

大幅提高视觉密度国家基准测量水平的方法研究*

刘子龙¹⁾²⁾ 陈锐²⁾ 廖宁放¹⁾ 李在清²⁾ 王煜²⁾

1) (北京理工大学, 颜色科学与工程国家专业实验室, 北京 100081)

2) (中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100013)

(2012年4月11日收到; 2012年7月2日收到修改稿)

随着生物医学影像和航天军事测量的发展, 对用于光学成像底片和视觉校正的视觉密度的测量范围和不确定度的要求越来越高. 以自行设计的光纤半球发射器形成的复合漫射器为特征的新方案将视觉漫透射密度国家基准的光源漫射系数提高到 0.945, 比欧美国家基准高 0.02—0.03. 实验得到新基准的测量范围为 0—6.0, 合成不确定度为 0.0015 ($0 < D < 4.5$) 和 0.0054 ($5.0 \leq D < 6.0$), 相比国际先进水平大幅提高. 同时整体结构化的设计可以实现光源组件和探测组件的对调安装, 用实验的方法在国际上首次验证了透射测量亥姆霍兹倒易律的有效性.

关键词: 视觉密度计量, 不确定度, 复合漫射, 亥姆霍兹倒易律

PACS: 06.20.-f, 06.20.Dk, 06.20.fb

1 引言

视觉密度是评价感光材料光学性能的主要物理量, 广泛用于成像底片和视觉校正的各个领域, 例如分子生物学的 DNA 排序影像校正, 医学影像的校正, 工业及航天、军用武器无损检测的标定, 平面艺术及摄影材料的质量控制等. 随着各领域技术的发展, 尤其是生物医学影像和航天军事质检的快速发展, 对视觉密度的测量范围和不确定度的要求越来越高. 已有的国家密度基准的测量水平已经不能满足这些新兴领域的量值测量需求^[1]. 2000年之后 International Standard Organization (ISO) 最终推出了新的视觉密度测量国际标准^[2], 美国、德国等发达国家先后建成了符合新标准规定的密度国家标准, 提升了其测量水平^[3].

为了适应测量需求和新的国际标准, 大幅度提升密度国家基准的测量水平, 需要设计一种全新结构的测量装置. 基于国内外经验, 制约视觉密度测量的瓶颈为光源的漫透射性能^[3,4]. 增强光源的漫透射, 可以提供足够的入射光能量用于测量密度值

较高的材料, 提高测量的动态范围和不确定度. 所以新的密度基准的设计在满足国际标准 ISO5 的基础上, 主要集中在光源的漫透射性能的提高以及以此为硬件基础的测量方法的推导, 前者提高了测量范围, 后者提高了不确定度.

2 新方案的理论分析与测量方法推导

按照国际标准 ISO5, 透射密度 D_T 的定义是透射因数 T_V 的倒数取 10 为底的对数^[5,6], 即

$$D_T = \lg(1/T_V), \quad (1)$$

而透射因数 T_V 的定义是, 透过样品的光通量 ϕ_τ 与照射样品的光通量即光源复合漫射器的光通量 ϕ_i 之比

$$T_V = \phi_\tau / \phi_i, \quad (2)$$

把 (2) 式代入 (1) 式

$$D_T = \lg(\phi_\tau / \phi_i). \quad (3)$$

光源的漫射性能可以用漫射系数 β 进行评估. 光源复合漫射器的漫射系数 β 和光通量 ϕ_i 可以通

* 国家科技支撑计划重点项目 (批准号: 2011BAI02B02) 资助的课题.

