

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.06.01

材料光学特性计量测试技术体系发展现状与趋势

甘海勇¹, 于天来², 匡波², 郑春弟¹, 冯国进¹, 马志远², 许国珍², 赫英威¹

(1. 中国计量科学研究院, 北京 100029; 2. 成都光明光电股份有限公司, 四川 成都 610100)

摘要: 综述了材料光学特性计量测试技术领域国际互认校准和测量能力、国际比对、国家计量标准装置、计量技术规范、国家标准等多方面研究进展, 介绍了光谱规则透射比、光谱漫反射比、漫透射视觉密度计量基准装置和宽光谱连续波长等社会公用标准装置的原理和能力水平, 梳理了以无色光学玻璃为代表的光学材料的光学、力学、热学、化学等综合特性的测试规范。指出我国材料光学特性计量测试技术研究应用发展迅速、国际国内影响卓著, 有力地保障了高品质光学材料、高精度材料光学特性测量仪器的研发与应用, 促进了国家光学材料产业的高质量发展; 随着前沿领域先进光学材料的高端需求不断增加, 亟须稳步增强技术基础、持续拓展量程范围、深入聚焦物理内涵, 进一步助力材料光学计量测试技术在精准测量、高效感知、数字重构、智能决策、人机交互等领域发挥关键作用。

关键词: 材料光学特性; 光谱光度; 计量; 测试; 光学玻璃

中图分类号: O43; TB3; TB96

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2024) 06-0001-19

Metrology and test technologies for optical properties of materials: development status and trends

GAN Haiyong¹, YU Tianlai², KUANG Bo², ZHENG Chundi¹,FENG Guojin¹, MA Zhiyuan², XU Guozhen², HE Yingwei¹

(1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 2. CDGM Glass Co., Ltd., Chengdu 610100, China)

Abstract: This paper summarizes the research progress of metrology and test technology for optical properties of materials, including internationally mutual recognized calibration and measurement capabilities, international comparisons, national metrology primary standard facilities, verification regulations and calibration specifications, and national standards. It introduces the methods, principles, capability, and uncertainties of primary standards such as spectral rule transmittance, spectral diffuse reflectance, and diffuse transmittance visual density measurement facilities, as well as social common standards such as wavelength in a continuous wide spectrum. It also summarizes the national standards on the test methods for the comprehensive optical, mechanical, thermal, and chemical properties of optical materials with colorless optical glass as an example. It concludes that the national metrology and test technology for optical properties of materials have been improved rapidly, with significant international and domestic influence, effectively ensuring the research

收稿日期: 2024-11-11; **修回日期:** 2024-11-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFF0200300, 2017YFF0205103, 2017YFF0206103, 2018YFF0212402, 2021YFF0600200); 国家科技支撑计划项目(2006BAF06B05); 国家质检总局量值传递与质量安全项目(ALC1206); 国家质检总局质量技术监督能力提升专项项目(ANL1608); 中国计量科学研究院基本科研业务费项目(AKY0750, AKY0950, AKY1706, AKY1807, AKY ZD1909)

引用格式: 甘海勇, 于天来, 匡波, 等. 材料光学特性计量测试技术体系发展现状与趋势[J]. 计测技术, 2024, 44(6): 1-19.

Citation: GAN H Y, YU T L, KUANG B, et al. Metrology and test technologies for optical properties of materials: development status and trends[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(6): 1-19.



and application of high-quality optical materials and high-precision material optical property measurement instruments, and promoting the high-quality development of the national optical material industry. With increasing demands for advanced optical materials in cutting-edge fields, it is very important to steadily enhance the technical infrastructure, continuously expand the measurement range, and deeply focus on the physical essences, to underpin the key metrology and test technology for optical properties of materials to further play a key role in the fields of precision measurement, efficient perception, digital reconstruction, intelligent decision-making, human-computer interaction and so on.

Key words: optical properties of materials; spectrophotometry; metrology; test; optical glass

0 引言

材料光学特性泛指物质可与光辐射相互作用的能力,常见的物理现象包括反射、折射、散射、透射、吸收等。针对材料光学特性的测量技术专称光谱光度(spectrophotometry),典型的测量仪器有光谱光度计(spectrophotometer,即分光光度计)和傅里叶变换光谱仪等^[1]。

随着光源、探测器和光谱分析技术的不断进步,材料光学特性测量和应用水平逐步提高。材料光学特性计量技术覆盖的波段范围从真空紫外扩展到中远红外,光谱带宽越来越精细,功率范围覆盖强激光到单光子水平,量程极限覆盖超高到极低,测量不确定度越来越小。测试技术也已经拓展到适用于不同复杂环境、不同物理形态的测量对象,可以有效地监测或检验由外界物理化学条件所产生的材料光学特性频谱和时空上的分布及变化。

高水平材料光学特性计量测试技术促进了光学材料的创新和进步,在科技前沿、国民经济、重大需求、生命健康等领域发挥了重要作用。高品质光学镜头保障了天文观测等领域中高分辨图像和视频的采集;高性能漫反射材料支撑了遥感载荷高精度实验和在轨辐射定标;光伏组件、照明灯具和显示器件屏罩透射比的增加意味着能源利用率的相应提升;手机等电子产品屏幕蓝光透射比的抑制意味着对人眼危害的相应降低;高逆反射系数材料能够更好地为驾驶员指引道路;黑体辐射源红外发射率的准确计量为疫情防控中的体温筛查和安全监测中的目标感知提供了可靠的参考依据。

本文介绍近年我国材料光学特性计量测试技术的重要研究进展,探讨面向材料光学特性的光

谱光度计量体系的建立情况,分析无色光学玻璃材料光学特性测试技术的原理与特点,并对材料光学特性计量测试技术领域未来的发展方向进行展望,旨在为相关科研工作者提供借鉴。

1 面向材料光学特性的光谱光度计量体系

国际计量局(即国际米制公约组织, Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)的光度与辐射度咨询委员会(Consultative Committee for Photometry and Radiometry, CCPR)公布的校准和测量能力(Calibration and Measurement Capability, CMC)清单包括:①光度、②探测器特性、③光源光谱发射特性、④材料光谱特性、⑤光源与探测器光谱积分特性、⑥材料颜色等光谱积分特性、⑦光纤光学特性。其中第④和⑥部分专门面向材料光学特性,具体包括光谱规则透射比、光谱漫反射比、发射率/光谱发射比、双向反射分布函数、(宽波段连续)波长、表面颜色、逆反射系数、雾度等共21项校准和测量能力,如表1所示。光谱漫反射比和光谱规则透射比还被列入CCPR仅有的6项关键国际比对,代号分别为K5和K6,如表2所示。

1.1 校准和测量能力

BIPM官方网站公布的数据中,中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, China, NIM, 简称“中国计量院”)获得国际互认的材料光学特性校准和测量能力包括光谱规则透射比、光谱漫反射比、(宽波段连续)波长、颜色等共计19项,如表3所示。2023年通过国际同行评审拟新增或提升的校准和测量能力共计16项,如表4所示。

1.2 国际比对

中国计量院近年来积极参加多项材料光学特性国际比对,已完成美洲计量组织(Inter-American Metrology System, SIM)、欧亚计量合作组织(Euro-

表1 BIPM CCPR 材料光学特性校准和测量能力
Tab.1 BIPM CCPR CMCs for optical properties
of materials

序号	参数
4.1	光谱规则透射比 Transmittance, regular, spectral
4.2	光谱漫透射比 Transmittance, diffuse, spectral
4.3	光谱规则吸收比 Absorbance, regular, spectral
4.4	光谱漫吸收比 Absorbance, diffuse, spectral
4.5	光谱漫反射比 Reflectance, diffuse, spectral
4.6	光谱规则反射比 Reflectance, regular, spectral
4.7	光谱半球反射比 Reflectance, hemispherical, spectral
4.8	(待定)
4.9	发射率 Emissivity
4.10	光谱发射比 Emittance, spectral
4.11	双向反射分布函数 Bi-directional reflectance distribution function (BRDF)
4.12	反射因子 Reflectance factor
4.13	亮度因子 Radiance factor
4.14	发光亮度因子 Luminescent radiant factor
4.15	(宽波段连续)波长 Wavelength
4.16	光谱折射率 Refractive index, spectral
4.17	光谱偏振平面旋转角 Angle of rotation of plane of polarization, spectral
4.18	光谱椭偏角 Ellipsometric angles, spectral
6.1	x, y, Y 表面颜色 Colour, surface, x, y, Y
6.2	L^*a^*b 表面颜色 Colour, surface, L^*a^*b
6.3	x, y, Y 透射颜色 Colour, transmitted, x, y, Y
6.4	L^*a^*b 透射颜色 Colour, transmitted, L^*a^*b
6.5	逆反射系数 Retroreflectance
6.6	光泽度 Gloss
6.7	雾度 Haze
6.8	(待定)
6.9	照度因子 Luminance factor
6.10	照度因数 Luminance coefficient
6.11	(待定)
6.12	白度 Whiteness

表2 BIPM CCPR 关键比对
Tab.2 BIPM CCPR key comparisons

代号	比对参数以及波段范围
K1	光谱辐射照度 Spectral irradiance
K1.a	波段: 250 ~ 2 500 nm
K1.b	波段: 200 ~ 400 nm
K2	光谱响应度 Spectral responsivity
K2.a	波段: 900 ~ 1 600 nm
K2.b	波段: 300 ~ 1 000 nm
K2.c	波段: 200 ~ 400 nm
K2.d	波段: 10 ~ 200 nm (计划中)
K3	发光强度 Luminous intensity
K4	光通量 Luminous flux
K5	光谱漫反射比 Spectral diffuse reflectance 波段: 360 ~ 820 / 830 nm
K6	光谱规则透射比 Spectral regular transmittance 波段: 380 ~ 1 000 nm 波段: 200 ~ 400 nm (计划中)

