

国际单位制基本单位新定义及光量子实现方法

裴雅鹏^{1,2}, 高雅², 张俊祺², 杨军^{3*}

- (1. 哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076;
3. 广东工业大学 先进光子技术研究院, 广东 广州 510006)

摘要: 在科学、经济、社会等方面的研究与发展中, 国际单位制的应用方法, 始终是相关领域进步的重要基石。而在 2019-05-20, 7 个基本单位新定义的确立, 则标志着国际单位制可由基于常数的量子化方法所定义。文中主要介绍了国际单位制意义、国际单位制基本单位的新定义及当前主要基于光量子的实现方法, 并对国际单位制发展进行展望, 为后续研究人员提供研究思路, 并能够快速了解相关内容。文中通过查阅大量国内外权威文献和著作, 结合作者相关研究经验, 给出了 7 个国际单位制基本单位最新定义描述, 并对当前国内外在国际单位制基本单位量值实现最新方法进行了总结和分析, 通过数据和分析给出了当前最新进展和技术水平, 并对其技术发展进行了展望, 为从事相关领域的研究工作者提供了借鉴和参考。

关键词: 计量学; 国际单位制; 基本单位; 量子化定义; 光量子

中图分类号: TB91 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240553

引用格式: PEI Yapeng, GAO Ya, ZHANG Junqi, et al. New definition and light quantum implementation method for basic units in international system of units[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(5): 20240553.

裴雅鹏, 高雅, 张俊祺, 等. 国际单位制基本单位新定义及光量子实现方法[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(5): 20240553.

0 引言

作为全世界广泛采用的科研、生产过程计量方法, 国际单位制 (SI) 已成为各学科发展的重要研究工具。在 1875 年所签署的《米制公约》的基础上, 不断发展, 并于 1960 年第 11 届国际计量大会上, 正式确立了以长度、质量、时间、电流、热力学温度、发光强度为核心的, 作为统一基本单位的国际单位制, 而其所对应的计量单位分别为“米”、“千克”、“秒”、“安培”、“开尔文”、“坎德拉”。随着后续的发展, 物质量的单位“摩尔”, 也被采纳进入了 SI 当中^[1-5]。

SI 诞生以来, 其定义方法并不是不变的, 随着科学技术的不断发展, SI 物理量的定义基准逐渐由实物, 向量子物理常数转变。基于此, 在 2018-11-16 的第 26 届国际计量大会上, SI 中 7 个物理量的计量方法均被重新定义, 且该方法于 2019-05-20 开始正式生

效。由此, SI 物理量开始由量子常数, 而非实物所计量, 从而使得 SI 的计量方法具有了更高的稳定性、普适性。显然, 这是 SI 创建以来最重大的变革之一, 无疑是 SI 发展史上一个里程碑, 并对科研、生产过程的发展产生重大且深远的影响。因此, 如何实现基于量子化新定义的 SI 基本单位, 成为了世界各国科学研究的焦点。文中就是介绍 SI 中 7 个基本单位新的定义内容以及当前国际上主要的基于光量子的实现方法^[6-9]。

1 SI 基本单位新定义及光量子实现方法

SI 自诞生以来, 其基本单位定义经历了多次改变, 并且, 每一次变化均是世界科学技术进步的重要标志。近半个多世纪以来, 随着物理理论的快速发展, 原子物理和量子技术得到了显著提升, 从而使得

收稿日期: 2024-11-06; 修订日期: 2025-01-10

作者简介: 裴雅鹏, 男, 研究员, 硕士, 主要从事精密测量与光纤传感方面的研究。

通讯作者: 杨军, 男, 教授, 博士, 主要从事精密测量与光纤传感方面的研究。

SI 的基本单位定义方法由以往的实物基准转变为量子物理常数基准,进而形成了 SI 基本单位量子化定义。当前,新修订的 SI 基本单位使用一组定义常数来定义,即铯-133 原子不受干扰的基态超精细跃迁频率 ($\Delta\nu_{Cs}$)、真空光速 (c)、普朗克常数 (h)、基本电荷 (e)、玻尔兹曼常数 (k)、阿伏加德罗常数 (N_A)、频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射的光视效能 (K_{cd}),这 7 个常数对 SI 基本单位的完整定义缺一不可^[10-11]。

