

斜光检测激光抽运铯原子束频率标准¹⁾

王 义 道

(北京大学, 北京 100871)

叙述光抽运铯原子束频率标准的工作原理和实施技术。着重描述了北京大学的实验频标的设计方案与工作特色: 主要是保证这类频标长期连续工作的半导体激光器的频率锁定技术以及特别采用了斜光检测的方法, 从而提高了频标性能。北京大学的频标能连续稳定工作两个月以上, 首次在国际上获得了长期稳定度的数据。无稳定度达 2×10^{-13} 。

关键词 原子频率标准, 光抽运, 铯原子束, 激光稳频

Abstract

In this paper the principles and techniques of the optically pumped cesium beam frequency standard are described, and the design and characteristics of the laboratory optically pumped cesium beam standard at Peking University are discussed in detail. The design and the performance of the frequency locking scheme for the laser diode which ensures long-term continuously working of the standard are also described. Especially, the sharp angle incidence method of the probing laser beam invented by this laboratory is used for improving the performance of the standard. This laboratory standard has continuously worked for more than two months, and the long-term frequency stability data has been obtained for the first time for such a kind of frequency standard, the stability for one day being 2×10^{-13} .

Key words atomic frequency standard, optical pumping, cesium beam, laser frequency stabilization

物理学的进展与精密测量有密切关系。电子反常 g 值的发现, 相对论的验证, 超精细结构常数的测定, 光速各向异性的探索等, 无一不依赖于精密和准确的测量。现代各种物理量的计量以时间频率最为精密准确, 其精密度和准确度分别可达到 10^{-17} 和 10^{-14} 。这样高度精确的测量是靠量子频率标准(或原子钟)来实现的。目前时间计量单位秒是以铯原子基态超精细结构能级间的跃迁所对应的电磁振荡周期来定义的。一秒等于这个振荡周期的 9192 631 770 倍的时间。这就靠铯原子钟来实现。由于时间频率计量特别优异的精确度, 在现代计量中出现了一种趋势: 把别的计量单位通过一定的物理转

物理

换关系由时间频率来定义。例如, 长度单位米的定义是真空中光在 299 792 458 分之一秒的时间内所走过的路程, 电压单位伏特是超导约瑟夫森结上能使之产生 483 597.9 GHz 的高频振荡所加的电压等。看来计量单位进一步统一于时间频率的前景是存在的。此外, 在这样高的精确度上每前进一步, 要求对原子物理和原子与辐射场相互作用的细微末节有清晰的了解。所以, 时间频率标准无论对物理学、计量学和其他科学技术的发展具有重大意义, 不断提高这类标准的准确度与稳定度是物理和计量工作者

1) 1993年3月21日在中国物理学会第三届饶毓泰物理奖颁奖式上的报告。

共同奋斗的目标。

量子频率(时间,它与频率是互为倒数关系)标准是靠原子谱线工作的,它的准确与稳定依赖于产生原子谱线的原子状态的稳定性。它的基本工作原理如图1所示。一台信号发生器产生高频(射频或光频)电磁振荡,经过倍频和频率综合得到符合于原子谱线的频率。原子系统在这共振电磁辐射作用下产生能级跃迁,跃迁信号(谱线)被记录下来作为鉴别信号发生器频率是否符合原子跃迁频率。一旦信号频率偏离了共振峰值,鉴频器给出误差信号,电子自动控制系统就会自动调整信号频率,使误差信号减至最小,这样信号频率就会自动锁定在原子的共振跃迁频率上。