Asian Metrology Cooperation, COOMET)和亚太计量规划组织(Asia Pacific Metrology, Programme, APMP)多项国际比对并取得等效, 当前正在参加 CCPR K5 光谱漫反射比关键比对、共同主导 APMP 灰阶光谱漫反射比比对, 并积极争取主导 APMP 逆反射系数比对。中国计量院参加的材料光学特性国际比对如表 5 所示。

1.3 关键参数与计量技术

中国计量院在国家科技支撑计划、重点研发计划等科研项目的支持下, 对材料光学特性计量技术能力进行了全面提升, 取得了多项关键校准和测量能力的进步^[2]。

1.3.1 光谱规则透射比

光谱规则透射比是指与入射光在同一方向上的透射光辐射通量与入射光辐射通量的比值。测量光谱规则透射比的原理是: 基于完全透过(100%)和完全不透过(0%)两个绝对参考点, 利用光功率叠加法测量装置的线性因子, 并根据线性因子评估光谱规则透射比的测量不确定度。光谱规则透射比量值复现原理如图 1 所示。

表3 BIPM公布的中国计量院材料光学特性
校准和测量能力

Tab.3 NIM's CMCs for optical properties of
materials published by BIPM

参数	测量条件	不确定度 ($k = 2$)
光谱规则 透射比	波段: 380 ~ 400 nm 量程: [0.01, 1.0]	1.9×10^{-3}
	波段: 401 ~ 1 000 nm 量程: [0.2, 1.0]	1.1×10^{-3}
	波段: 401 ~ 1 000 nm 量程: [0.05, 0.2]	5.34×10^{-4}
	波段: 401 ~ 1 000 nm 量程: [0.01, 0.05]	3.2×10^{-4}
	波段: 380 ~ 1 000 nm 量程: [1.0×10^{-4} , 0.01]	1.4×10^{-4}
光谱漫 反射比	波段: 380 ~ 400 nm 量程: [0.01, 1.0]	1.7% (rel.)
	波段: 400 ~ 820 nm 量程: [0.01, 1.0]	1.6% (rel.)
	波段: 820 ~ 2 000 nm 量程: [0.1, 1.0]	1.0% (rel.)
波长 (宽波段连续)	波段: [200.0, 780.0] nm 对象: 特征光谱滤光片	0.1 nm
	波段: [780.0, 2 000.0] nm 对象: 特征光谱滤光片	0.4 nm
波长 (光纤通信)	波段: [600.0, 1 700.0] nm 对象: 光纤光源	1.0 pm
	波段: [600.0, 1 510.0] nm 对象: 光频谱分析仪	0.01 nm
	波段: [1 510.0, 1 640.0] nm 对象: 光频谱分析仪	1.3 pm
x, y, Y 表面颜色	范围: x, y [0.0, 0.9], Y [0.0, 100.0] 条件: 8° :di 和 8° :de	[0.002, 0.6]
	范围: x, y [0.0, 0.9], Y [0.0, 100.0] 对象: 漫反射材料	[0.002, 0.6]
L^*a^*b 表面颜色	范围: L^* [0.0, 100.0] 条件: 8° :di 和 8° :de	[0.5, 0.7]
	范围: L^* [0.0, 100.0] 对象: 漫反射材料	[0.4, 0.5]
雾度	量程: [0.2, 35.0] 依据: ASTM D1003	[0.18, 0.3]
白度	量程: [1.0, 100.0] 条件: 8° :di 和 8° :de 依据: ISO 11475, ISO 11476, ISO 2470, GB/T 22880	0.016

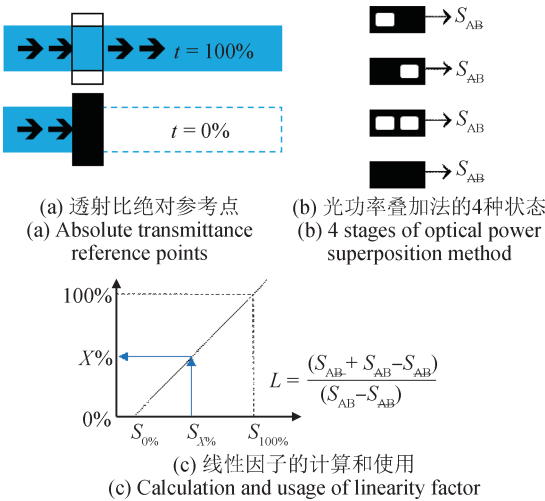


图1 光谱规则透射比量值复现原理

Fig.1 Principle of spectral regular transmittance
scale realization

光谱规则透射比基准装置由光源系统、准直系统、分光系统、光功率叠加法线性测量系统、样品仓、信号监测与探测系统和信号处理系统等多个子系统组成,通过详细分析影响测量结果不确定度水平的波长准确度、杂散光、带宽、线性、基线平直度、偏振度、互反射、测量重复性、测量稳定性等因素,实现光谱规则透射比的量值绝对复现。光谱规则透射比量值复现装置如图2所示。

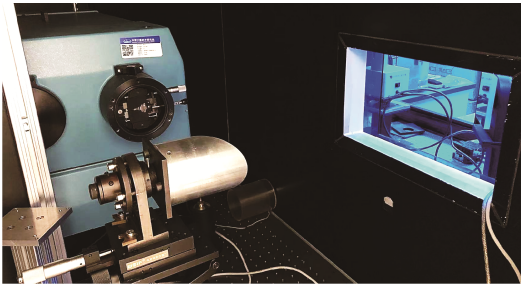


图2 光谱规则透射比量值复现装置

Fig.2 Facility for spectral regular transmittance scale realization

中国计量院光谱规则透射比 380 ~ 1 000 nm 波段通过 SIM. PR-K6 国际比对取得国际等效并建立了国家计量基准^[3]; 1 001 ~ 2 500 nm 波段无对应国际比对、已通过国际同行评审; 235 ~ 350 nm 波段参加 COOMET. PR-730 / UA / 17 国际比对, 不确定度($k = 2$)小于 1.6×10^{-3} , 在量程 0.5、0.2、0.1 处与比对参考值偏离分布不大于 0.12%、0.08%、0.03%^[4]; 中红外波段不确定度($k = 2$)为 4.5×10^{-3} ,

表 4 中国计量院通过最新国际同行评审后拟新增或提升的材料光学特性校准和测量能力

Tab.4 NIM's CMCs for optical properties of materials to be added or improved after latest international peer review

参数	测量条件	不确定度($k = 2$)
光谱规则透射比	波段: 1 001 ~ 2 500 nm, 量程: [0.01, 1.0]	3.6×10^{-3}
	波段: 1 001 ~ 2 500 nm, 量程: [0.001, 0.01]	7.6×10^{-5}
光谱漫反射比	波段: 250 ~ 360 nm, 量程: [0.1, 1.0]	1.0% ~ 1.4% (rel.)
	波段: 360 ~ 460 nm, 量程: [0.2, 1.0]	$[1.3 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-3}]$
	波段: 460 ~ 680 nm, 量程: [0.2, 1.0]	$[1 \times 10^{-3}, 2.9 \times 10^{-3}]$
	波段: 680 ~ 820 nm, 量程: [0.2, 1.0]	$[1.4 \times 10^{-3}, 3.9 \times 10^{-3}]$
	波段: 360 ~ 680 nm, 量程: [0.01, 0.2]	$[8 \times 10^{-3}, 1.3 \times 10^{-3}]$
	波段: 680 ~ 820 nm, 量程: [0.01, 0.2]	$[1.2 \times 10^{-3}, 1.4 \times 10^{-3}]$
	波段: 820 ~ 2 500 nm, 量程: [0.1, 1.0]	1.0% ~ 1.4% (rel.)
BRDF	波段: 280 ~ 450 nm, 量程: [0.000 5, 2 000] sr ⁻¹	2% ~ 50% (rel.)
	波段: 450 ~ 1 000 nm, 量程: [0.000 5, 2 000] sr ⁻¹	0.4% ~ 50% (rel.)
	波段: 1 000 ~ 2 000 nm, 量程: [0.000 5, 2 000] sr ⁻¹	0.7% ~ 50% (rel.)
	波段: 10.6 μm, 量程: [0.001, 2 000] sr ⁻¹	5% ~ 50% (rel.)
光谱椭偏角	波长: 633 nm 范围: Ψ [0, 90] deg, Δ [-180, 180] deg	Ψ 0.05 deg, Δ 0.15 deg
x, y, Y 表面颜色	范围: x, y [0.0, 0.9), Y [0.0, 100.0] 对象: 漫反射材料	[0.000 3, 0.6]
L^*a^*b 表面颜色	范围: L^* [0.0, 100.0], 对象: 漫反射材料	[0.1, 0.3]
白度	量程: [0, 100.0], 条件: 8°:di 和 8°:de 依据: ISO 11475, ISO 11476, ISO 2470, GB/T 22880	[0.1, 0.6]

表 5 中国计量院参加的材料光学特性国际比对

Tab.5 NIM-participated international comparisons for optical properties of materials

编号	比对参数
SIM.PR-K6	光谱规则透射比
COOMET.PR-730/UA/17	紫外光谱规则透射比 235 ~ 350 nm
COOMET.PR-689/RU/16	波长(光纤通信)
COOMET.PR-40/BY-a/14	透射颜色
COOMET.PR-736/RU/17	反射光学密度
APMP.PR-P3	雾度
APMP.PR-P3.1	雾度(高雾度值)
CCPR K5	光谱漫反射比(进行中)
APMP.PR-S7	灰阶光谱漫反射比(进行中)
APMP.PR-Sx	逆反射系数(申请主导中)