光量子测量是一种基于光的量子特性来进行测量的方法。它利用光子的波粒二象性以及量子纠缠等特性的高精度测量。与传统的固体系统、原子系统相比,显然光量子的相干时间相对较长,同时,其不易受到干扰,且可控性更强。基于此,光量子系统针对 SI 基本单位新定义的实现和精密测量具有天然优势而得到巨大的发展。

1.1 秒的定义及实现方法

秒 (s) 是时间单位,用原子能级跃迁频率值来定义,研究对象为铯-133 原子,其在不受干扰的条件下,基态超精细跃迁频率为 $\Delta\nu_{Cs} = 919263631770$ Hz^[1]。基于此,将铯-133 原子跃迁 919263631 个周期所需的时间定义为 1 s,即: $1\text{ s} = 919263631770/\Delta\nu_{Cs}$ 。

光子是电磁波的一种,当原子或粒子从一个量子态跃迁到另一个,就会发射或吸收光子。而光子的频率和跃迁能量成正比,即如果知道了原子或粒子的跃迁能量就可以知道发射或吸收光子的频率,从而来定义时间。秒的主要实现方法就是通过测量激发光子能级跃迁的频率来实现,当前比较典型方法是基于微波频率激励和激光冷却原子技术实现的铯原子喷泉钟,结构主要包括原子真空俘获区、探测区和原子微波相互作用区^[12],结构示意图如图 1 所示。

其原理就是通过将铯原子释放到真空冷却的原子真空俘获区,对原子进行冷却和捕获,再利用对射激光束对冷却铯原子进行激发形成向上的移动速度,产生原子喷泉。通过施加调谐微波频率,将原子选运到固定基态上,再经过原子微波相互作用区,对原子进行第一次激发跃迁,原子上升至最高点,利用重力回落到相互作用区,再进入探测区,探测微波激励跃迁的概率大小。

目前,铯原子喷泉钟被广泛应用于时间频率的测量,并且在全球各主要的相关实验室中均有设立。其

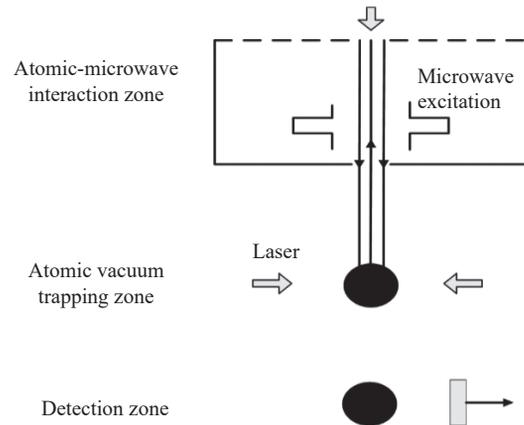


图 1 铯原子喷泉钟结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of cesium atomic fountain clock

中,美国国家标准与技术研究院 (NIST) 掌握具有国际当前最高水平的铯原子喷泉钟,其不确定度可达 1.1×10^{-16} 。同时,中国计量科学研究院研制了 NIM5 铯原子喷泉钟,而其不确定度可达 9.0×10^{-16} 。目前, NIM5 喷泉钟是中国的国家时间基准 (中国也是被国际认可的国际原子时参与国家)。在飞秒光梳等前沿技术的发展推动下,光钟研究得到快速发展,从而使其工作频率在数量级上显著高于微波钟,进而降低计量的不确定度,并提高稳定度,因此,该技术被公认为下一代时间频率基准钟^[13]。

1.2 米的定义及实现方法

米 (m) 是长度单位,用真空光速值来定义,光在真空中传播的速度近似恒定,不受任何外界因素的影响,也是光子的固有属性。真空光速 (c) 为 $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此时,1 m 的距离与光速、量子秒之间的关系如下:

$$c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (1)$$

$$1\text{ m} = (c/299\,792\,458)\text{ s} \approx 30\,663\,319c/\Delta\nu_{Cs} \quad (2)$$

根据米的定义,可以通过测量光速来实现米。早在 17 世纪国际上就开始研究测量光速,直到 20 世纪 60 年代激光的出现,通过准确测量激光在真空中的波长 λ 与频率 f ,利用关系式 $c = \lambda f$ 得到真空中光速,最终国际上确定了真空中光速值 $c = 299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,光速由测量值变成了定义值。由于光速值的确定,基于关系式 $\lambda = c/f$,只要精确得到光的频率就可以测出光波长,再通过干涉测量方法可以精确得到长度,即 $L = (N + \epsilon)\lambda/2$ 。由此可见,激光的波长 (频率) 值直接关系到长度测量准确度,使得激光波长基准成为了长