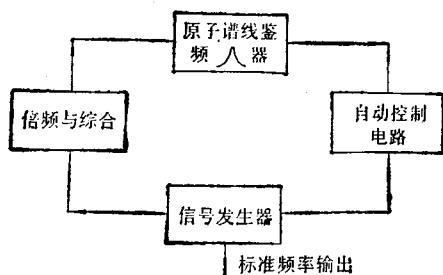


图1 量子频标工作原理图

现有频率基准用 ^{133}Cs 原子基态超精细结构两个能级间的跃迁频率为标准。物理学家的任务就是要设计制造出适当装置以获得原子谱线,并保证工作原子尽可能少受外部因素干扰,或至少使某些干扰对原子谱线的影响是可以测量计算的,因而可作出修正。频标的准确度和长期稳定度基本上决定于原子谱线因受干扰而使其峰值移动的不确定度。常见的干扰有:原子间的碰撞,周围电磁场的干扰(通过斯塔克或塞曼效应),原子运动引起的多普勒频移,原子与辐射场的相互作用等。显然,为了保证控制的精确和稳定,要求原子谱线的宽度越窄越好,或谱线优值($Q = \nu_0 / \Delta\nu$, $\Delta\nu$ 是谱线宽度, ν_0 跃迁频率)越高越好。在铯原子束频标中(图2),原子从铯炉经准直器以原子束形式出来,经过强的不均匀磁场的作用,使带有磁矩的基态原

子按不同超精细结构能态向相反方向偏转,与施特恩-格拉赫实验相似。所需状态的原子偏转后进入辐射场相互作用区。利用 Ramsey 分离场的方法原子在两个作用区与辐射场发生相互作用,共振跃迁进入另一状态。原子在第二个不均匀强磁场区被分析,进入另一状态的原子可进入检测器而发出信号,未经跃迁的原子在第二磁场区中被偏掉,进入检测器的原子多少,即跃迁信号的强弱是辐射频率是否符合共振频率的量度。Ramsey 两次相互作用的方法有效地延长了辐射场与原子相互作用时间,使共振跃迁谱线很窄(Ramsey 因此获1989年诺贝尔物理奖)。原子束避免了原子间的碰撞,谐振腔的安排使原子与辐射场相互作用过程中尽可能消除多普勒效应。

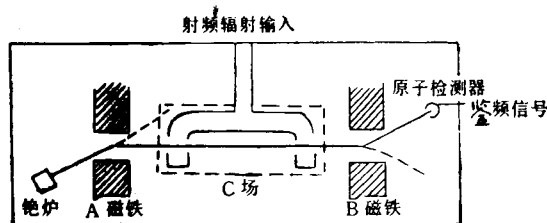


图2 传统铯原子束频率标准物理装置图

这种传统铯束频标的准确度和稳定度大体上限制在 10^{-13} — 10^{-14} 数量级。主要的制约因素是: 1. 铯原子基态共有16个超精细子能级,有用原子只有束中原子的1/16;此外,原子在磁场中偏转与其速度有关,只有一定速度范围内的原子才能进入辐射场作用区,而原子束又有一定发散。这些因素使可用原子数大大减少,跃迁信号不强,影响控制灵敏度和频标稳定度。 2. 装置中不可避免地存在剩余多普勒效应,它与原子速度有关。要计算这项误差,必须精确知道束中原子的速度分布,这是很难的,从而影响频率修正的准确度和频标稳定度。 3. 原子路径上存在着强的不均匀磁场,原子通过时会感受交变磁场作用,产生 Majorana 跃迁,并引起频移,增加了跃迁频率的不确定度。