研制的标准器不确定度($k = 2$)小于 8×10^{-3} ^[5]。中国计量院还参加了 COOMET. PR-40 / BY-a/14 透射颜色国际比对, 并取得了国际等效。

1.3.2 光谱漫反射比

光辐射的反射比存在一个完全不反射(0%)的绝对参考点, 但是难以找到完全反射(100%)的绝对参考点。当反射光辐射通量集中在入射对称方向时, 可以通过确定线性因子的测量系统并旋转调节光源、被测样品、探测器的角度进行光谱规则反射比的测量; 而当反射光辐射通量不集中时, 则需要在空间上进行扫描并积分。光谱规则和漫反射比量值复现原理如图 3 所示^[6]。

中国计量院建立的光谱规则反射比测量装置是基于旋转被测样品和探测器方法, 波段为 250 ~ 2 500 nm, 反射比量程覆盖 0.001 ~ 1, 测量角度为 8° ~ 68°, 相对不确定度($k = 2$)为 0.5%。

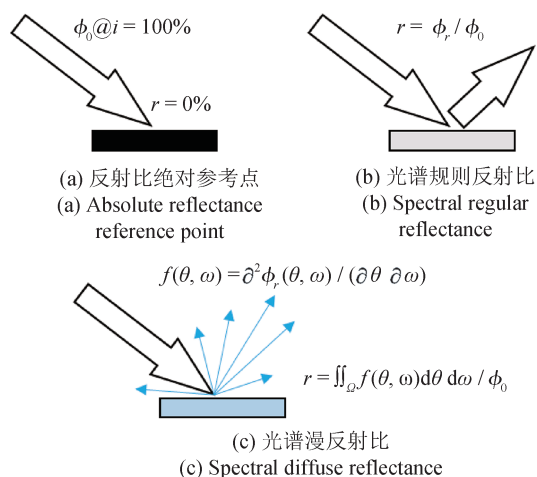


图3 光谱规则和漫反射比量值复现原理

Fig.3 Principle of spectral regular and diffuse reflectance scale realization

光谱漫反射比的绝对复现可以采用反射光辐射通量空间扫描积分法实现,但是测量过程较为复杂;也可以采用特性相同的积分球和平板样品来实现。光谱漫反射比量值复现方法如图4所示。采用带有积分球漫射附件的双光束光谱光度计作为测量装置,测量具有一个开孔的辅助积分球与相同材质的平板样品,并进行比较和计算,最终得到绝对光谱漫反射比量值。光谱漫反射比量值复现装置如图5所示。中国计量院光谱漫反射比国家计量基准相对不确定度($k=2$)在250~2 500 nm波段为0.4%~0.6%,2.5~16 μm 波段为3.0%;色度基准装置测量范围 Y 值85~100,波段360~820 nm,不确定度($k=2$) U_y 为0.4, U_x 和 U_y 均为 2.5×10^{-4} 。

中国计量院参加了2004–2014年CCPR K5光谱漫反射比国际比对,并取得校准和测量能力的国际等效,校准和测量能力持续提升,正在参加2019年开始的新一轮CCPR K5光谱漫反射比和共同主导APMP.PR-S7灰阶光谱漫反射比国际比对。

1.3.3 漫透射视觉密度

中国计量院根据摄影密度测量相关国家标准中规定的基本定义、几何条件和光谱条件,建立了漫透射视觉密度国家基准装置。摄影密度测量国家标准如表6所示^[7-10]。

近期,中国计量院又创新采用了光纤束增强了漫射光源的性能,将测量范围扩展至0~6.0,不确定度($k=2$)改进至0.003~0.011。漫透射视觉密度量值复现原理如图6所示^[11]。

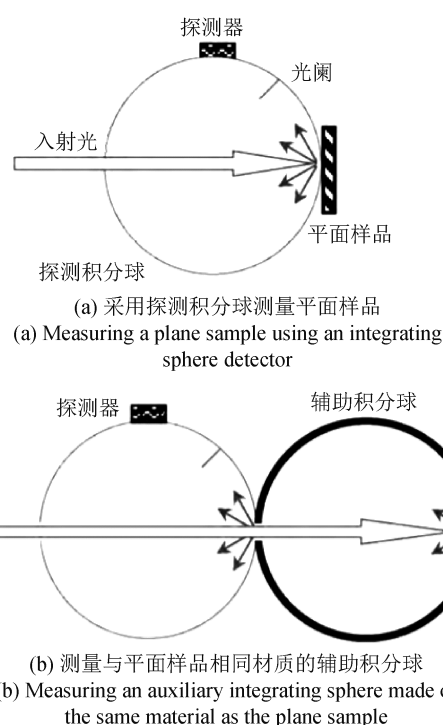


图4 辅助积分球光谱漫反射比量值复现方法

Fig.4 Auxiliary integrating sphere method for spectral diffuse reflectance scale realization

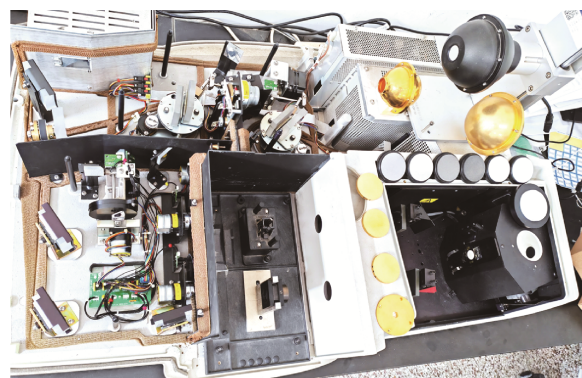


图5 光谱漫反射比量值复现装置

Fig.5 Facility for spectral diffuse reflectance scale realization

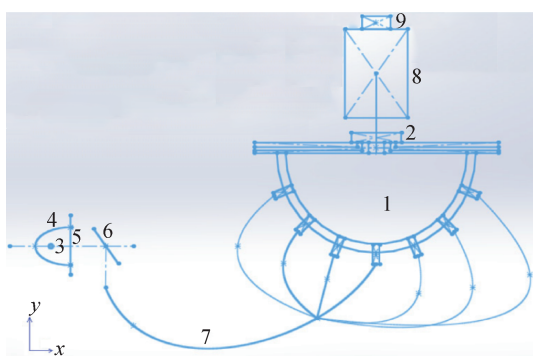
表6 摄影密度测量国家标准

Tab.6 National standards of photography-density measurement

编号	术语或关键条件
GB/T 12823.1 — 2008	第1部分: 术语、符号和表示法
GB/T 11500 — 2008	第2部分: 透视密度的几何条件
GB/T 11501 — 2008	第3部分: 光谱条件
GB/T 12823.4 — 2008	第4部分: 反射密度的几何条件



(a) 漫射光源实物图
(a) Picture of diffuse optical emitter



(b) 原理图
(b) Schematic diagram

注：1-漫射光源；2-被测样品；3-光源；4-离轴椭球反射镜；5-带通滤波光片；6-平面发射镜；7-光纤束；8-光学成像系统；9-探测器。

图6 漫透射视觉密度量值复现原理

Fig.6 Principle of visual diffuse transmission density scale realization

中国计量院参加 COOMET. PR-736/RU/17 反射光学密度国际比对并取得国际等效，并主持了漫透射视觉密度国内计量比对(比对编号：2021-A-02)。

1.3.4 (宽波段连续)波长

在光度和辐射度中，光谱特性测量需要在较宽波段范围内以连续较高精度的波长量值作为基本坐标。可以从若干精准的离散波长基准量值出发，利用具有线性拓展能力的傅里叶变换光谱仪等，实现宽光谱范围内所有波长的连续标定。基于傅里叶变换光谱仪的宽波段连续波长测量原理如图7所示。波长标准器包括适用于有源光谱测量仪器的特征波长滤光片、适用于无源光谱测量仪器的特征波长标准灯、适用于光纤通信光谱测量仪器的光纤波长标准器等。波长标准器如图8所示^[12]。中国计量院参加了 COOMET. PR-689/RU/16 国际比对，并取得了等效和国际互认。

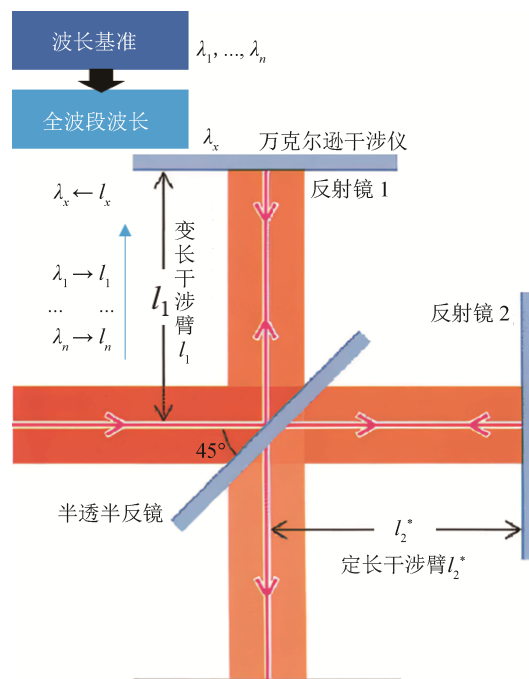
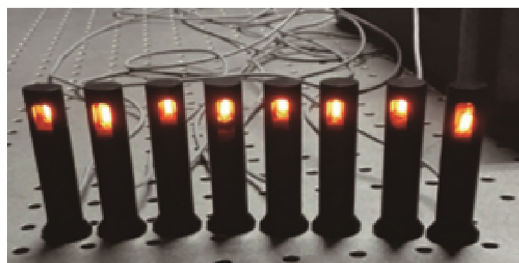