度计量基准。

实现量块、线纹、平面度、圆度等长度测量均基于激光干涉作为标准,而该方法的原理图如图2所示。这些干涉仪中使用的激光器的波长(频率)必须溯源至激光波长基准,实现长度量值的溯源^[14]。

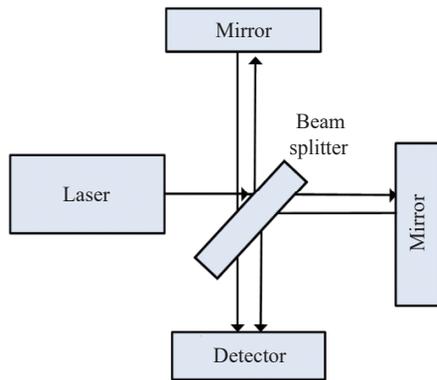


图2 激光干涉法测长原理图

Fig.2 Schematic diagram of laser interferometry length measurement

当前,稳频激光辐射可用以实现米的定义,而该方法所对应的激光器以其谱线分类,分别为:甲烷稳频氦氖激光器,对应谱线 3.39 μm ; 碘稳频染料激光器,对应谱线 576 nm; 碘稳频氦氖激光器,对应谱线有 633、612、543、640 nm; 碘稳频氦粒子激光器,对应谱线 515 nm; 钙束稳频燃料激光器,对应谱线 657 nm。目前,国际上主要利用碘稳频 633 nm 氦氖激光器建立长度基准,国内外研究成果的不确定度均达到了 10^{-11} 量级,相较米原器实物基准提升 4 个数量级^[13]。

1.3 千克 (kg) 的定义及实现方法

千克 (kg) 是质量单位,在新定义中—“千克”等于 $1.475\,521\,4 \times 10^{40}$ 个具有铯 133 原子共振频率的光子所具有的能量,用普朗克常数来定义,即普朗克常数 (h) 以单位 $\text{J} \cdot \text{s} (\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 表示,即:

$$h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (3)$$

$$1 \text{ kg} = (h / 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}) \text{m}^{-2} \cdot \text{s} \approx 1.475\,521\,4 \times 10^{40} h \nu_{\text{Cs}} / c^2 \quad (4)$$

根据质能方程 $E = mc^2$ 和 $E = h\nu$, 导出 $m = h\nu/c^2$, 其中 m 是质量, h 是普朗克常数, ν 是光频, c 是光速。可见,能够精确测量光频就可以得到质量的准确值。目前,国际上主要实现方法就是瓦特天平法,其主要

原理是基于移动线圈机械功率与电功率相等的原理^[10,14],其原理图如图3所示。

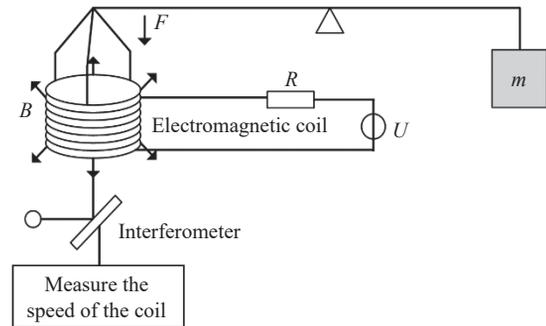


图3 瓦特天平原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the Watt balance principle

瓦特天平的工作模式分别为平衡模式、速度模式。在平衡模式下,天平左侧的洛伦兹力与右侧的重力达到平衡,此时,天平右侧具有质量为 m 的物体所产生的重力,与天平左侧长度为 L 且通过电流 I 的线圈在磁场强度为 B 的磁场中所产生的洛伦兹力相同,故有: $mg = I \cdot B \cdot L$ 。而在速度模式下,天平右侧物体被移除,从而使得线圈以一速度 v 下落,并产生感应电压 U ,并通过约瑟夫电压基准装置测量得到,此时有 $U = v \cdot B \cdot L$ 。因此 $mg \cdot v = U^2/R$, 即机械功率等于电功率。通过电磁力平衡物体重力来实现质量 m 与普朗克常数 h 之间的关系,即:

$$mg = h \frac{KR U^2}{vR} \quad (5)$$

式中: K 为约瑟夫森电压常数; R 为通过量子霍尔电阻标准测量电阻值; U 为通过约瑟夫森电压标准测量电压值; I 为电流; g 为重力加速度; v 为速度。

瓦特天平的方案最早由英国国家物理实验室 (NPL) 提出,后来与加拿大合作,实现普朗克常数相对测量不确定度达到 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 。美国国家标准与技术研究院 (NIST) 研究的瓦特天平相对测量不确定度为 1.3×10^{-8} 。中国计量科学研究院联合清华大学,在瓦特天平基础上,通过采用积分法及静态测量,准确得到了线圈移动过程中的移动速度,以及移动所产生的感应电动势。以此为基础,成功研制了能量天平,其最新相对测量不确定度优于 5×10^{-8} ^[15-17]。最终,通过各国基于瓦特天平法获得的测量结果,国际上确定 h 值为 $6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.4 安培的定义及实现方法

安培(A)是电流单位,当每秒流过 $1.602\,176\,634\,10\times 10^{19}$ 个基本电荷时,所产生的电流为1 A。此时,电流与基本电荷、量子秒之间的关系如下:

$$e = 1.60\,217\,663\,410^{-19} \text{ A} \cdot \text{s} \quad (6)$$

$$1 \text{ A} = (e/1.60\,217\,663\,410^{-19}) \text{ s}^{-1} \approx 6.789\,687 \times 10^8 \Delta\nu_{\text{Cs}} e \quad (7)$$

目前,安培定义方法的实现常依据欧姆定律,而非其严格定义。此时,基于约瑟夫森电压标准测得的电压,以及量子化摩尔标准所测得的电阻,将安培与普朗克常数 h 、电荷量常数 e 建立直接关系。其中,约瑟夫森常数国际推荐值为: $K_{\text{J-90}} = 2e/h = 483\,597.9 \text{ GHz/V} e$,通过该式,建立准确度达 10^{-10} 的量子电压基准。同时,量子化霍尔电阻标准涉及的国际推荐值为:冯·克里青常数 $R_{\text{K-90}} = h/e^2 = 258\,12.807 \, \Omega$,是把电阻与普朗克常数和电荷量常数联系起来,得到不确定度达 10^{-9} 量子电阻基准^[1]。

$$2eU = nhf \quad (8)$$

$$R_H = h/ie^2 \quad (9)$$

式中: U 为量子电压; f 为微波或者光子频率; R_H 为量子电阻; h 为普朗克常数; e 为电荷量, $n=1, 2, 3, \dots$ 和 $i=1, 2, 3, \dots$ 都是不随时间、地点、材料、温度和气压等外界参数变化的正整数。

目前,国内外在量子电压、电阻方面研究较为同步,1、10 V可编程直流电压基准已实现商用,通过对于约瑟夫结的应用,使得不确定度达 10^{-10} ,并能够在免液氮制冷机中运行。10 V可编程交流电压基准在1 kHz频率的不确定度优于 10^{-6} ,而在采用了量子化霍尔效应电阻基准后,不确定度可达 10^{-10} 。

虽然实现电压和电阻的量子基准后,量子电流可由量子电压、量子电阻所定义,但是,目前由严格定义出发,从而实现量子电流定义的研究从未停止^[18]。单电子隧道效应的应用是目前国际上研究的重点,通过该方法,可实现对电子的电荷量、频率量的测量,从而实现量子电流的定义。由于频率量的测量与原子钟相关,从而使得测量结果具有高准确度,因此,从理论上讲,单电子隧道电流可能成为准确度更高的电流量子基准。量子电压、量子电阻、量子电流这三种量子

基准也将形成互相检验的关系。

1.5 开尔文的定义及实现方法

开尔文(K)是热力学温度单位,用玻尔兹曼常数来定义,即玻尔兹曼常数(k)以单位 $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} (\text{kg}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$ 表示时,1 K表征为导致热能变化 $1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}$ 时热力学温度的变化量,见下式:

$$k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ kg}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (10)$$

$$1 \text{ K} = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}/k = (1.380\,649 \times 10^{-23} k) \text{ kg}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \approx 2.266\,665\,3 \Delta\nu_{\text{Cs}} h/k \quad (11)$$

从统计物理的角度讲,热力学温度是热能的体现,而玻尔兹曼常数则是物质的热运动动能(E)与热平衡条件下的热力学温度(T)间的比例。根据开尔文定义,玻尔兹曼常数 k 值固定之后,采用热力学温度计测量平衡态系统的平均能量获得 kT ,就能够确定该状态的热力学温度值。

