

光速测量现状

赵克功 倪育才

(中国计量科学研究院)

自从1958年弗鲁姆(Froome)利用微波干涉仪法得到当时公认的光速值 $c = 299,792.5 \pm 0.1 \text{ km/sec}^{[1]}$ 以来,所有的光速精密测量均是基于 $c = \lambda \cdot \nu$ 而得到的,即电磁波在真空中的传播速度等于电磁波的频率与其相应真空波长之乘积。当时的不确定度是 3×10^{-7} ,其主要原因是使用的波长较长($\lambda = 4 \text{ mm}$),因此波长测量的准确度较低,衍射效应带来的误差也较大。激光器的出现为这一方法提供了合适的光源,采用饱和吸收技术可以得到频率稳定性和复现性均十分优良的激光辐射,并且使用的波长可以比原先小三个量级(微米量级),接近位于可见光谱区的长度基准。这使波长测量的准确度大为提高。同时衍射效应与 $(\lambda/D)^2$ 有关,使用短波长减小了衍射修正,并且干涉仪装置亦紧凑。

1972年,美国标准局(NBS)的埃文森(Evenson)等人基于直接测量甲烷稳定 $3.39 \mu\text{m}$ 氦氖激光辐射的波长和频率得到 $c = 299,792,457.4 \pm 1.1 \text{ m/sec}^{[2]}$ 。详细情况已作过介绍^[3],本文仅涉及1973年以来与光速精密测量有关的一些问题,例如:高稳定激光器,激光波长的精密测量,以及频率测量的进展等等。

一、新推荐的真空光速值

利用同一辐射的波长和频率之积得到光速是精密测量光速的好方法。由于激光饱和吸收技术的发展,特别是甲烷稳定的 $3.39 \mu\text{m}$ 氦氖激光系统(He-Ne:CH₄)和碘稳定的 633 nm 氦氖激光系统(He-Ne:I₂)的进展,改进了真空光速值的测量准确度。已经证明,上述两种激光系统输出的波长比现行的米定义⁸⁶Kr辐射波长值更为精密。它们的波长值的不确定度主要来源于现行长度基准⁸⁶Kr的复现性,但目前稳定激光辐射的波长(频率)本身的复现性比⁸⁶Kr要高百倍以上,因此重新改变米定义的问题已提到计量学家的日程上来。

基于各国许多研究所的大量实验结果,并由于这些实验结果间的一致性,国际计量局米定义咨询委员会在1973年第五次会议上公布了建议使用的He-Ne:CH₄和He-Ne:I₂两种激光辐射的真空波长值^[4]。同时,还推荐了主要取自埃文森(Evenson)等人测量结

果的甲烷稳定激光的频率值 $\nu_{\text{CH}_4} = 88,376,181,627 \pm 50 \text{ kHz}$ 。这次会议上还公布了由甲烷($\nu_3, P(7), F_2^{(2)}$)稳定的氦氖激光辐射的真空波长与频率之积得到的新的光速值 $c = 299,792,458 \text{ m/sec}$,不确定度为 4×10^{-9} 。其不确定度主要来源于波长测量使用的现行长度基准⁸⁶Kr。

| 谱线 | 波长值 |
|---|--|
| CH ₄ , ν_3 带, P(7) 支, $F_2^{(2)}$ 谱线 | $3,392,231.40 \times 10^{-12} \text{ m}$ |
| ¹²⁷ I ₂ , 11-5 带, R(127) 线 i 分量 | $632,991.399 \times 10^{-12} \text{ m}$ |

上述推荐的新光速值立即得到了1973年8月召开的国际天文联合会的承认和推荐。

天文学家是利用光速值作为长度测量的参考,因此他们希望有一个不变的光速值作为参考。为此,米定义咨询委员会已经保证,不管长度和时间单位的定义将来是否改变,光速值将保持不变。但必须的条件是:将来任何新的高精度实验结果必须与目前所推荐的光速值不矛盾,就是说,它们必须在目前的米定义——⁸⁶Kr辐射真空波长的不确定度 $\pm 4 \times 10^{-9}$ 内一致。