图7 基于傅里叶变换光谱仪的宽波段连续波长测量原理

Fig.7 Principle of broadband continuous wavelength measurement based on Fourier transform spectrometer



(a) 标准波长滤光片
(a) Reference wavelength filter



(b) 标准谱线灯
(b) Standard spectral-line lamp



(c) 光纤耦合波长标准器
(c) Fiber-coupled wavelength etalon

图8 波长标准器

Fig.8 Wavelength standards

1.3.5 双向反射分布函数

BRDF是光辐射从空间各个方向入射到材料表面产生反射时,空间各个方向上的光谱辐射亮度与有效入射光谱辐射照度的比值。中国计量院研制的BRDF测量装置如图9所示,在早期的多维空间扫描结构的基础上进行了控制精度提升,采用宽波段超连续激光器和量子级联激光器将波段范围扩展至覆盖紫外至中红外,其中主要波段的校准和测量能力已通过国际同行评审^[13]。

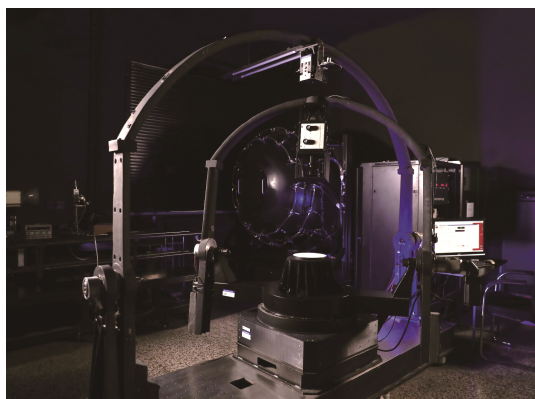


图9 BRDF测量装置

Fig.9 Facility for BRDF measurement

1.3.6 逆反射系数

逆反射系数定义为材料表面的逆反射光强度系数除以被照面积。而逆反射光强度系数为材料在观测方向的反射光强度除以入射的有效光照度。中国计量院基于照度法研究建立的逆反射系数测量标准装置如图10所示。

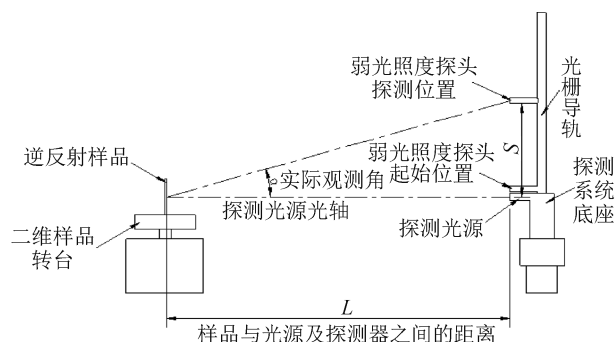


图10 逆反射系数测量装置

Fig.10 Facility for retroreflectance measurement

此逆反射系数测量装置的量程范围覆盖 $0.05 \sim 1\,999.00 \text{ cd} \cdot \text{lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 测量相对不确定度 ($k=2$) 为 $3.0\% \sim 8.2\%$ ^[14], 为我国逆反射材料逆反射系数

的量值统一提供了重要支撑。中国计量院主持了逆反射系数国内计量比对(比对编号: 2022-B-05), 目前正在筹备国际同行评审。

1.3.7 雾度

雾度定义为材料的漫透射比与其总透射比(规则透射比与漫透射比之和)的比值乘以100。国际上现行的雾度测量相关标准, 主要有 ASTM D 1003 标准和 ISO 14782 标准。我国现行的 GB/T 2410-2008《透明塑料透光率和雾度的测定》由 ASTM D 1003 标准修改而来。中国计量院研究建立的雾度测量装置如图11所示。中国计量院两次参与完成 APMP. PR-P3 和 P3.1 雾度国际比对, 取得国际等效, 雾度校准和测量能力已经通过了国际同行评审, 并获得国际互认^[15]。

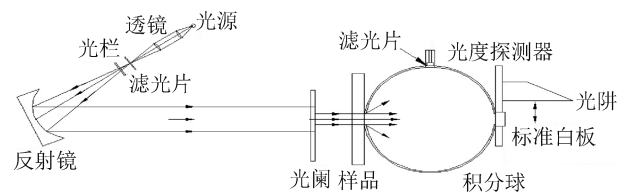


图11 雾度测量装置

Fig.11 Facility for haze measurement

1.3.8 光谱发射率

光谱发射率是材料各个波长上发射能量与相同温度理想黑体(普朗克辐射体)发射能量的比值。其可以采用辐射法测量材料各个方向的光谱辐射亮度, 然后计算与理想黑体在同等条件下的光谱辐射亮度的比值获得; 也可以采用反射法测量材料对各个方向入射光的光谱吸收比, 然后根据基尔霍夫热辐射定律(热平衡条件下光谱发射率等于光谱吸收比)计算获得。光谱法向发射率测量装置如图12所示。当采用辐射法直接测量时, 发射产生的光谱辐射亮度应远大于反射产生的光谱辐射亮度(例如: ①发射率差异不大时, 材料温度远高于环境温度; ②材料与环境温度接近时, 发射率非常接近1而反射率几乎为0), 否则需要改变条件进行多次测量, 并分别解耦得到发射和反射产生的光谱辐射亮度。中国计量院建立了基于辐射法和反射法的光谱法向发射率测量装置, 重点解决了 $2 \sim 16 \mu\text{m}$ 波长面源黑体和高发射率材料的计量和测试需求; 并在中红外波段 BRDF 测量装置的基础上扩展光谱半球发射率校准和测量能力^[16-19]。

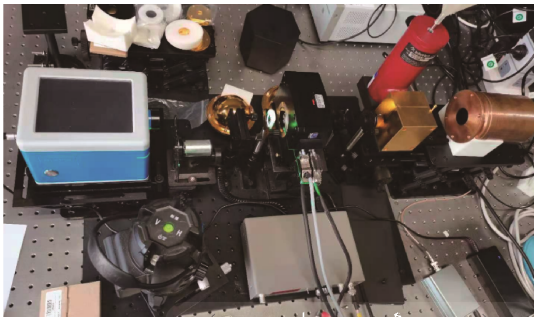


图 12 光谱法向发射率测量装置
Fig.12 Facility for spectral normal emissivity measurement

1.4 计量体系

近年来，中国计量院牵头建立了“光谱规则透射比基准装置”等国家计量基准4项、“光谱光度滤光器检定装置”等社会公用标准5项(如表7所示)，编制了“漫反射测量光谱仪校准规范”等18项^[20-37]、立项编制“双向反射分布函数(BRDF)测量仪校准规范”等5项计量技术规范(如表8所示)，建成了紫外、可见至红外波段以光谱规则透射比和光谱漫反射比为关键代表的材料光学特性计量标准与量值溯源体系。

表 7 材料光学特性测量国家基准和社会公用标准
Tab.7 National primary standards and public standards for measuring optical properties of materials

批准编号	装置名称
国基证[2023]第086号	色度基准装置
国基证[2021]第087号	漫透射视觉密度基准装置
国基证[2023]第166号	250 nm ~ 16 μm 光谱漫反射比副基准装置
国基证[2023]第169号	光谱规则透射比基准装置
[2008]国量标计证字第086号	雾度标准装置
[2012]国量标计证字第246号	中红外规则透射比标准装置
[2015]国量标计证字第288号	逆反射系数测量校准装置
[2021]国量标计证字第390号	反射式烟度标准装置
[2024]国量标计证字第487号	光谱光度滤光器检定装置

2 无色光学玻璃材料光学特性测试

计量与测试密不可分：计量侧重于保障测量仪器性能的准确、稳定、可靠，而测试侧重于拓展测量仪器在时空频谱维度上和复杂极端条件下

表 8 材料光学特性国家计量技术规范
Tab.8 National metrology specifications for optical properties of materials

编号	关键计量器具或参数
JJG 452 — 2021	黑白密度片检定规程
JJG 512 — 2021	白度计检定规程
JJG 920 — 2017	漫透射视觉密度计检定规程
JJG 981 — 2014	阿贝折射仪标准块检定规程
JJG 1034 — 2008	光谱光度计标准滤光器
JJG 1035 — 2022	通信用光谱分析仪
JJF 1303 — 2011	雾度计校准规范
JJF 1456 — 2014	通信用光偏振度测试仪校准规范
JJF 1497 — 2014	偏光仪校准规范
JJF 1546 — 2015	逆反射标准板校准规范
JJF 1601 — 2016	漫反射测量光谱仪校准规范
JJF 1603 — 2016	0.1 ~ 2.5 THz 太赫兹光谱仪校准规范
JJF 1705 — 2019	红外标准滤光器校准规范
JJF 1804 — 2020	布拉格光纤光栅传感网络分析仪校准规范
JJF 1814 — 2020	雾度片校准规范
JJF 1932 — 2021	椭偏仪校准规范
JJG 2028 — 2021	漫透射视觉密度(黑白密度)计量器具检定系统表
JJG 2029 — 2006	色度计量器具检定系统表(修订中)
制定中	光谱规则透射比计量器具检定系统表
制定中	250 ~ 16 μm 光谱漫反射比计量器具检定系统表
制定中	材料红外半球发射率测量仪校准规范
制定中	双向反射分布函数(BRDF)测量仪校准规范
制定中	光谱逆反射标准器校准规范

的功能。例如，光学材料具有不同的组成、多样的形态、广泛的用途，需要建立全面的测试技术体系，支撑各种高性能材料的研发和应用。本文以无色光学玻璃为例进行介绍，常见的无色光学