目前,热力学温度主要的准确测量方法可分为三种,分别是:理想气体法、热噪声法和光谱辐射法。测量基准方法中采用理想气体法的有气体折射率温度计、气体声学温度计、气体介电常数温度计和定容气体温度计;采用热噪声法的有噪声温度计、多普勒展宽温度计;采用光谱辐射法的有光谱辐射温度计、全辐射温度计等。热力学温度测量主导方法包括:气体声学测温法、约翰逊噪声测温法、介电常数气体测温法。

气体声学法是理想气体法的一种,通过对封闭腔体中声波传递过程的测量,从而实现对热力学温度的精确测量^[19],其测量原理示意图如图4所示,热力学温度可由下式得出:

$$T = \frac{Mu_0^2}{\gamma_0 N_A k} \quad (12)$$

式中: T 为热力学温度; k 为玻尔兹曼常数; M 为分子摩尔质量; N_A 为阿伏伽德罗常数; γ_0 为气体分子的绝热系数; u_0 为气体介质中声波的传播速度。

近年来,得益于激光和量子光学技术的发展,基于双光学频率梳吸收光谱法的热力学温度测量技术的出现提出了一个新的技术方法。双光梳光谱技术利用两路超短脉冲飞秒激光光源的高度相干性,通过

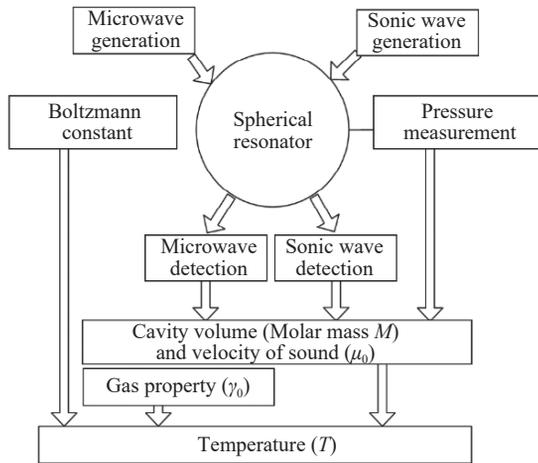


图4 气体声学法测量原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of measurement principle of gas acoustic method

干涉信号提取吸收谱线信息,结合光谱-温度反演方法实现热力学温度测量。

美国 NIST 的科研团队基于光子温度计,开发出一种加速光子温度计,依赖热量改变微型光子谐振器的尺寸和热光特性的方式,建立一种光学谐振器,利用其光谱特性进行温度精密测量,实验装置如图 5 所示。

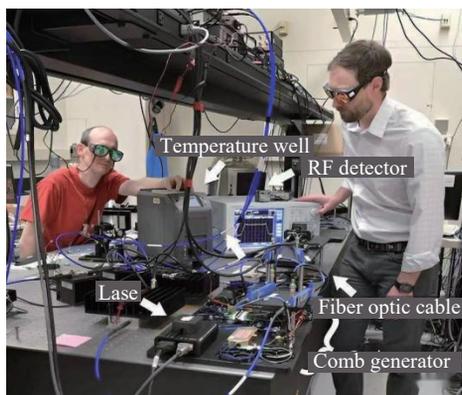


图5 光子温度计实验装置(NIST)

Fig.5 Photon thermometer experimental device(NIST)

气体声学法是具有高准确度的热力学温度测量方法,该方法原理简单,且测量所得结果气体理论值准确。美国国家标准与技术研究院、英国国家物理实验室、法国国家计量测试实验室等技术机构,都利用基于球形或准球形共鸣腔的气体声学法来测量热力学温度。目前,各国所开展的测量温度范围集中在

7~552 K,以 400 K 以下中低温为主,得到热力学温度与 ITS-90 温标之间差别 (T-T90) 的不确定度为 0.44~3 mK。随着光学技术的进步,各种新型光学测温技术将得到更大的发展空间。

1.6 摩尔的定义及实现方法

摩尔 (mol) 是物质的量单位,以阿伏伽德罗常数来定义,一摩尔光子数就等于阿伏伽德罗常数个光子。阿伏伽德罗常数 (N_A) 以单位 mol^{-1} 表示时,1 mol 对应于一个包含 $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ 个特定基本单元系统的物质的量,即下式:

$$N_A = 6.022\ 140\ 76 \times 1\ 023\ \text{mol}^{-1} \quad (13)$$

$$1\ \text{mol} = 6.022\ 140\ 76 \times 10^{23} / N_A \quad (14)$$

单晶硅制备技术、X 射线技术的发展分别从材料、方法的角度发展了测量技术,从而使得 X 射线晶体密度摩尔质量法 (XRCD)^[9] 逐渐在阿伏伽德罗常数的测量中得到应用。该方法通过测量单晶硅球摩尔体积 V_m 与单个硅原子体积 V_a 之比,即:

$$N_A = V_m / V_a = nM / (\rho V) = \frac{nM \left((4/3)\pi r^3 \right)}{ma} \quad (15)$$