† E-mail: liuzl@nim.ac.cn

过漫射器出射面的亮度分布 $L_i(\theta, \phi, \lambda)$ 计算得到.

$$\beta = \frac{\phi_i}{\phi_0} = \frac{\int_{\lambda} \int_{2\pi} A_i L_i(\theta, \varphi, \lambda) \cos \theta d\Omega d\lambda}{\int_{\lambda} \int_{2\pi} A_0 L_0(\theta, \varphi, \lambda) \cos \theta d\Omega d\lambda}, \quad (4)$$

式中 $L_i(\theta, \varphi, \lambda)$ 为漫射器出射面的辐亮度, $L_0(\theta, \varphi, \lambda)$ 为朗伯源的辐亮度, A_i 为漫射器的出射面积, A_0 为朗伯源的出射面积, Ω 为测量立体角, θ 为探测天顶角, φ 为探测方位角. $d\Omega$ 在整个半球空间进行积分, 且 $A_i = A_0$. 朗伯源的辐亮度 $L_0(\Omega)$ 为常数. 在 $\theta = 0$ 归一化, 则 $L_i(\Omega) = L_0(\Omega)$. $L_i(\Omega)$ 绕其法线方向旋转对称, β 可表示为

$$\beta = \frac{\int 2\pi L_i(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int 2\pi L_0(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta} = \frac{\int L_i(\theta) \sin(2\theta) d\theta}{L_0(\theta = 0) \int \sin(2\theta) d\theta}, \quad (5)$$

利用 (5) 式, 可以进行光源复合漫射器的漫射系数 β 的测量, 对其漫射性能进行评估.

光源复合漫射器是在半球空间入射, 在测量组件的探测立体角 Ω_{τ} 范围内探测, 则

$$\phi_i = \int_{\lambda} \int_{\Omega_i} A_i L_i(\theta, \varphi, \lambda) d\Omega d\lambda = K_i I_i, \quad (6)$$

I_i 为测量系统探测器的电流值, K_i 为其线性修正系数.

加装样品之后, 其光通量 ϕ_{τ} 为

$$\phi_{\tau} = \int_{\lambda} \int_{\Omega_{\tau}} A_{\tau} L_{\tau}(\theta, \varphi, \lambda) d\Omega d\lambda = K_{\tau} I_{\tau}. \quad (7)$$

结合 (2), (6) 和 (7) 式得

$$T_V = \frac{\phi_{\tau}}{\phi_i} = \frac{\int_{\lambda} \int_{\Omega_{\tau}} A_{\tau} L_{\tau}(\theta, \varphi, \lambda) d\Omega d\lambda}{\int_{\lambda} \int_{\Omega_i} A_{\tau} L_i(\theta, \varphi, \lambda) d\Omega d\lambda} = \frac{K_{\tau}}{K_i} \cdot \frac{I_{\tau}}{I_i} = K \frac{I_{\tau}}{I_i}, \quad (8)$$

结合 (1) 和 (8) 式得

$$D_T = \lg(1/T_v) = \lg\left(K \frac{I_i}{I_{\tau}}\right). \quad (9)$$

利用 (8) 式, 可以进行互反射因素的评估和调整, 并进行测量结果的不确定度分析, 利用 (9) 式, 可以进行视觉密度的测量和计算.

3 新视觉密度基准的关键设计与实现

3.1 光纤半球发射器 HEOF (hemispherical emitter with optic fiber)

视觉密度的光源的漫透射性能用漫射系数来

表示, 其理想值为 1.0. 已有的国际领先水平为美国国家计量院国家标准语测试技术研究院 (National Institute of Standard and Technology, NIST) 的积分球加乳白玻璃的设计, 其值可以达到 0.91^[7,8]. 这种设计虽然能满足 ISO5 的最新规定, 但对光通量衰减较大, 测量范围受到限制, 有提高的可能. 为了提高光通量并增加漫射性能, 设计了一种光纤半球发射器 (hemispherical emitter with optic fiber, HEOF), 如图 1 所示. 由 216 根光纤固定在直径 20 mm 的铝制套筒内构成通光光路, 其端面形成了漫射照明器的入射窗. 该光纤束的另一端按等立体角的位置分布在半球壁上, 并使每根光纤的端面与球内壁处于同一表面. 由球壁发出的光束照射在该球心上, 经乳白玻璃散射后, 形成接近于理想的余弦辐射源. 加上乳玻后的这一系统, 既符合漫射密度测量的几何条件, 又扩展了密度的测量范围.