玻璃类型有200多种,根据基本类型可分为环境友好无色光学玻璃、低软化点光学玻璃、传统含铅光学玻璃以及耐辐射玻璃等,根据产品阶段可分为玻璃坯料、压型坯料、切割件、光学预制件、光学元件等。无色光学玻璃的应用涉及消费电子产品、天文学、生物学、医学以及航空航天等领域。典型光学玻璃的折射率和色散系数如图13所示。

无色玻璃的关键光学性能包括折射率、色散和阿贝数、色散公式(光谱色散函数)、相对部分色散、应力光学系数、内透射比、着色度、折射率温度系数;关键热学性能包括热膨胀系数、转变温度、弛垂温度、应变点、退火点、软化点、热传导系数;关键机械性能包括杨氏模量、剪切模量、泊松比、克氏硬度、磨损度、密度;关键化学性能包括耐潮稳定性、耐酸稳定性、耐水作用稳定性、耐酸作用稳定性、耐候性;其他关键特性还包括耐X射线性能等。

无色玻璃的主要质量指标包括折射率和阿贝数与标准值的允许偏差、光学均匀性、应力双折射(中部应力、边缘应力、粗退火玻璃应力双折射

要求)、条纹度、夹杂物、光吸收系数。

先进的材料光学特性测试能力是确保产品质量数据可靠和改进光学材料性能的基础保障。近年来,成都光明光电股份有限公司(以下简称“成都光明光电”)等单位牵头制定了“无色光学玻璃测试方法:折射率和色散系数”等国家标准23项(其中成都光明光电制定了20项),为全面评价无色光学玻璃的综合特性提供了重要依据。无色光学玻璃测试方法国家标准如表9所示^[38-60]。

成都光明光电在先进材料特性测试技术的支撑下不断进步,实现了低色散高性能磷酸盐光学玻璃等创新产品的研发与应用^[61]。成都光明光电开展了大量基础研究,原创得出最优配方体系,研制产品具有高透过率(吸收率低)、优异的化学稳定性和较低的转变温度;同时研发了先进的专用量产设备并优化了工艺,配合玻璃优异的组成,完美解决了低色散高性能磷酸盐光学玻璃等材料固有的气泡和铂金粒子难以消除的瓶颈问题,实现了玻璃的内在高品质;设计出最优的成型装置并摸索出了最佳的成型工艺,生产良品率达到国

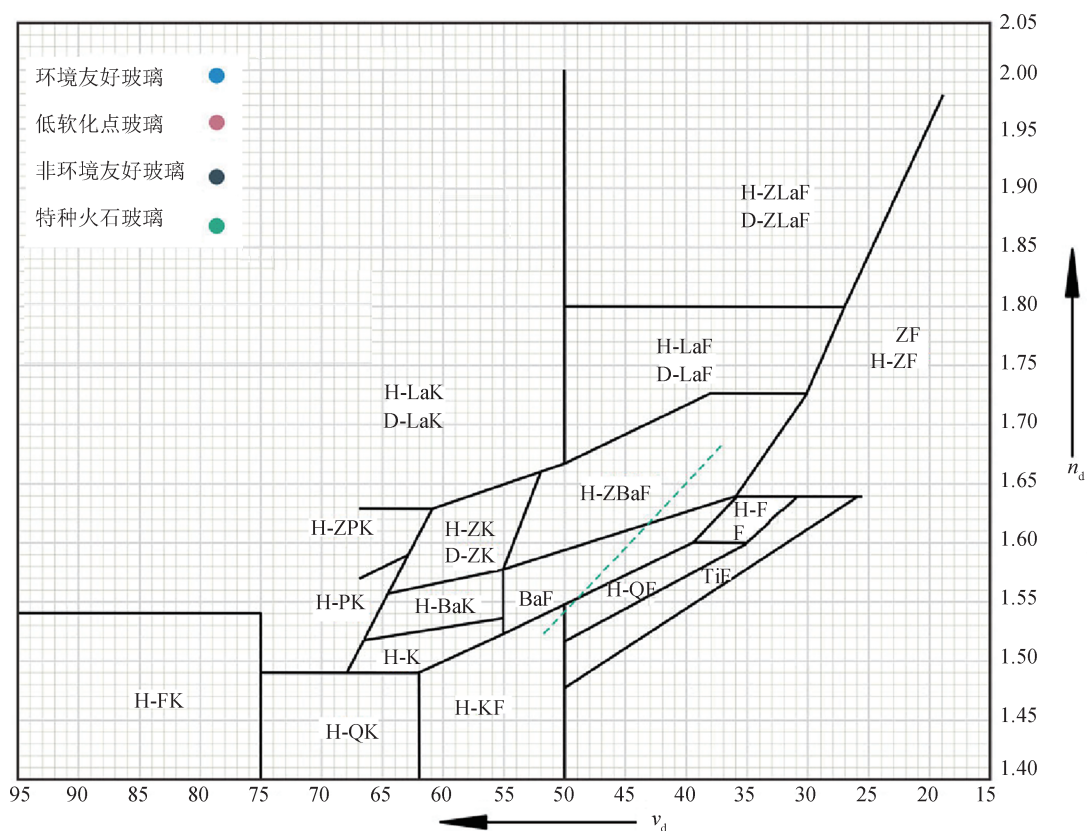


图13 典型光学玻璃的折射率和色散系数

Fig.13 Refractive indices and coefficients of dispersion of typical optical glasses

表9 无色光学玻璃测试方法国家标准
Tab.9 National standards of test methods for
colourless optical glasses

编号	参数或关键特性
GB/T 7962.1 — 2010	折射率和色散系数
GB/T 7962.2 — 2010	光学均匀性 斐索平面干涉法
GB/T 7962.3 — 2010	光学均匀性 全息干涉法
GB/T 7962.4 — 2010	折射率温度系数
GB/T 7962.5 — 2010	应力双折射
GB/T 7962.6 — 2010	杨氏模量、剪切模量及泊松比
GB/T 7962.7 — 1987	条纹度(修订中)
GB/T 7962.8 — 2010	气泡度
GB/T 7962.9 — 2010	光吸收系数
GB/T 7962.10 — 2010	耐X射线性能
GB/T 7962.11 — 2010	可见折射率精密测试
GB/T 7962.12 — 2010	光谱内透射比
GB/T 7962.13 — 1987	导热系数(修订中)
GB/T 7962.14 — 2010	耐酸稳定性
GB/T 7962.15 — 2010	耐潮稳定性
GB/T 7962.16 — 2010	线膨胀系数、转变温度和 弛垂温度
GB/T 7962.17 — 2010	紫外、红外折射率
GB/T 7962.18 — 2010	克氏硬度
GB/T 7962.19 — 2010	磨耗度
GB/T 7962.20 — 2010	密度
GB/T 7962.21 — 2019	耐碱稳定性
GB/T 7962.22 — 2019	耐磷酸稳定性
GB/T 7962.23 — 2019	耐气候稳定性

际先进水平；配套开发了系统化的测试设备和测试方法，提高了特种产品的性能测试能力，保障了高端玻璃产品研发生产能力的自主可控^[62-66]。成都光明光电研制的高透过率产品极大地提高了光学成像系统的清晰度，满足了多领域光学仪器的应用要求；研发的具有优异化学稳定性的产品大幅提升了研抛、镀膜等后工序的良率；研制的低转变温度产品极大地延长了精密模压模具和模层的使用寿命，降低了光学元件精密模压的成本。

2.1 光学特性基本参数测试

无色光学玻璃等材料的光学特性基本参数包括折射率和色散系数^[38, 48, 54]、光吸收系数^[46]和光谱内透射比^[49]。

2.1.1 折射率和色散系数

折射率和色散系数测试采用V棱镜法(如图14所示)^[38]：单色平行光束垂直入射V棱镜，经V棱镜和样品多次折射后，根据出射光线的偏折角度可计算得到被测样品的折射率以及色散系数。

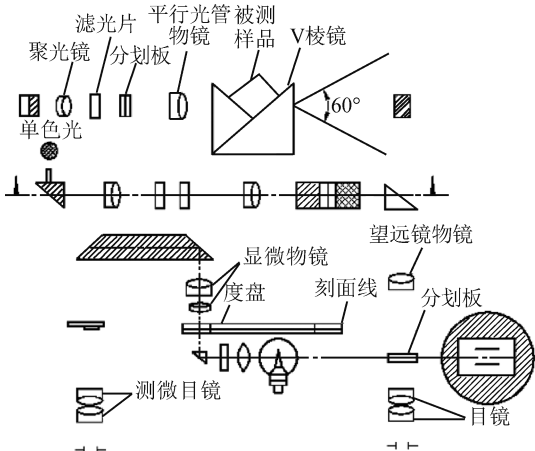


图14 光学玻璃折射率和色散系数测试方法^[38]
Fig.14 Test method for refractive index and coefficient of dispersion of optical glass^[38]

2.1.2 光吸收系数

光吸收系数定义为白光通过材料中每厘米路程的内透射比的自然对数的负值。测试仪器中，采用色温为2 860 K的6 V、15 W白炽灯作为光源，采用硅光电池作为探测器。以一套透射比标称值分别为0.50~0.90的标准中性暗色滤光片作为参考，检验测试仪器的线性，获得被测样品的透射比，之后计算得到光吸收系数。光学玻璃光吸收系数测试方法如图15所示^[46]。

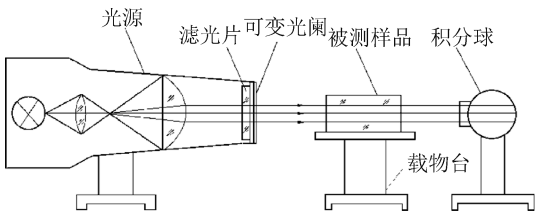


图15 光学玻璃光吸收系数测试方法^[46]
Fig.15 Test method for coefficient of optical absorption of optical glass^[46]