1973年以后,国际上许多研究所都利用不同的稳定激光系统辐射的波长和频率之积得到光速值,其结果都与1973年米定义咨询委员会推荐的值在 $\pm 4 \times 10^{-9}$ 内一致。因此这一推荐的光速值在1975年第十五届国际计量大会上得到正式通过。

二、高稳定激光器

使用饱和吸收技术,已经得到了具有高度频率稳定性和复现性的稳定激光系统。这方面已有不少报道,故不赘述。

需要指出的是,目前对稳定激光系统的研究重点在于寻找更窄的参考谱线、研究参考谱线的加宽、谱线位移以及它们的控制方法,以得到更高的稳定性和复现性。例如,1976年博尔德(Bordé)和霍尔(Hall)对通常用于稳频的甲烷 ν_3 带 P(7) 支 $F_2^{(2)}$ 分量进行了研

究,发现该线具有磁超精细结构。1977年巴格耶夫(Bagaev)等人也有同样的报道。 $F_2^{(2)}$ 分量有三条磁超精细结构谱线,如果将有关参数控制在一定范围内,复现性可能达到 10^{-14} 量级。也有人预言,甲烷稳定激光器的复现性可超过 10^{-15} 量级。

除了已推荐使用的 He-Ne:CH₄, He-Ne:I₂ 两种稳定激光系统外,其它稳定激光系统,例如:碘分子束稳定的氙离子激光器,氙离子光泵连续染料激光器,稳频氩镉激光器,以及荧光吸收稳频的二氧化碳激光器等,都有可能得到高度的频率稳定性和复现性,因此都可在光速测量或光频标等领域中得到应用。

必须注意的是,在光速测量中所用的激光器(包括频率链中的中间振荡器)必须有良好的短期稳定性,而其长期稳定性或复现性在原则上是不重要的。我们期待可以同时进行频率和波长测量,以消除这一因素。但如能采用稳定性和复现性均很好的激光辐射当然是更为有利的,这样可以减少同时测量的困难。并且这些测量可以在不同的实验室采用不同的方法进行,便于发现测量的系统误差。

三、精密波长测量

1958年弗鲁姆(Froome)光速值的不确定度是 3×10^{-7} ;主要原因是波长测量的误差。1973年米定义谘询委员会推荐的光速值的不确定度为 4×10^{-9} ,其主要原因仍然是波长数值的不确定度。只要我们能进一步提高波长测量的准确度,就能得到更精密的光速值。

为得到光速值而进行的波长测量必须直接与长度基准 ^{86}Kr 辐射相比对。通常都采用迈克尔逊或法布里-珀罗两种干涉仪来进行。两种方法各有优缺点,法布里-珀罗干涉仪是多光束干涉,条纹对比度好,但由于镜子表面的缺陷及反射时相位变化的色散使测量容易带来系统误差。迈克尔逊干涉仪正相反,虽然由于双光束干涉使条纹对比度降低,但它对干涉仪镜的缺陷等很不敏感,同时也没有反射相移色散的影响。目前用这两种方法进行波长比对的精度都可以超过长度基准 ^{86}Kr 的复现性(3×10^{-9} — 4×10^{-9})。国际计量局的贾科莫(Giacomo)用迈克尔逊干涉仪测量了甲烷稳定 He-Ne 激光的波长,不确定度估计为 5×10^{-9} 。而 NBS 的巴杰(Barger)等人则用频率控制法布里-珀罗干涉仪测量了同一谱线的波长,不确定度为 3.5×10^{-9} 。两种方法的不确定度几乎全部是由长度基准 ^{86}Kr 的复现性所引入的。因此,可以说在目前的情况下,可见及近红外激光波长的测量准确度已达到了可能得到的极限值,除非我们改变目前的定义,以更精密的激光波长代替非相干光源—— ^{86}Kr 辐射波长作为长度基准。

在波长比对方面值得重视的是激光波长之间的精密比对。由于这种比对可得到 10^{-10} — 10^{-11} 的准确度,与近红外的频率测量准确度相近,因此进行这一比对的意义不仅在于精密测量波长本身,而且对于光速值、未来的米定义及其复现,可见光的频率测定等等,都具有很重要的意义。