1980年法国人 Arditi 和 Picqué^[4]提出用光抽运制备原子态和荧光检测跃迁信号的铯

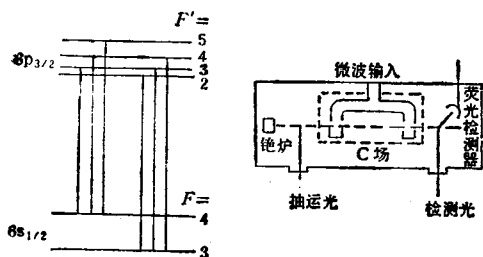


图3 铯原子能级与光抽运铯束原理图

束原子频标建议.其原理示于图3.以一定偏振和确定频率的光照射原子,使处于特定状态的原子对光发生选择吸收而跃迁至上能级.原子从上能级经自发辐射下来时可按跃迁几率分即于基态不同的各状态,几个循环以后就可使该特定状态原子抽空,从而改变基态各子能级上的原子分布.原子束经辐射场相互作用后,一些原子将跃迁到原已抽空的特定状态.在检测区,一束光照射这些原子,原子可被吸收而激发,在重新回到基态时将发射荧光,荧光强度是跃迁数量的量度.这就是光抽运和光检测.他们的建议立即引起国际频率计量界的重视,美国、法国、日本、瑞士和我国都迅速开展了这方面工作.这种方面的优点是:1.不用偏转磁铁选态而用光把原子制备到所需状态可以大大提高束中原子的利用率.2.由于原子束的轨迹不发生偏转,束中原子速度分布固定,与原子速度有关的各种频率修正值都易于计算.3.由于不存在强磁场,Majorana效应可大为减少.4.由于消除了偏转磁铁热离化丝原子检测器和电子倍增器等铯束管的部件,束管设计与加工工艺大为简化.采用新方案后预期可使频标的准确度和稳定度提高半个至一个数量级,因此是一种在近期可望有应用前景的频率基准方案.

新方案的一个难点是要找到稳定可靠,能连续运转的抽运与检测光源,目前一般都用半导体激光器,因为这种激光器便于调谐,使用方便,可以长期连续运行,体积小,耗能低.但是,半导体激光器线宽较大,频率不稳,噪声较大,要使它稳定可靠地用于原子束频标的光抽运和光检测,必须进行精巧复杂的激光稳定频率和压缩线宽的工作.正是由于这个原因,十多年

来虽然各国下了不少功夫,至今仍没有光抽运铯束频标真正能付之实用¹⁾.

北京大学从60年代起为满足国家急需开始从事原子频率标准研制.1965年底我们和原第四机械工业部合作研制成我国第一台原子钟——光抽运铯汽室原子频标.70年代我们和大华无线电仪器厂共同研制成铷汽室频标并进行了批量生产,以后又转入铯原子束频标研究,发现了Majorana跃迁对频标性能的严重影响.80年代我们投入了光抽运铯束频标研究.我们通过理论计算,确定了抽运和检测跃迁的最佳方案^[3]对半导体激光器的调谐、稳频、压线宽等措施与性能进行了多方面的探索,建立了原子束装置,观察了频标跃迁信号,初步测试了频标性能^[4].这些工作为我们后期研究打下了基础.

1988年以后杨东海从美国取得博士学位并经博士后锻炼回国参加光抽运铯束频标研究工作.这项研究在原有基础上取得了突破性进展,主要在以下几方面.

—

经过多种方案比较以后,杨东海提出并实现了偏置-饱和吸收激光稳频方案.这方案利用铯气泡的光吸收曲线一侧的斜率作为激光的鉴频曲线,当激光频率变动时,吸收曲线的光电压随之变化,以此作为误差信号经电负及反馈用以纠正激光频率,使之稳定在一个高稳定偏置电压设定的工作点上.这种方法还可有效地抑制激光的频率噪声.在我们实验中,可使对频标工作极有害的低频($<200\text{ Hz}$)频率噪声压低20 dB以上.由于激光强度、铯泡温度和高稳偏置电压源难免有长期漂移,使设定的激光频率点偏离所需跃迁频率,我们又采用了饱和吸收稳频方法.饱和吸收谱由于消除了多

1) 1993年4月22日美国国家标准与技术研究院发布新闻^[1],宣称他们的NIST-7光抽运铯束频率基正式工作,其准确度为一百万年不差一秒($\sim 4 \times 10^{-14}$).据了解其连续工作时间仅一两天.

