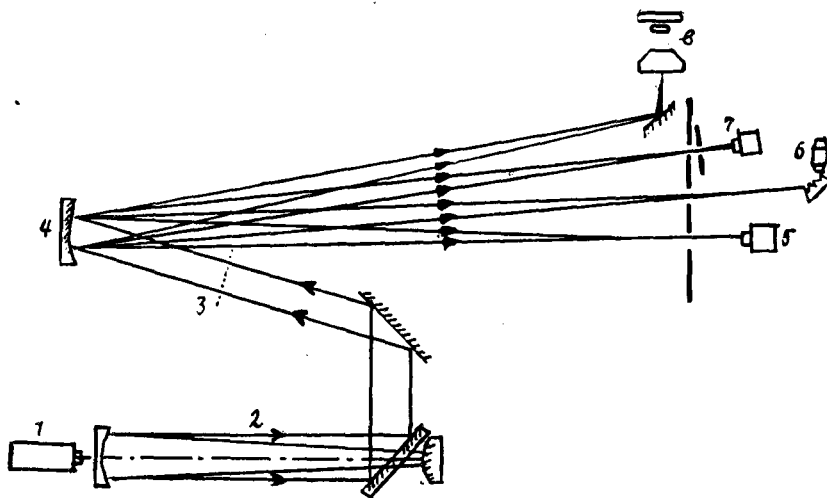


图2 实验系统

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. 校准氦-氖激光器, | 2. CO ₂ 激光器, |
| 3. 衍射光栅, | 4. 聚焦反射镜, |
| 5. PM-213型功率测量计, | 6. 具有分光片的φCF型光敏电阻, |
| 7. 具有虹采式光圈的PM-20型功率测量器, | 8. 具有摄影机的PB-1型无线电接收机。 |

2, 为我们所采用的连续CO₂激光器中不稳定谐振器最佳参量的光学系统。该系统用作制定起辐射分光器作用的、具有光栅的测量系统的一个例子。脉冲通过为90%的光栅是用直径为0.1毫米的黄铜线作成的。光栅的结构保证铜丝受热变长的补偿。反光镜4.的聚焦面($f=5$ 米)上各条之间的距离约为50毫米(光栅的周期为1毫米);辐射功率按条的分布比例为 $W_0: W_1: W_2: W_3: W_4 = 100: 1.25: 1.1: 0.9: 0.5$ 。该系统可以同时调正平均辐射功率的水平、其高频部分、方向性图表的形式,以及功率在各个角上的分布。相干研究证明:在辐射的一个通道上光栅所引起的波前失真当入射到光栅上的通量强度为 ~ 300 瓦特/厘米²时,在 $\lambda = 10.6$ 毫微米的波长上不超过 0.1λ 。在进行专门实验时,处于平静空气中的光栅由进行研究的激光器的定焦射束照射。这些实验表明,如果与辐射极化方向一致的光栅的铜线垂直定位时,当 $I \approx 1$ 千瓦特/厘米²时,光栅便发生损坏。如果把光栅转动到水平位置,损坏的极限就降低到 0.6 千瓦特/厘米²。显然,这是因为导热条件发生变化,以及极化效应所引起的。

上述结果证明了利用粗线条衍射光栅检验连续红外激光光束的前景。应该指出,类似的光束同时也可用作通路量热器[4]。