近年来,提高激光波长测量的准确度也是重点的研究课题,NBS和NPL都研制了利用高稳定激光伺服控制的法布里-珀罗干涉仪,由于单模激光器的可调谐性,不需要对干涉仪作任何长度或光程差的扫描就可以对透过干涉仪的两种辐射的波长进行比较。这种技术外在原理上避免了由于扫描和内插系统带来的系统误差,例如,干涉仪长度扫描的非线性及不平行性,压力改变引起的折射率或温度变化的色散,以及接收放大器带宽的限制等等。

NBS的拉耶(Layer)等人1976年报道,用模匹配的球面谐振腔作高分辨率干涉仪,测量了甲烷稳定 $3.39 \mu\text{m}$ He-Ne 激光与稳定到 $^{129}\text{I}_2$ 的k峰上的 633nm He-Ne 激光间的波长比,准确度达 2×10^{-10} 。实验装置的方框图示于图1。单频高功率运转的 $3.39 \mu\text{m}$ 红本机振荡器通过偏频锁定与甲烷稳定激光相联系。本机振荡激光器的输出模匹配到谐振腔干涉仪上,后者锁定到红外透射峰的极大值上。 633nm 红光本机振荡器的输出也与谐振腔模相匹配,但其频率(即激光器谐振腔的长度)由谐振腔干涉仪控制,并同样被锁定到透射极大处。要测量的数据是红光本机振荡器与碘稳定激光之间的拍频。长度不同的两个谐振腔是用来消除反射相移的色散带来的影响。如果知道腔长对两种波长的级次,则经过简单的计算就能得到两种激光的波长比。实验中谐振腔的干涉级次是用贝(Bay)和卢瑟(Luther)的微波调制方法得到的。

最近NPL的罗利(Rowley)等人研制了一台伺服控制的一米平面平行法布里-珀罗干涉仪^[5],其原理与NBS的装置基本相同,但系用平面平行法布里-珀罗腔代替模匹配球面谐振腔,并且采用漫射屏破坏激光的空间相干性,以避免干涉仪中的杂散光产生的乱真干涉而带来的影响,同时也避免了干涉仪回来的反射光反馈进入激光器。干涉仪的光学系统示于图2。在比较两种波长相近的辐射时,测量准确度可达 2.9×10^{-11} 。

NPL还利用上转换技术将 $9.3 \mu\text{m}$ 的CO₂辐射和 633nm He-Ne 激光辐射在非线性晶体淡红银矿中相混而得到 679nm 的上转换辐射。再利用上述干涉仪将上转换辐射和碘稳定激光进行波长比对,根据测得的 679nm 的波长值就能得到 $9.3 \mu\text{m}$ 激光辐射的波长,波长值的不确定度为 6×10^{-10} ^[5]。