普勒增宽,谱线十分尖锐,分辨率很高,用这种谱线进一步锁定激光频率就完全符合抽运与检测的要求。我们实验中采用了 $\sigma^+ + \sigma^-$ 偏振 $F = 4, F' = 4$ 跃迁作为抽运光, $F = 4, F' = 5$ 跃迁为检测光的最佳组合。对前者很容易获得饱和吸收线,而后者是循环跃迁,即原子吸收光激发后受选择定则限制只能回到原态,很难饱和。为此,我们进行了细致的实验与理论分析,计算了不同条件下能级粒子数分布状况,得到了较理想的饱和吸收谱,并有效地用 $F = 4, F' = 5$ 循环跃迁控制了检测激光频率。相对于偏置锁定电路,饱和吸收锁频环路是一个慢速系统,其时间常数为 1s。这个系统可使激光频率偏移小于 1MHz。利用此系统实现了上述抽运与检测光的最佳组合,使频标信号的信噪比由原来的 300 提高到了 6000 (1Hz 带宽)^[9]。

二

半导体激光器的一个优点是易于调谐,但伴随的缺点是对温度、供电电流的变化十分灵敏,分别为 60GHz/°C 和 6GHz/mA,因此对环境温度和电源电压的稳定性要求很高,两者变化稍大,稳频系统就不工作。为了解决这个问题,杨东海利用其很好的电子电路素养,在稳频电路和温度、电压的控制电路中都附加了一种数字式辅助锁定电路 (DALL)。其作用是当锁定环路的误差信号超过一定限度时,数字电路

会把控制参量自动增加或减少一个数值,使误差信号始终保持在一个较小的值。这等于扩大了控制环路的动态范围或同步区域,使环境参量变化较大时控制环路仍能正常工作。这为频标系统的长期连续工作提供了保证^[9]。

采用以上两项措施,我们的光抽运铯束频标在 1990 年已能连续工作一百小时以上,其频率稳定度为 $1.2 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$, τ 为测量取样时间^[9]。

三

一般情况下,原子束与抽运和检测光束都是互相垂直的以避免多普勒频移和增宽,两者相互作用的频率范围决定于铯共振谱线的自然宽度,约为 10MHz。对抽运光和检测光的频率稳定度的要求并不相同,这是因为 $F = 4, F' = 4$ 的跃迁很容易饱和,在 2mW 的激光作用下由于饱和谱线顶部宽达 50 MHz,即使激光频率稍为变动对抽运效果影响不大。而工作于循环跃迁的检测光则很不易饱和,谱线很锐,激光频率稍有变动就会引起荧光信号较大涨落。这是理论上用此跃迁检测可得最佳结果而过去实际上却很理想的原因。常规的办法是严格稳定激光频率,一般均采用很复杂而娇弱的光反馈稳频方法。虽然短期内可获得高稳定的激光频率和很窄的激光线宽,但对实验室环境要求很高,一般都在底层或地下室,即使如此,也很难