式中: n 为单晶胞的原子个数; M 为单晶硅原子量; r 为硅球半径; m 为硅球质量; a 为晶格常数。

从公式可以看出宏观与微观单位间的关系,为实现对阿伏伽德罗常数的高精度测定,需要对不同重要参数进行准确测量,从而使得测量结果的相对标准不确定度应小于 2×10^{-8} ,相关参数包括:所用单晶硅的硅摩尔质量、硅球体积、硅球质量和晶格常数。XRCD 方法中硅材料要求不含杂质、晶体完美、理想,必须考虑杂质含量、非杂质点缺陷、位错和微观空洞等因素的影响。为此,需基于特定的晶体生长方法,从而得到高纯度、高浓缩的单晶硅,此时的单晶硅浓缩程度可达 99.9% 以上。

单晶硅原子量通过特殊气相质谱仪来测量。单晶硅球半径通过激光干涉仪测定。硅球质量的测量由于目前生长的硅晶体存在点阵缺陷,需要对测得的质量值进行修正,再通过光谱法分析材料杂质和表面氧化成分。晶格常数通过 X 射线光学组合干涉仪测定。阿伏伽德罗常数 N_A 测量是一个复杂过程,要减小测量不确定度,也需要在单晶硅样品制备、晶格缺陷等方面实现突破。

在千克新的定义中,虽然阿伏伽德罗常数没有正式成为定义质量单位的标准,但硅球测量法实际上是间接对普朗克常数进行比较的途径,可以帮助人们检查基于普朗克常数的新标准的准确性。

1.7 坎德拉的定义及实现方法

坎德拉 (cd) 是发光强度单位,以频率 540×10^{12} Hz 的单色辐射的光视效能固定值 K_{cd} 为 $683 \text{ Im} \cdot \text{W}^{-1}$ 来定义,即 K_{cd} 以单位 $\text{Im} \cdot \text{W}^{-1} (\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3)$ 表示,1 cd 对应于光源沿给定方向发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射且沿此方向的辐射强度为 $1/683 \text{ W/sr}$ 的发光强度,即下式:

$$K_{cd} = 683 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3 \quad (16)$$

$$1 \text{ cd} = (K_{cd}/683) \text{ sr}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \approx 830 \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h \cdot K_{cd} \quad (17)$$

坎德拉是基于对光子数探测来实现新量子化定义,通过已知频率光子计数技术,得到光子的数目,进而得到光谱辐射能量。随着光子探测技术能力的不断发展,研究机构采用不同的方法进行量值复现,现有的复现方法主要辐射功率测量法。其原理就是具有一定光通量的光照到特定探测器上,此时,探测器受到光子的影响而产生光电流,而输出光电流可由下式给出:

$$I(A) = \int \Phi_{e,\lambda} S(\lambda) d\lambda = \int \Phi_{e,\lambda} R(555) S_n(\lambda) d\lambda \quad (18)$$

式中: $\Phi_{e,\lambda}$ 为光通量; $S(\lambda)$ 为探测器绝对光谱响应度。

由于 540×10^{12} Hz 的单色辐射波长 555 nm,探测器在 555 nm 实物绝对光谱响应度表示为 $R(555)$, $S(\lambda)$ 又可以表示为 $S(\lambda) = R(555) S_n(\lambda)$ 。基于光辐射通量与辐射通量的关系,可导出发光强度为下式:

$$I_v = \frac{I(A) \cdot F \cdot K_m}{R(555) \cdot A} L^2 \quad (19)$$

由上式可知,当探测器光阑面积 A 已知,通过测量光源与探测器距离 L 、绝对光谱响应度 $R(555)$ 、探测器输出电流 $I(A)$ 及光谱修正系数 F ,即可测得发光强度 I_v 。坎德拉其复现装置示意图如图 6 所示^[20-21]。