激光波长比的测量由于避免使用 ^{86}Kr 这一非相干光源,以及有效地使用了伺服锁定技术,从而避免了

通常的干涉仪扫描及条纹内插法带来的非线性问题，因此得到了很高的准确度。

9.3 μm CO₂ 辐射频率早已测量过，结合所测得的波长就得到了光速值 $c = 299,792,458.8 \pm 0.2 \text{ m/sec}$ 。

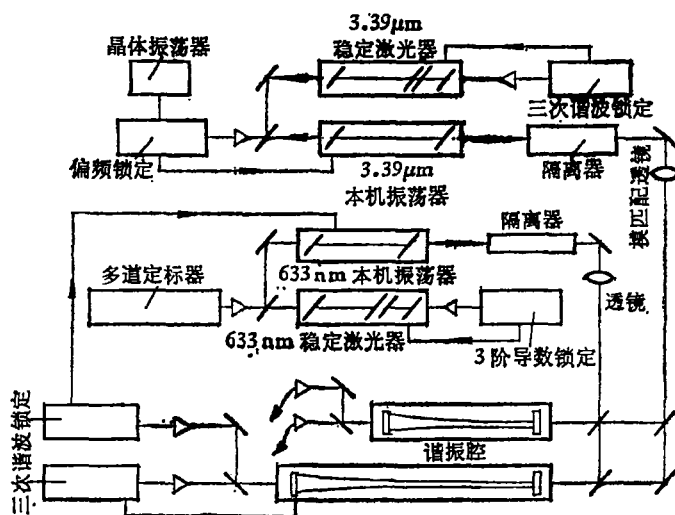


图1 NBS激光波长比测量装置方框图

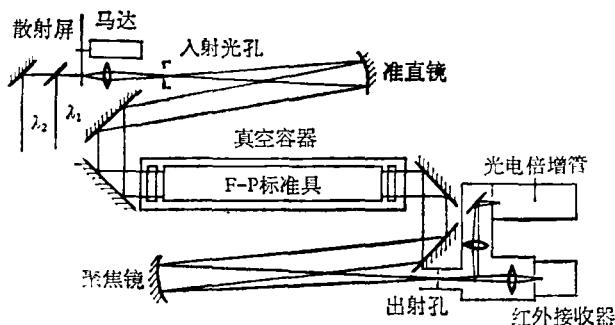


图2 NPL用于测量激光波长比的干涉仪光学系统

在已报道的光速测量数据中，它具有最小的测量不确定度。该光速值是相对于碘稳定激光波长的，因此该数值本身并不具有重要的意义。重要的在于其不确定度，因为该不确定度表明了一旦以激光波长作长度基准以后所能得到的光速值的精确程度。反之，如果将来以光速值来定义新的长度基准，则这一测量就表明了我们所能得到的激光波长的精确程度。

这种波长比的测量在目前的米定义尚未变更之时，仍是一种相对测量。但⁸⁶Kr这一米定义已不会维持太久，在近几年内将会被新的米定义代替。一旦⁸⁶Kr被取代，无论用激光波长来定义米，或是用光速来定义米，那时这种精密的激光波长比对技术将成为复现米定义的手段。另外，下面将要谈及，在光频测量还没有扩展到可见区时，用这种方法能以最高准确度确定可见激光频率。

四、激光频率测量的新进展

精密测量光速的另一个重要环节是激光频率的精确测量。激光频率测量的关键是光频接收器件以及建立一条从微波到光波波段的频率综合链。

1. 光频接收器件

有关光频接收器件的问题已在杂志上作过介绍^[3]。目前国际上研制的光频接收器件主要是金属-氧化物-金属点接触二极管（简称MOM或MIM），约瑟夫逊结，以及肖脱基二极管等。

MOM光频二极管是目前最常用的一种光频接收器件，它同时可作为天线，谐波发生器，混频器，以及高达150 GHz的检波器使用。

目前NBS用的是钨镍二极管，钨丝纯度为99%，直径25 μm，端部用NaOH电解液进行电解腐蚀抛光，最终使端部直径为250—500 Å。基板为纯度99.5%的镍片，表面抛光并经自然氧化，氧化层深度约为10 Å。当用于接收光频时应精密调整钨丝尖端与镍片氧化层的接触，使接触电阻约为200—400欧姆。

这种接收器件的性能较差，是一种不稳定和不灵敏的接收器件，因此所用的激光器必须能提供相当高的功率，通常约需50mw，并且其寿命也不长。

1977年NBS利用上述二极管已能测量1.5 μm的激光频率。目前光频二极管的主要研究内容是提高性能，延长寿命和向可见

光频段延伸频率响应性能。

西德技术物理研究院(PTB)除进行钨镍二极管的研究外，还利用铱作为基板。据报道这样的二极管性能比镍作基板要好。

约瑟夫逊二极管是MOM二极管的有力竞争者，它可以得到更高的谐波。但目前只能在几THz频率下工作。

2. 光频测量所用的频率链

由于接收器响应时间所限，光频的直接测量一直是一个相当困难的问题。1972年埃文森等人的实验是一个突破，他们采用钨镍点接触二极管直接测量了3.39 μm的激光频率，不确定度为 6×10^{-10} 。由于它与铯基准频率(9.192 GHz)相差4个量级。因此使用了几个中间振荡器作为过渡，而组成一微波-光波波段的