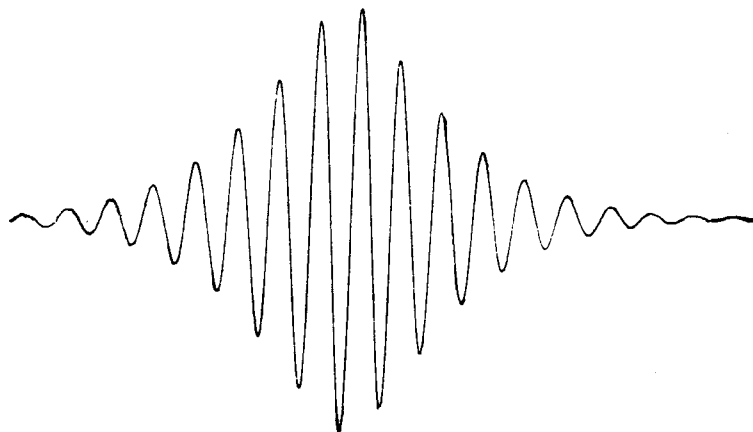


图 4 斜光检测频标信号的 Ramsey 花样微商线形

长期稳定可靠运转。杨东海提出利用检测光与原子束斜交产生谱线多普勒增宽来降低对检测光的频率稳定要求。这是一种与常规及其道而行之的设想,有其合理性,但是否因此会对频标整体性能带来副作用,则需要进行细致论证。为此,我们计算了在斜光检测条件下影响频标频率准确度的诸因素的行为,例如铯束源温度,微波功率,激光频率对由射频腔相位差和二级多普勒效应引起的频标频率不确定性的影响。结果表明,在斜入射光检测情况下,这些影响多数反而比正交情况下小,因而有可能进一步提高频标的准确度。这是因为在斜入射情况下光检测具有对原子的速度选择作用。这样,我们在国家计量研究院的协作下利用他们的大铯束装置进行适当改装作了初步试验,其结果十分理想。频标信号的 Ramsey 花样由于选速而增加了边峰数目,图形优美(见图 4)^[9]。以后,我们又专门设计制造了 0.8m 长的小型斜光检测铯束管,为了通过多普勒频移使检测光频率锁在一条饱和吸收峰上,我们选择斜交角为 66.5° 。实验结果表明,尽管由于选速作用,被检测到的有效跃迁原子数目减少,但由于降低了对激光频率噪声的灵敏度,频标信号的信噪比反而进一步提高到了 8000^[9]。这一结果在法国召开的国际会议上宣布后,会议主席说:“对解决像激光稳频这样的问题并不总需要很复杂的方法,中国人很聪明,他们想出了独特的简单易行的办法。”

四

半导体激光器及其稳频系统对外界干扰非常敏感,轻微的电冲击,例如邻近实验室的电源开关有可能使激光器工作状态跳变,光路受机械震动的影响也很大。为了克服这些困难,激光器及其供电和控温系统均安装在一个屏蔽很好的小盒中,整个光路也安排紧凑,集中在 $160 \times 240\text{mm}$ 的一个小平台上,所有光学元件经调整后固定住,形成一体化的装置。系统自备直流电源以备停电时保证连续工作。这样的系统具

物理

有很强的抗干扰能力,能防止地面剧烈震动的影 响。我们实验室地处三楼,在周围房屋装修,漏水,停电这样恶劣情况下,半导体激光器及整个频标系统连续可靠地工作了两个月以上,如果不是人为关机,当可工作更长时间。目前国外这类装置不仅都安放在底层或地下室,且尚未见有长期工作超过一百小时的报道。

采用了上述措施以后,我们在 1992 年初进行了实验频标的性能测试。铯束管长 800mm,直径 200mm,管上装有两对光束窗口,一对与束管垂直,供抽运光输入输出,一对与束轴成 66.5° ,供检测光进出。铯原子束由约 100°C 的铯炉经准直器射出,准直器由约 120 根长 9mm,直径为 0.08mm 的铜毛细管组成,有效泻流面积为 0.6mm^2 。检测区束流强度约为 $10^{10}/\text{s}$ (截面积约为 12mm^2)。束管其空度优于 $1 \times 10^{-6}\text{Torr}$ 。射频谐振腔呈 U 形,两相互作用区的间距为 168.7mm。C 场及其屏蔽与腔形成一体,磁场方向与束轴垂直,强度为 4.9A/m。两只半导体激光器是 TJS 单模 GaAlAs 激光二极管(型号为 ML-2701),功率约为 8mW,激光线宽为 25 MHz。频标电路大部是由中国计量科学研究所和大华无线电仪器厂提供的。射频辐射由 137 Hz 的正弦波调制以进行控制。整个频标系统的方框图见图 5。性能测试靠与借来的商品铯束频标 HP-5061A 比对完成。其结果如图 6 所示,秒稳定度为 1×10^{-11} , 10 秒稳定度 4×10^{-12} ,拟合后约 $1 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$,在 25 天的比对测试中得到天稳定度为 $2 \times 10^{-13}/\text{天}$ ^[10]。这是世界上第一次,也是至今为止仅有的这类频标的长期稳定度数据。这台频标不是作为频率基准设计的,它不能独立评估其准确度。比对表明,它的准确度与所用的商品频标一致,即 7×10^{-12} ,这个结果得到以王大珩先生为首的专家评审委员会的高度评价,认为“是一项具有开创性的高水平工作”。