2.2 光学特性空间分布特性参数测试

无色玻璃等材料光学特性空间分布特性参数包括光学均匀性^[39-40]、条纹度^[44]和气泡度^[45]。

2.2.1 光学均匀性

光学均匀性是指同块样品中各点折射率相对于样品平均折射率的最大正、负偏差,可以采用斐索平面干涉仪进行测试(如图16所示),将被测样品放置在干涉仪的测试光路中,根据干涉仪条

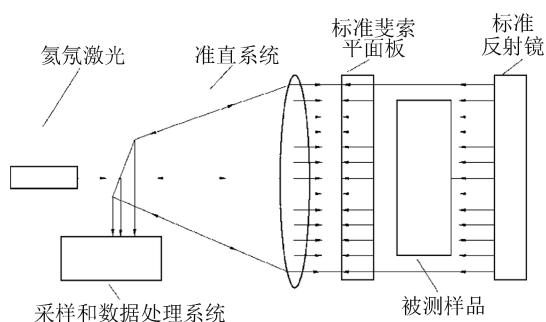


图16 基于斐索平面干涉法的光学玻璃光学均匀性测试方法^[39]

Fig.16 Test method for optical homogeneity of optical glass based on Fizeau plano-interferometry^[39]

纹的变化,计算等效折射率偏差^[39];也可以采用全息干涉法进行测试(如图17所示),记录放入被测样品前、后的干涉全息图,干涉全息图包含振幅和相位信息,并可进行测试结果的再现^[40]。

2.2.2 气泡度

气泡度是指每100 cm³材料中所含气泡、结石等夹杂物的程度,包括夹杂物的直径大小和总截面积。具体测试方法为:采用光线从侧面照射被测样品,以黑色屏幕作为背景,根据材料中气泡、结石等夹杂物对光的反射和散射情况,对夹杂物的直径大小和总截面积进行观测(如图18所示)^[45]。以气泡直径0.03~2.0 mm的标准气泡样品作为参考依据。

2.3 其他特性的光学测试方法

无色光学玻璃等材料的非光学特性,例如应力双折射等,也可以采用光学方法进行测试。测试应力双折射时,光线经过准直、起偏后通过被测样品,然后经过四分之一波片并检偏,根据偏振方向的变化计算得到双折射光程差。光学玻璃应力双折射测试方法如图19所示^[42]。

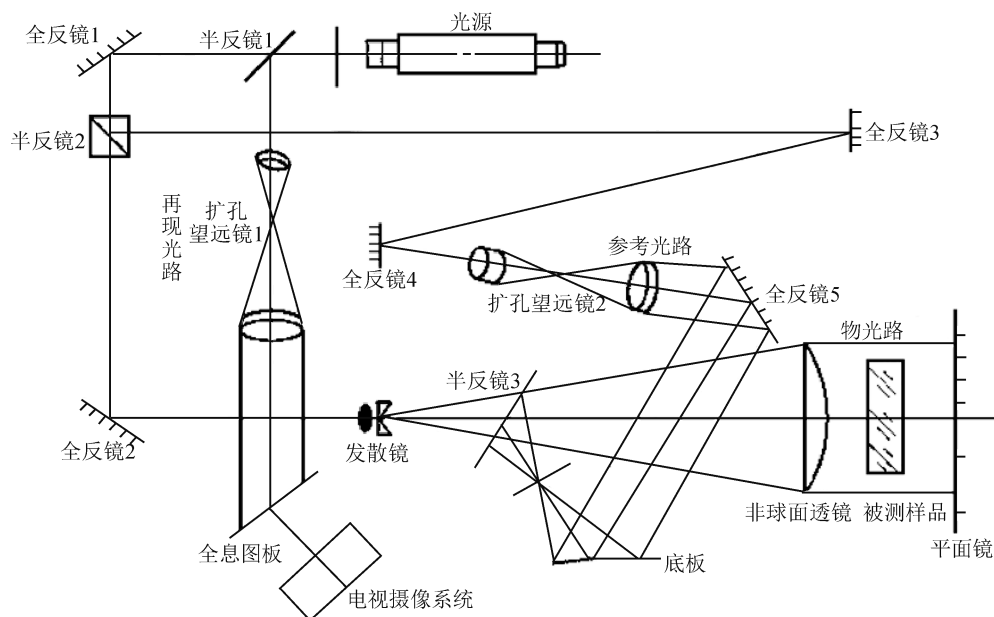


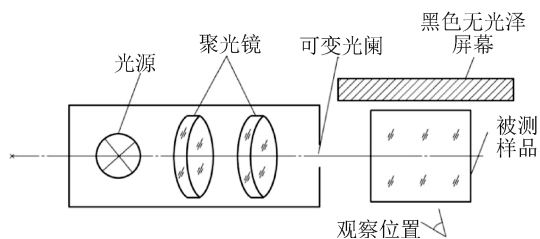
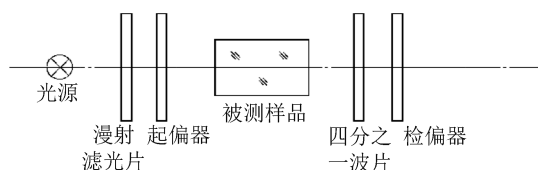
图17 基于全息干涉法的光学玻璃光学均匀性测试方法^[40]

Fig.17 Test method for optical homogeneity of optical glass based on holographic interferometry^[40]

3 展望

随着科技的不断进步,精准可靠的材料光学特性计量技术不仅为光辐射能源有效调控和利用

提供了重要依据,而且为构建数字世界、实现智能感知、拓展虚实交互提供了有力支撑。先进、全面的材料光学特性计量测试技术将持续发挥关键作用。科研机构 and 科技企业正在不懈努力,不

图 18 光学玻璃气泡度测试方法^[45]Fig.18 Test method for stress birefringence of optical glass^[45]图 19 光学玻璃应力双折射测试方法^[42]Fig.19 Test method for stress birefringence of optical glass^[42]

断提高材料光学特性基本参数计量测试技术精度、光学材料加工工艺水平以及产品性能，不断拓展材料光学特性的测量波段范围，发现已知材料的

新功能，并研制具有优异功能的新材料，深入研究强激光、单光子、超高温、极低温等极限条件下的材料光学特性计量测试技术，深入探索时间、空间、频谱维度上光与物质相互作用的监测、表征和分析方法，创新突破针对复杂环境目标特性的精准测量、高效感知、数字重构、智能决策、人机交互能力。未来从技术基础、量程范围、物理内涵3个方面入手，有望进一步提升材料光学特性计量测试能力水平。

3.1 技术基础稳步增强

多种激光光源被逐步应用于材料光学特性测量装置中。中国计量院基于钛蓝宝石激光器并结合光学参量振荡、二倍频、三倍频以及3+1合频技术，实现了190~4 000 nm波段范围内波长连续可调谐，最低功率输出大于8.5 mW(连续可调谐激光装置的激光功率特性如图20所示)^[67]。基于量子级联激光器实现了多个特性参数7.4~10.6 μm的校准和测量能力。

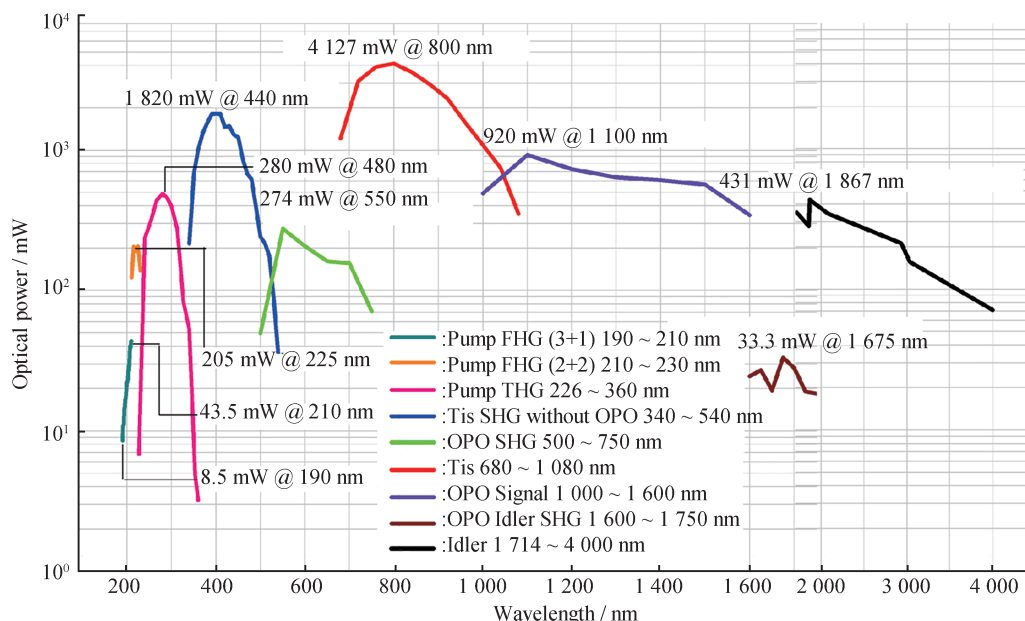


图 20 中国计量院连续可调谐激光装置的激光功率特性

Fig.20 Optical power of NIM's continuously tunable laser system in a wide spectral range

单光子探测器也被逐步应用于材料光学特性测量装置中^[68-69]。基于光电倍增管、硅雪崩光电二极管、超导纳米线的单光子探测系统在270~5 000 nm波段的量子效率均已超过10%，显著地提高了微弱信号的测量极限。中国计量院单光子探