激光频率链^[6]。自那时以来,激光频率测量的重点基本上在两个方面,一是提高现有的测量准确度,二是将激光频率测量扩展到可见区。

(1) 埃文森等人的频率链

埃文森使用了由 HCN, H₂O, CO₂ 等激光作为中间振荡器的频率链,测量 3.39 μm 甲烷频率的不确定度为 6×10^{-10} 。NPL 的 Blaney 等人用类似的频率链测量了 CH₄ 的频率^[7],不确定度为 5×10^{-10} 。苏联的物理技术和无线电工程测量科学研究院也报道了用类似的频率链测量了 3.39 μm 的甲烷频率,但没有测量结果及其分析的详细报道。三者的区别在于 NPL 在实验的第一阶段采用约瑟夫逊结产生第 50 次谐波而直接用 18GHz 的速调管测量 HCN 激光的频率。而苏联的频率链则是用 84 μm 的 D₂O 激光代替原先的 28 μm H₂O 激光。

(2) 仅仅用 CO₂ 激光的频率链

上述 CO₂ 激光频率测量要求有几个中间振荡组成很复杂的链,才能将很高的 CO₂ 频率与 9GHz 的铯基准相联系。并且由于接收器的效率很低,HCN, H₂O 等激光器均长达 8 米,实际使用时很不方便。最近加拿大 NRC 的惠特福德 (Whitford) 等人建议 CO₂ 频率可以用它与两个不同的 CO₂ 激光跃迁间的差频,它的谐波,以及已知频率的微波源之间的混合来进行绝对测量。他们提出用一对合适的 CO₂ 激光相拍,所产生的差频作为中间频率,第一个最低的差频直接与微波频率的谐波相比较而确定;下一个较高的差频是与第一个差频的谐波相比较而测量的,以此类推,直到 CO₂ 频率本身能与最后的也是最大的差频之谐波相比较为止。

由于 CO₂ 激光在 9—11 μm 范围内有上百条谱线,因此可供选择的方案很多,最近贝尔德 (Baird) 提出了一个四步的方案,可简述为:

①用 62GHz-速调管的第十二次谐波测量两个 CO₂ 跃迁 31.059THz 和 31.803THz 之间的差频 (744GHz);

②用上述差频的三次谐波测量两个 CO₂ 跃迁 33.273THz 和 31.059THz 之间的差频 (2214.3GHz);

③上述差频的三次谐波通过 11.278GHz 的速调管测量两个 CO₂ 跃迁 33.273 THz 和 26.619 THz 之间的差频 (6654.175GHz);

④用 6654.175 GHz 差频的四次谐波测量 26.619 THz 的 CO₂ 激光频率。

在全部频率链中仅需四个 CO₂ 激光器及四个铍镓二极管接收器。

这一方案目前还未实现,最困难的也许就是关键的最后一步。但他们认为这一方案还是可能实现的。在一些预备实验中已经观察到了两个激光跃迁差频的四次或五次谐波。

(3) 使用其他中间激光器的频率链

采用其他振荡器的一些频率链目前也正在试验中,例如 PTB 最近致力研究的光泵远红外激光器就是有望的一种。目前已在 0.2—25 THz 的大范围内得到了成百条激光谱线。有人估计使用光泵远红外激光器作中间振荡器,并对接收器作些改进,甲烷频率的测量准确度将有可能提高几个数量级。

五、与光速有关的一些测量数据

表 1 给出了 1958 年以来与光速测量有关的一些实验数据。由表中可知,1972 年以来共得到了三个独立的光速值。另有两个值是采用了他人的频率测量结果而导出的,但由于频率测量的准确度远高于波长值的准确度,因此这两个数值也可近似地认为是独立测量。所有这些测量值在它们的不确定度范围内均符合得很好。

表 1 测得的稳定激光辐射的波长、频率,由此得到的光速及其不确定度

| 来源,日期(参考文献) | 激光器 (μm) | 波长 (fm) | 频率 (MHz) | 光速 (m/sec) |
|-----------------|--------------------------|---------------|--------------------|-----------------|
| NPL 1958[1] | 微波干涉仪法 | | | 299792500±100 |
| NPL 1976[7] | He-Ne 3.39 | | 88376181.608±0.043 | |
| NPL 1977[11,12] | CO ₂ 9.32 | 9317246348±17 | 32176079.482±0.014 | 299792459.0±0.6 |
| NBS 1972[8] | He-Ne 0.63* | 632991470±10 | 473612166±29 | 299792462±18 |
| NBS 1972[2] | He-Ne 3.39 | 3392231390±12 | 88376181.627±0.050 | 299792457.4±1.1 |
| MIT 1977[9] | CO ₂ 9.31 | 9305385613±70 | | 299792457.6±2.2 |
| NRC 1972[10] | CO ₂ (39 条谱线) | | | 299792460±6 |
| CCDM 1974[4] | | | | 299792458±1.2 |