近年来,量子光学测量方法的快速发展,使得不同探测技术得到突破,这些技术包括但不限于:单光子探测器、单光子源、可分辨光子数探测器、突破标准量子极限的光子探测。相关技术在促进光辐射相关量子计量标准技术发展的同时,也对单光子计量提

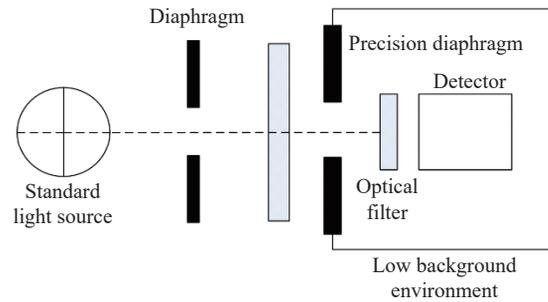


图 6 坎德拉复现装置示意图

Fig.6 Schematic diagram of the Candela reproduction device

出了全新的挑战。在坎德拉量子化研究中,美国是国际上最早全面开展面向光子计量标准关键技术研究的国家,迄今取得了探测效率高于 90% 的高速超导纳米线单光子探测器、利用超导转变边沿传感器监测的 pW 级绝对低温辐射计等成果。欧盟自 2008 年开始正式以“量子坎德拉”命名的研究计划,并形成了基于光量子建立光辐射标准的 EMRP 路线图框架。

2 展望

当前 SI 基本单位是运用现代量子科学技术来建立单位与定义常数的关联,这是 SI 发展上的一条创新之路,也是 SI 科技进步的重要标志。未来,任何新发现的物理现象,只要能够建立起物理量与 SI 定义常数之间的明确关系,就可以用来实现 SI 单位。随着 SI 量子化时代的到来,以量子技术为基础的计量基准,尤其是基于光量子的计量基准研究不断深入和成熟,不断突破极限,量子化的国际新测量体系也将随之重新建立。此外,SI 基本单位新定义也推动着新一代量子测量仪器发展,使笔者的测量更加准确、更加可靠,实现量值溯源传递链条更短、更快和更加扁平化,同时,也将更将对国家治理体系、管理体系、对人的传统观念带来重大影响和挑战。

参考文献:

- [1] FISCHER J, ULLRICH J. The new system of units [J]. *Nature Physics*, 2016, 12(1): 4-7.
- [2] BIPM. Compendium of main rules and practices applicable to the BIPM[R]. Paris: BIPM, 2018: 1-33.
- [3] Taylor B, Thompson A. The international system of units (SI) [R]. US: NIST Special Publication, 2008: 330.
- [4] MILTON M J T, DAVIS R, FLETCHER N. Towards a new SI:

- a review of progress made since 2011 [J]. *Metrologia*, 2014, 51(3): 21-30.
- [5] NEWELL D B. The CODATA 2017 values of h , e , k and NA for the revision of the SI [J]. *Metrologia*, 2018, 55(1): 13-16.
- [6] SIMON J. Experiments for the new SI [J]. *PTB Mitteilungen*, 2018, 126(2): 1-107.
- [7] EURAMET. Towards future SI measurement standards [EB/OL]. (2017-09-01) [2025-01-10].<https://www.euramet.org/metrology-for-societys-challenges/future-measurement-standards/>.
- [8] STEELE A. Redefining the SI at CGPM 2018: An Update to SIM Some background information and next steps[C]//SIM General Assembly, 2018:2-10.
- [9] NIST. SI Redefinition[EB/OL]. (2024-09-01) [2025-01-10]. <https://www.nist.gov/si-redefinition>.
- [10] NIST. Kilogram: The kibble balance[EB/OL].(2021-06-03)[2025-01-10].<https://www.nist.gov/siredefinition/kilogram-kibble-balance>.
- [11] NIST. Kelvin:Boltzmann constant[EB/OL].(2021-06-03)[2025-01-10].<https://www.nist.gov/si-redefinition/kelvin-boltzmann-constant>.
- [12] WANG Qing. Optical clocks: The next generation of time/frequency standards [J]. *Metrology Science and Technology*, 2019, 5: 11-12.
- [13] STOCK M, DAVIS R S, de MIRANDES E, et al. The revision of the SI-the results of three decade of progress in metrology [J]. *Metrologia*, 2019, 56(2): 1-14.
- [14] GAO Wei, LI Jinyuan, WANG Rui, et al. The New International System of Units(SI) Quantum Metrology and Quantum Standards[M]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 9- 50. (in Chinese)
- [15] LUO Zhiyong, WANG Jintao, LIU Xiang, et al. Avogadro constant determination and kilogram redefinition [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(3): 377-380. (in Chinese)
- [16] SHEN Naicheng. The history, status and developments in the definition of the kilogram mass unit [J]. *Physics*, 2014, 43(9): 606-611.
- [17] LI Zhengkun, BAI Yang, XU Jinxin, et al. NIM's Effort on and Contribution to the Redefinition of the Kilogram [J]. *Metrology Science and Technology*, 2019, 5: 28-30.
- [18] LIU Min, PENG Ming. Review determination of the elementary charge [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(3): 322-326. (in Chinese)
- [19] YU Pan, ZHOU Gang, LI Qing. Development of study about acoustic gas thermometry [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2018, 46(4): 14-19. (in Chinese)
- [20] FAN Jihong, YANG Zhaojin, ZHAN Chunlian, et al. Research on measuring method for candela reappearance [J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, 23(6): 36-38. (in Chinese)
- [21] PEI Yapeng. Review of techniques and development of nanometre measurement [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2007, 27(6): 23-27.(in Chinese)