这台频标的实验结果还表明,光抽运铯束频标有可能进一步开发为商品化的实用频标,进行批量生产。传统的磁选态型铯束管由于结构复杂,真空管内包含元器件太多,对生产制造

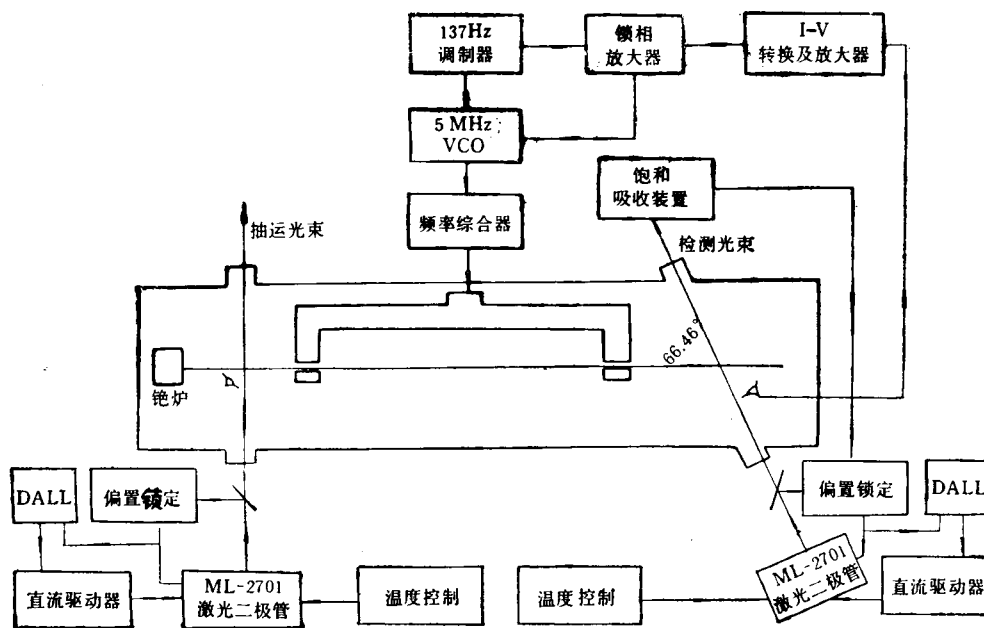


图5 斜光检测光抽运铯束频标总体方框图

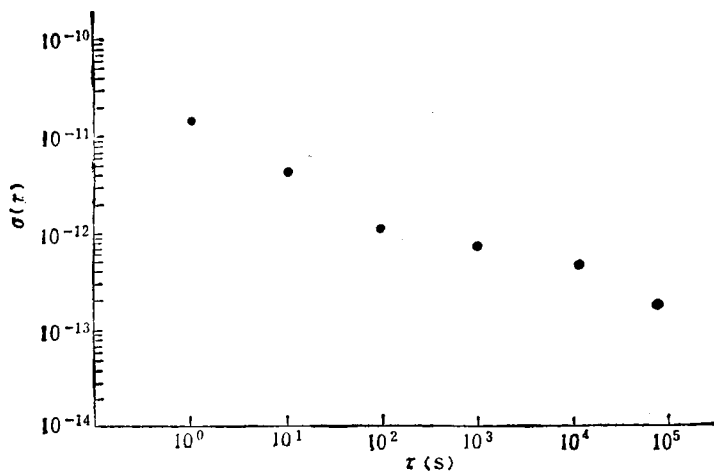


图6 斜光检测光抽运铯束频标的实验稳定度性能

工艺要求太高太精，世界上至今只有美国掌握了生产奥秘，基本垄断了生产。而光抽运铯束管内部元器件大为简化，生产工艺比较简单，现在半导体激光器及其稳频系统也可集成为结构紧凑的单元，就为这种频标的批量生产开辟了大好前景。国际上这类光抽运铯束频标都是作为计量实验的频率基准设计使用的，只有极少几家试图研制成商品型频标，但目前所得结果还不够成熟。