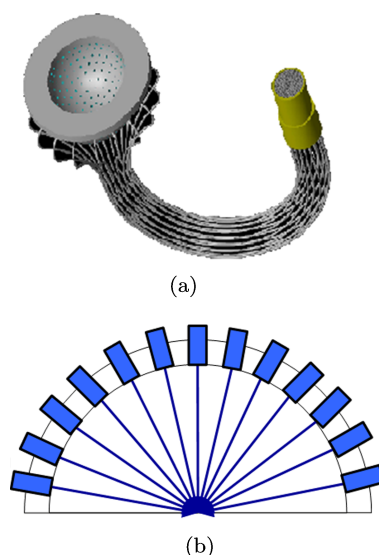


图 1 光纤半球发射器 (a) 三维模拟图; (b) 光路分布示意图 (横截面)

3.2 光源复合漫射器

以 HEOF 为核心构成的光源复合漫射器如图 2 所示. 在 HEOF 的半球出射面覆盖一片乳白玻璃, 乳白玻璃的上表面中心与半球的球心重合. 乳玻的侧面涂有黑漆, 以保证所有通量均来自于限定采样孔的乳玻的上表面. 此外在固定装置上配有气阀吸附系统, 当气阀接通时, 被测样品被真空吸附在乳白玻璃上, 以实现样品与乳白玻璃的密切接触.

以复合漫射器为基础设计的整体测量装置如图 3 所示. 卤钨灯光源经由锥轴椭球反射镜、吸热

玻璃片、转向用平面反射镜和可变光栏,用光纤束引入复合漫射器. 以上部分集成为光源组件,为测量系统提供高能量高漫射系数的入射光. 位于锥轴椭球反射镜第一焦点的灯发出的光束,被锥轴椭球反射镜和吸热玻璃片两次滤除红外辐射,再经平面镜转向90°后,聚焦在可变光栏下方的光纤束入射窗上,光纤束的入射端面位置约为锥轴椭球反射镜的第二焦点.

探测系统收集探测来自乳玻或密度片的辐射通量. 包括了收集透镜、准直透镜和会聚透镜组成的透镜组,加装明视滤光片的硅光二极管探测器. 透镜组全部蒸镀AR14防反膜,大幅度减低反射损失. 明视滤光片与测量光轴成5°安装,以减少光路的互反射影响. 以上部分集成为探测组件.

被测密度片由运动机构控制实现不同密度等

级在乳白玻璃窗口的定位,定位完成后由真空系统吸附在乳白玻璃窗口实现测量.

整体装置的光源组件和探测组件分别为集成化设计,可以在机构上实现二者的对调,进行亥姆霍兹倒易律的实验验证.