测系统的量子效率水平如图21所示。

3.2 量程范围持续拓展

结合激光和单光子探测技术，可拓展基于灯+分光系统和光电探测器的传统测量系统的量程范围，实现光谱规则透射比、光谱漫反射比等特性

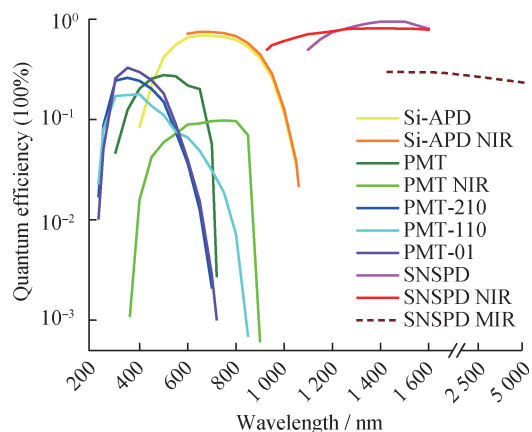


图21 中国计量院单光子探测系统的量子效率水平

Fig.21 Quantum efficiency of NIM's single-photon detectors

参数超低量程校准和测量能力,对于超黑遮光材料、超距激光雷达的研制和应用起到重要支撑作用。

基于光腔衰荡技术,可实现超高量值(接近100%)光谱规则反射比和光谱规则透射比的精准测量能力,为超高光学反射镜的加工以及器件在光压等前沿领域的有效应用提供了可靠测试依据。

在中远红外(太赫兹)波段,可通过太赫兹时域光谱仪测量材料光学特性。在真空紫外和极紫外波段,则可基于同步辐射源研发覆盖完整波段范围的计量测试装置。

3.3 物理内涵不断深入

精准测量得到材料光学特性数据对于深入理解光和物质相互作用的机理具有重要意义,并有望更深层次地揭示物质的基本属性。随着光辐射功率密集度、温度、压力等测试条件的改变,量化表征得到的材料光学特性的差异也可能有助于反映材料性能与成分之间的内在联系。例如,极低温无液氦制冷机的研发利用使材料光学特性的温度测量条件从常温一直延伸到几十mK;双光子荧光显微光谱仪、激光诱导击穿光谱仪等仪器充分发挥了激光能量密度集中、相干性好等优点,能通过不同激励方式产生量子跃迁和弛豫并进行观测和分析。

4 结论

经过持续努力,我国材料光学特性计量测试技术能力和水平得到了显著提升,取得了突出的

成果并产生了重要影响。形成的国际互认校准和测量能力、国家计量标准、计量技术规范、测试国家标准为高品质光学材料、高精度材料光学特性测量仪器的研发与应用提供了坚实的保障,促进了国家光学材料产业的高质量发展。针对未来光学材料的智能制造和前沿应用需求,中国计量院、成都光明光电等科研机构和企业将不懈努力创新,进一步提升关键计量测试技术能力水平。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 光学辐射计量名词术语及定义: JJG 1032 — 2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Terminology and definitions for optical radiation measurements: JJG 1032 — 2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005. (in Chinese)
- [2] 甘海勇, 殷聪, 吕亮, 等. 光辐射计量基标准研究[J]. 科技成果管理与研究, 2022, 17(5): 55-57.
GAN H Y, YIN C, LV L, et al. Research on the primary standards for radiometric measurement [J]. Management and Research on Scientific & Technological Achievements, 2022, 17(5): 55-57. (in Chinese)
- [3] COOKSEY C, TOMAN B. Report on the SIM photometry and radiometry key comparison of spectral regular transmittance (SIM. PR-K6. 2010)[J]. Metrologia, 2021, 58(1A). DOI: 10.1088/0026-1394/58/1a/02004.
- [4] 冯国进, 张巧香, 郑春弟, 等. 紫外规则透射比国际比对[J]. 计量学报, 2024, 45(8): 1103-1107.
FENG G J, ZHANG Q X, ZHENG C D, et al. The comparison of ultraviolet regular transmittance [J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(8): 1103-1107. (in Chinese)
- [5] 冯国进, 马宇轩, 梁凤臣, 等. 中红外光谱透射比标准物质研制[J]. 化学分析计量, 2020, 29(1): 1-3.
FENG G J, MA Y X, LIANG F C, et al. Preparation of mid-infrared transmittance standard reference materials [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2020, 29(1): 1-3. (in Chinese)
- [6] 马宇轩, 冯国进, 孙若端, 等. 材料漫反射比测量研究综述[J]. 照明工程学报, 2020, 31(2): 20-23.
MA Y X, FENG G J, SUN R R, et al. Review of diffuse reflectance measurement of material [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, 31(2): 20-23. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 摄影密

- 度测量 第1部分: 术语、符号和表示法: GB/T 12823.1 — 2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Photography — density measurement — part 1: terms, symbols and notations: GB/T 12823.1 — 2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 摄影密度测量 第2部分: 透视密度的几何条件: GB/T 11500 — 2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Photography — density measurement — part 2: geometric conditions for transmission density: GB/T 11500 — 2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 摄影密度测量 第3部分: 光谱条件: GB/T 11501 — 2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Photography — density measurement — part 3: spectral conditions: GB/T 11501 — 2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 摄影密度测量 第4部分: 反射密度的几何条件: GB/T 12823.4 — 2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Photography — density measurement — part 4: geometric conditions for reflection: GB/T 12823.4 — 2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [11] LIU Z, LI Y, JIANG Y, et al. A new diffuse optics emitter for high visual diffuse transmission density measurement [J]. Applied Sciences, 2019, 9 (14). DOI: 10.3390/app9142774.
- [12] 冯国进, 马宇轩, 梁凤臣, 等. 聚苯乙烯红外波长标准物质的研制[J]. 计量技术, 2019, 42(12): 3–5, 10.
- FENG G J, MA Y X, LIANG F C, et al. Preparation of infrared wavelength reference material based on polystyrene[J]. Measurement Technique, 2019, 42(12): 3–5, 10. (in Chinese)
- [13] WU H, FENG G, ZHENG C, et al. Study of space spectral characteristics of the BRDF diffuse standard plate in visible and infrared bands[C]// Proc. SPIE 9677, AOPC 2015: Optical Test, Measurement, and Equipment, 96772A, 2015.
- [14] 郑春弟, 冯国进, 梁凤臣, 等. 逆反射系数测量标准装置的建立[J]. 计量学报, 2021, 42(1): 16–19.
- ZHENG C D, FENG G J, LIANG F C, et al. Establishment on standard device for measuring retroreflection coefficient [J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(1): 16–19. (in Chinese)
- [15] LIU W, HWANG J, KOO A, et al. APMP pilot study on transmittance haze [C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018, 972(1). DOI: 10.1088/1742-6596/972/1/012023.
- [16] 马宇轩, 冯国进. 常温黑体光谱发射率校准技术研究[J]. 计量学报, 2022, 43(9): 1161–1165.
- MA Y X, FENG G J. Research on calibration technology of spectral emissivity of blackbody at normal temperature [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(9): 1161–1165. (in Chinese)
- [17] 马宇轩, 冯国进, 刘子龙, 等. 表面微结构对平面黑体反射比的影响研究[J]. 应用光学, 2020, 41(5): 1014–1019.
- MA Y X, FENG G J, LIU Z L, et al. Research on influence of surface microstructure on plane blackbody reflectance [J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(5): 1014–1019. (in Chinese)
- [18] 马宇轩, 冯国进. 宽光谱超黑光吸收腔的结构设计[J]. 计量技术, 2020, 43(5): 85–88.
- MA Y X, FENG G J. Design of cavity structure for ultra-black wide spectral light absorption [J]. Measurement Technique, 2020, 43(5): 85–88. (in Chinese)
- [19] 冯国进, 吴志峰, 郑春弟. 高稳定度红外平面黑体辐射源的研制[J]. 计量学报, 2023, 44(8): 1176–1181.
- FENG G J, WU Z F, ZHENG C D. Researches on high stability infrared planar blackbody radiation source [J]. Acta Metrologica Sinica, 2023, 44(8): 1176–1181. (in Chinese)
- [20] 国家市场监督管理总局. 黑白密度片检定规程: JJG 452 — 2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation. Verification regulation of optical step tablet: JJG 452 — 2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [21] 国家市场监督管理总局. 白度计检定规程: JJG 512 — 2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation. Verification regulation of whiteness meters: JJG 512 — 2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