为了真正成为实用化测试装备，使不掌握激光物理，光谱知识和稳频技术的工作者也能使用这类频标，需要解决一个半导体激光器频率自动锁定问题。目前正在设计研制这样一个系统，借助于计算机使系统能自动识别饱和和吸收谱线，并把激光频率自动锁定于所需的抽运和检测光频率上，工作者只要一按按钮，计算机就能按设计的程序把激光频率锁定于相应谱线。这项工作已经有了初步眉目，预期不久可

望成功。这样,一种新的高精密高准确的频率标准可望在计量测试工作,在物理测量和技术应用中发挥作用。

在近十年中,这项研究先后得到机电部、国家自然科学基金委员会、国家教育委员会、国家技术监督局和国家科学技术委员会的资助,中国计量科学研究院、大华无线电仪器厂、机械电子工业部、北京真空电子器件研究所给予了合作和支持,我们谨向他们表示诚挚的感谢。我还代表杨东海和我本人对中国物理学会评奖委员会表示衷心感谢,感谢他们对我们工作的高度评价和充分支持。杨东海因在国外短期工作而不能参加今天仪式。我想,我们一定会更加努力工作;为中国物理学及其应用事业,作出更大贡献。

- [1] M. Arditì, J. L. Picqué, *J. Phys. Lett.*, **41** (1980), L379.
- [2] U. S. Dept. of Commerce News, NIST 93-13.
- [3] 吴欣欣等, *计量学报*, **7**(1986), 269.
- [4] Wang Yiqiu et al., *Frequency Standards & Metrology*, A. DeMarchi Ed., Ancona, (1989), 126.
- [5] D. H. Yang and Y. Q. Wang, *Optics Comm.*, **73** (1989), 285.
- [6] D. H. Yang and Y. Q. Wang, *Optics Comm.*, **80** (1990), 23.
- [7] D. H. Yang and Y. Q. Wang, *IEEE Trans. on Instrum. Meas.*, **IM-40** (1991), 1000.
- [8] D. H. Yang and Y. Q. Wang, *Optics Comm.*, **85** (1991), 319.
- [9] Y. Q. Wang and D. H. Yang, *Proc. EFTF 91*, Besancon, (1991), 201.
- [10] D. H. Yang and Y. Q. Wang, 24th Gen. Assembly, URSI, Abstracts, Japan Kyoto, (1993), 12.

C₆₀ 的光物理特性

孙润光 金长清

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

张新夷

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230026)

蔡志岗

(中山大学激光与光谱学研究所, 广州 510275)

叙述了近几年来获得的 C₆₀。固体和溶液的吸收光谱、复折射率、三阶非线性光学极化率、光致发光、光激发动力学等一些实验,结果表明 C₆₀ 具有独特的光物理特性。

已知的单质碳是以石墨、金刚石等形态存在的。由碳原子电子轨道的不同杂化(如 sp² 或 sp³ 杂化),形成的具有平面六角结构的石墨或具有正四面体结构的金刚石在诸如硬度、折射率、导电性等方面存在着非常大的差异。那么有没有不同于以上两种形态的单质碳凝聚态呢? 答案是肯定的。1985年美国 Rice 大学的 Smalley 研究组和英国 Sussex 大学的 Kroto 研究组在研究激光辐照石墨产生的碎片中用质谱发现,存在着不同于石墨和金刚石的新的碳形态——笼状碳簇合物。其分子结构证实后以设计具有类似网笼结构的著名建筑师 Buckmi-

nster Fuller 命名为 buckminsterfullerene 或 fullerene(富勒烯)^[1]。实际上在此以前,日本科学家吉田(Z. Yoshida)在理论上也曾经预言过这种碳簇合物的存在^[2],但未引起人们的重视。由于用激光辐照石墨的方法不能获得宏观量的这种样品,在1985年至1990年之间,有关富勒烯的研究工作没得到广泛地开展,1990年,德国 Max Plank 研究所的 Kratschmer 研究组发现通过石墨棒在 200 Torr 氩气中电弧放电,可以大量合成这种笼状碳簇合物^[3],产率约为 10%。这其中包含 C₆₀ 约 70%, C₇₀ 约 10% 及更少量的 C₈₄ 等,同时还发现它们可以