New definition and light quantum implementation method for basic units in international system of units

PEI Yapeng^{1,2}, GAO Ya², ZHANG Junqi², YANG Jun^{3*}

(1. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Beijing Aerospace Measurement and Testing Technology Research Institute, Beijing 100076, China;

3. Institute of Advanced Photonics Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract:

Objective Since its inception, the definition methods of the International System of Units (SI) have not remained static. With the continuous advancement of science and technology, the definitional benchmarks for SI physical quantities have gradually shifted from material artifacts to quantum physical constants. Against this backdrop, at the 26th General Conference on Weights and Measures Held on November 16, 2018, the measurement methods for all seven base units of the SI were redefined, and these new definitions officially came into effect on May 20, 2019. Consequently, SI physical quantities are now defined in terms of quantum constants rather than material artifacts, endowing the SI with greater stability and universality. This transformation

represents one of the most significant changes since the creation of the SI, marking a milestone in its history and having profound implications for scientific research and industrial processes. As a result, the realization of SI base units based on the new quantum definitions has become a focal point of scientific research worldwide. This paper introduces the new definitions of the seven SI base units and explores the current international approaches to their realization based on photonic quantum principles.

Methods In this paper, both introductions on the importance of SI, and new definition methods, especially current light quantum methods, of basic units in SI have been implemented. Then, development of SI has been prospected, for providing research ideas and a way to rapidly understand relative contents for researchers. Based on investigations on abundant domestic and abroad literatures and works, combined with study experiences from authors of this paper, new definition method for seven basic units in SI has been described in detail. Then, the latest domestic and abroad realization method for obtaining basic unit values in SI has been analyzed and concluded.

Results and Discussions In recent years, the rapid development of quantum optical measurement methods has led to breakthroughs in various detection technologies, including but not limited to single-photon detectors, single-photon sources, photon-number-resolving detectors, and photon detection surpassing the standard quantum limit. While these advancements have promoted the development of quantum metrology standards related to optical radiation, they have also introduced new challenges in single-photon metrology. In the field of candela quantization research, the United States has been a global pioneer in comprehensively advancing key technologies for photon metrology standards, achieving significant milestones such as high-speed superconducting nanowire single-photon detectors with detection efficiencies exceeding 90% and pW-level absolute cryogenic radiometers monitored by superconducting transition-edge sensors. Since 2008, the European Union has initiated research programs under the banner of the "Quantum Candela", establishing a roadmap framework for developing optical radiation standards based on photonic quantum principles.

Conclusions The current SI base units are established by linking the units to defining constants through modern quantum science and technology, representing an innovative approach in the evolution of the SI and a significant milestone in its scientific and technological progress. In the future, any newly discovered physical phenomenon that can establish a clear relationship between a physical quantity and an SI defining constant can be utilized to realize SI units. With the advent of the quantum era of the SI, quantum technology-based metrological standards, particularly those based on photonic quantum standards, are being increasingly refined and matured, continuously pushing the boundaries of precision. A new quantum-based international measurement system will consequently be redefined. Furthermore, the new definitions of SI base units are driving the development of next-generation quantum measurement instruments, enabling more accurate and reliable measurements, shortening and flattening the traceability chain, and significantly impacting and challenging national governance systems, management frameworks, and traditional human perspectives.

Key words: metrology; international system of units; basic units; quantum definition; light quantum