* 兰姆凹陷稳定。

六、结束语

现行米定义—— ^{86}Kr 基准波长的不确定度已不能满足当前科学技术发展的需要。因此,重新定义“米”将在最近几年内实现。新的米定义将涉及到光速值,这不仅是新的米定义可能影响到光速值,而且由于光速的不变性,有可能利用真空光速值来定义“米”。为了避免各研究所发表的稍有不同的光速值数据进一步扩散,因此有必要进行深入研究,公布公认的光速值,而且要保证这一公认的光速值符合现行米定义,并与未来的新定义也不发生矛盾。

1972 年以来,光速精密测量在国际上发展很快。对精确光速值的要求主要来自天文测量和空间技术的需要。地球物理学方面的大地测量和计量标准领域也要求精确的光速值。从科研角度来看,光速是基本物理常数中最重要常数,它的数值直接影响其他基本物理常数。光速的精确测定可用于进行相对论理论的验证,对其他物理理论和实验,也将有很大的促进,因此受得物理学家的广泛重视。

参 考 文 献

[1] K. D. Froome, Proc. Roy. Soc., (London) 247

A(1958), 109.
[2] K. M. Evenson, J. S. Wells, F. R. Petersen, B. L. Danielson, G. W. Day, R. L. Barger and J. L. Hall, *Phys. Rev. Lett.*, **29**(1972), 1346.
[3] 赵克功、倪育才、刘忠有, *物理*, **2**, 202(1973).
[4] T. Terrien, *Metrologia*, **10**(1974), 75.
[5] P. T. Woods, K. C. Shotton and W. R. C. Rowley, *Appl. Opt.*, **17**(1978), 1048.
[6] K. M. Evenson et al., *Appl. Phys. Lett.*, **22**(1973), 192.
[7] T. G. Blaney, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **9**(1976), 1323.
[8] Z. Bay, G. G. Luther and J. A. White, *Phys. Rev. Lett.*, **29**(1972), 189.
[9] J. P. Monchalin, M. J. Kelly, J. E. Thomas, N. A. Kurnit, A. Szöke, A. Javan, F. Zernike and P. H. Lee, *Optics Letters*, **1**(1977), 5.
[10] K. M. Baird, H. D. Riccius and K. J. Siemsen, *Opt. Comm.*, **6**(1972), 91.
[11] T. G. Blaney, C. C. Bradley, G. J. Edwards, B. W. Jolliffe, D. J. E. Knight, W. R. C. Rowley, K. C. Shotton and P. T. Woods, *Proc. R. Soc. Lond.*, **A,355**(1977), 61.
[12] T. G. Blaney, C. C. Bradley, G. J. Edwards, B. W. Jolliffe, D. J. E. Knight, W. R. C. Rowley, K. C. Shotton and P. T. Woods, *Proc. R. Soc. Lond.*, **A,355**(1977), 89.

(上接第 377 页)

的确,爱因斯坦的科学生涯具有不平凡的特点,不管将来科学还会有怎样的发展,他在科学史上的业绩

将永不磨灭。作为一位热烈索求真理的科学勇士,他那种不拘旧议、蔑视陈见、勇于创新的大无畏精神,将永远鼓舞后人在追求真理的荆途上勇往直前!

(上接第 382 页)

晶体。晶体缺陷有关的物理性能也从力学性能扩大到上述多种性能。令人高兴的是,目前我国固体缺陷研究在电子显微镜的位错观察和晶格象研究,电介质晶体和半导体中的缺陷研究,位错内耗和界面内耗的研究等方面取得了可喜的成果。但总的来说,代表们深感,我国晶体缺陷的研究工作与国际先进水平尚存在

一定的差距,为了迅速赶超这一学术领域的先进水平,必须采取切实措施,尽快提高研究人员的理论素养和实验技术,发展新的实验方法和技术,引进必要的先进设备。为此目的,会上代表们讨论了举办业务学习讨论班等具体措施。

(张明生)