- [22] 国家质量监督检验检疫总局. 漫透射视觉密度计检定规程: JJG 920 — 2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Verification regulation of diffuse transmission visual densitometers: JJG 920 — 2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [23] 国家质量监督检验检疫总局. 阿贝折射仪标准块检定规程: JJG 981 — 2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Verification regulation of standard blocks for abbe refractometers: JJG 981 — 2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [24] 国家质量监督检验检疫总局. 光谱光度计标准滤光器检定规程: JJG 1034 — 2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Verification regulation of reference filter for calibration spectrophotometer: JJG 1034 — 2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [25] 国家市场监督管理总局. 通信用光谱分析仪检定规程: JJG 1035 — 2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- State Administration for Market Regulation. Verification Regulation of optical spectrum analyzers in telecommunication: JJG 1035 — 2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022. (in Chinese)
- [26] 国家质量监督检验检疫总局. 雾度计校准规范: JJF 1303 — 2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for hazemeter: JJF 1303 — 2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (in Chinese)
- [27] 国家质量监督检验检疫总局. 通信用光偏振度测试仪校准规范: JJF 1456 — 2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for optical degree of polarization meter for telecommunications: JJF 1456 — 2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [28] 国家质量监督检验检疫总局. 偏光仪校准规范: JJF 1497 — 2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for polarimeters: JJF 1497 — 2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [29] 国家质量监督检验检疫总局. 逆反射标准板校准规范: JJF 1546 — 2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for retroreflective standard plates: JJF 1546 — 2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [30] 国家质量监督检验检疫总局. 漫反射测量光谱仪校准规范: JJF 1601 — 2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for spectrophotometers for diffuse reflectance measurement: JJF 1601 — 2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [31] 国家质量监督检验检疫总局. (0.1 ~ 2.5) THz 太赫兹光谱仪校准规范: JJF 1603 — 2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for (0.1 ~ 2.5) THz terahertz spectrometers: JJF 1603 — 2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)
- [32] 国家质量监督检验检疫总局. 红外标准滤光器校准规范: JJF 1750 — 2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Calibration specification for infrared standard filter: JJF 1750 — 2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [33] 国家市场监督管理总局. 布拉格光纤光栅传感网络分析仪校准规范: JJF 1804 — 2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation. Calibration specification for optical fiber Bragg grating sensor network analyzers: JJF 1804 — 2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [34] 国家市场监督管理总局. 雾度片校准规范: JJF 1814 — 2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation. Calibration specification for haze tablets: JJF 1814 — 2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)

- [35] 国家市场监督管理总局. 椭圆仪校准规范: JJF 1932 — 2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation. Calibration specification for ellipsometers: JJF 1932 — 2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [36] 国家市场监督管理总局. 漫透射视觉密度(黑白密度)计量器具检定系统表: JJG 2028 — 2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation. Verification scheme of measuring instruments for diffuse transmission visual density (black and white density): JJG 2028 — 2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [37] 国家质量监督检验检疫总局. 色度计量器具检定系统表: JJG 2029 — 2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Verification scheme of measuring instruments for diffuse transmission visual density (black and white density): JJG 2029 — 2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)
- [38] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第1部分: 折射率和色散系数: GB/T 7962.1 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 1: refractive index and coefficient of dispersion: GB/T 7962.1 — 2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [39] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第2部分: 光学均匀性 斐索平面干涉法: GB/T 7962.2 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 2: optical homogeneity — Fizeau plano-interferometry: GB/T 7962.2 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [40] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第3部分: 光学均匀性 全息干涉法: GB/T 7962.3 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 3: optical homogeneity — holographic interferometry: GB/T 7962.3 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [41] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第4部分: 折射率温度系数: GB/T 7962.4 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 4: temperature coefficient of refractive index: GB/T 7962.4 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [42] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第5部分: 应力双折射: GB/T 7962.5 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 5: stress birefringence: GB/T 7962.5 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [43] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第6部分: 杨氏模量、剪切模量及泊松比: GB/T 7962.6 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 6: Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio: GB/T 7962.6 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [44] 国家标准局. 无色光学玻璃测试方法 条纹度检测方法: GB/T 7962.7 — 1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
National Bureau of Standards. Colourless optical glass test methods — examination method for extent of stria: GB/T 7962.7 — 1987[S]. Beijing: Standards Press of China, 1987. (in Chinese)
- [45] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第8部分: 气泡度: GB/T 7962.8 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 8: bubble: GB/T 7962.8 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [46] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第9部分: 光吸收系数: GB/T 7962.9 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 9: light absorption coefficient: GB/T 7962.9 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)

- 9—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 9: coefficient of optical absorption: GB/T 7962. 9 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [47] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第10部分: 耐X射线性能: GB/T 7962. 10 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 10: X-rays stability: GB/T 7962. 10 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [48] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第11部分: 可见折射率精密测试: GB/T 7962. 11 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test method for colourless optical glass — part 11: precise test method for refractive index in the visible wave band: GB/T 7962. 11 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [49] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第12部分: 光谱内透射比: GB/T 7962. 12 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 12: spectral internal transmittance: GB/T 7962. 12 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [50] 国家标准局. 无色光学玻璃测试方法 导热系数测试方法: GB/T 7962. 13 — 1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- National Bureau of Standards. Colourless optical glass test methods — coefficient of thermal conductivity: GB/T 7962. 13 — 1987[S]. Beijing: Standards Press of China, 1987. (in Chinese)
- [51] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第14部分: 耐酸稳定性: GB/T 7962. 14 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 14: resistance to acid: GB/T 7962. 14 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [52] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第15部分: 耐潮稳定性: GB/T 7962. 15 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 15: resistance to humidity: GB/T 7962. 15 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [53] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第16部分: 线膨胀系数、转变温度和弛垂温度: GB/T 7962. 16 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 16: linear thermal expansion coefficient, transformation temperature and yield point temperature: GB/T 7962. 16 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [54] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第17部分: 紫外、红外折射率: GB/T 7962. 17 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Colourless optical glass test methods — part 17: autocollimation test method for refractive index in the ultraviolet and infrared wave band: GB/T 7962. 17 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [55] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第18部分: 克氏硬度: GB/T 7962. 18 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 18: Knoop hardness: GB/T 7962. 18 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [56] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第19部分: 磨耗度: GB/T 7962. 19 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 19: abrasion factor: GB/T 7962. 19 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [57] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 无色光学玻璃测试方法 第20部分: 密度: GB/T 7962. 20 — 2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection

- and Quarantine of the People's Republic of China. Test methods of colourless optical glass — part 20: density: GB/T 7962. 20 — 2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [58] 国家市场监督管理总局. 无色光学玻璃测试方法 第21部分:耐碱稳定性:GB/T 7962. 21 — 2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation. Test method of colourless optical glass — part 21: resistance to attack by aqueous alkaline solutions: GB/T 7962. 21 — 2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [59] 国家市场监督管理总局. 无色光学玻璃测试方法 第22部分:耐磷酸稳定性:GB/T 7962. 22 — 2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation. Test method of colourless optical glass — part 22: resistance to attack by aqueous alkaline phosphate-containing: GB/T 7962. 22 — 2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [60] 国家市场监督管理总局. 无色光学玻璃测试方法 第23部分:耐气候稳定性:GB/T 7962. 23 — 2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation. Test method of colourless optical glass — part 23: resistance to climatic: GB/T 7962. 23 — 2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [61] 成都光明光电股份有限公司. 光学玻璃及光学元件: CN201410033342. 3[P]. 2015-07-29.
- CDGM Glass Co., Ltd. Optical glass and optical element: CN201410033342. 3[P]. 2015-07-29.
- [62] 成都光明光电股份有限公司. 光学玻璃折射率V棱镜测试修正法: CN201310114269. 8[P]. 2015-11-11.
- CDGM Glass Co., Ltd. Correction method for V-prism refractive index test of optical glass: CN201310114269. 8 [P]. 2015-11-11.
- [63] 成都光明光电股份有限公司. 光学玻璃中部色散的测量方法: CN201310056317. 2[P]. 2015-12-02.
- CDGM Glass Co., Ltd. Measurement method for dispersion in the middle of optical glass: CN201310056317. 2 [P]. 2015-12-02.
- [64] 成都光明光电股份有限公司. 光学玻璃预制件的条纹检测装置及其检测方法: CN201510420638. 5 [P]. 2019-04-09.
- CDGM Glass Co., Ltd. Stripe test apparatus and method for optical glass prefabricated parts: CN201510420638. 5 [P]. 2019-04-09.
- [65] 成都光明光电股份有限公司. 1 700 nm ~ 2 500 nm 中部红外折射率的测试方法: CN201610948329. X [P]. 2019-07-30.
- CDGM Glass Co., Ltd. Test method for 1 700 nm ~ 2 500 nm middle - wave infrared: CN201610948329. X [P]. 2019-07-30.
- [66] 成都光明光电股份有限公司. 光学玻璃测量装置及其测量方法: CN201610939532. 0 [P]. 2020-07-28.
- CDGM Glass Co., Ltd. Optical glass measurement apparatus and method: CN201610939532. 0 [P]. 2020-07-28.
- [67] 王卫敏, 赫英威, 徐以诺, 等. 基于可调谐飞秒激光的光学特性测量装置[J]. 应用光学, 2020, 41 (4): 717-722.
- WANG W M, HE Y W, XU Y N, et al. Optical properties measuring device based on tunable femtosecond laser [J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41 (4): 717-722. (in Chinese)
- [68] 甘海勇, 刘想靓, 林延东. 光子计量技术与展望[J]. 计量技术, 2019, 42 (5): 64-67.
- GAN H Y, LIU X L, LIN Y D. Progress and prospect in photon metrology technology [J]. Measurement Technique, 2019, 42 (5): 64-67. (in Chinese)
- [69] 甘海勇, 井绪峰, 徐楠, 等. 单光子计量与微弱光辐射测量标准技术研究[J]. 中国科技成果, 2020, 21 (21): 24-26.
- GAN H Y, JING X F, XU N, et al. Research on single photon metrology and low light measurement standards [J]. China Science and Technology Achievements, 2020, 21 (21): 24-26. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者:甘海勇(1977—),男,研究员,博士,中国计量科学研究院光学所所长,专业方向为光学计量,开展光辐射基准、单光子计量、目标特性精准测量与复杂环境智能感知等关键技术研究。目前担任国际米制公约组织光度与辐射度咨询委员会关键比对工作组主席、全国人工智能计量技术委员会副主任委员、中国光学学会常务理事、中国计量测试学会光辐射专业技术委员会主任委员、2021年国家重点研发计划“人工智能多模态感知关键计量测试技术研究”项目负责人。牵头完成的“光谱光度国家基准关键技术创新与前沿应用”项目于2023年获国家市场监督管理总局第二届“市场监管科研成果奖”一等奖。