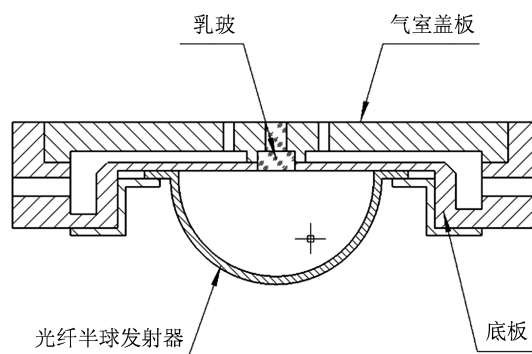


图2 复合漫射器整体设计装置结构

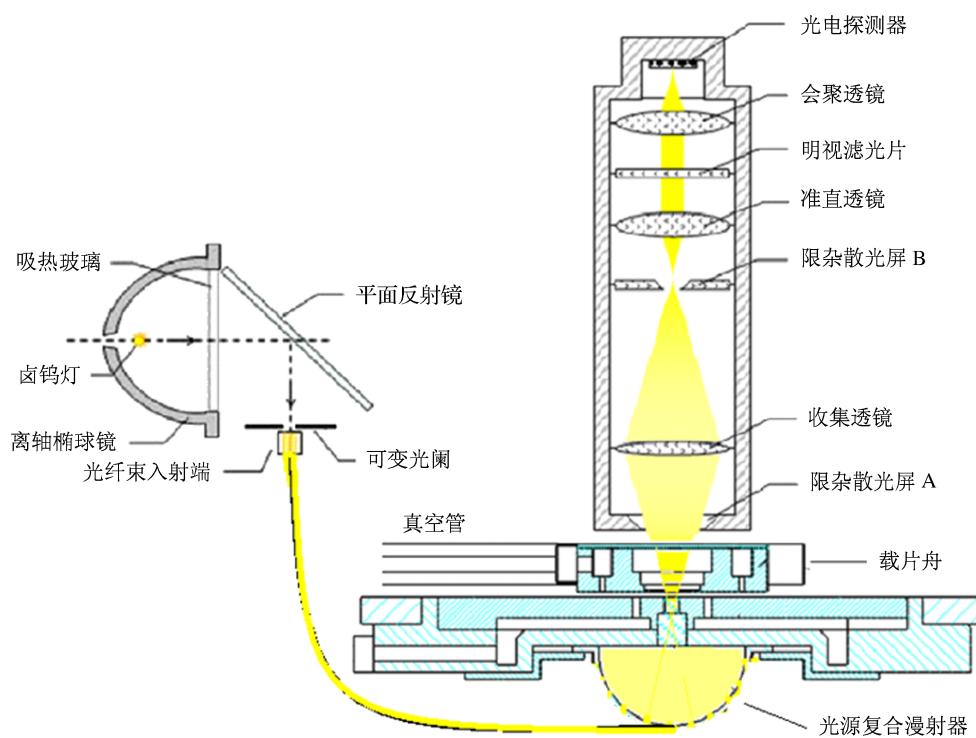


图3 装置整体结构图

4 实验与不确定度分析

4.1 光源复合漫射器的漫射系数 β

在双向透射分布函数 (Bi-directional Transmittance Distribution Function, BTDF) 测量标准装置上对光源复合漫射器出射面的亮度分布进行测量. 测量角度范围为 $\pm 85^\circ$, 角度间隔为 5° . 测量重复性为 $\pm 0.1\%$, 测量结果如图4所示,按照(5)式计算

得 $\beta = 0.945$.

4.2 光源复合漫射器的光谱函数 S_I

光源复合漫射器的光谱函数与光源、锥轴椭球反射镜、吸热玻璃片、光纤束和乳玻窗的光谱特性密切相关. 使用光谱辐射计光源复合漫射器出射面的光谱函数曲线,结果如图5所示. 与ISO规定的光谱函数曲线 S_H 符合.

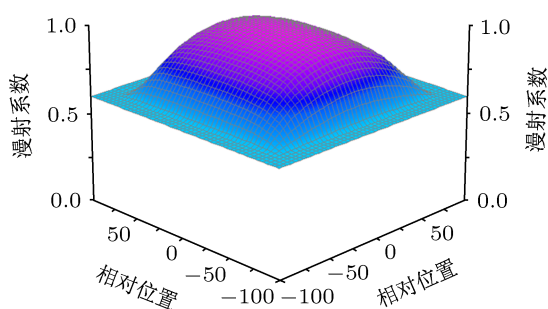


图4 光源复合漫射器的漫射系数 β 分布

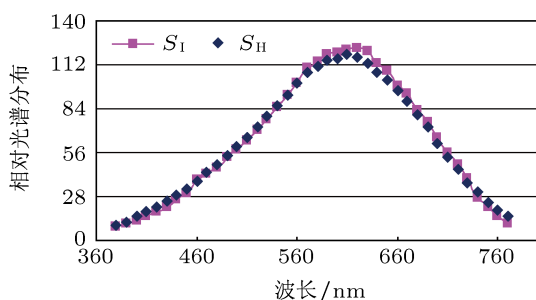


图5 光源复合漫射器的光谱函数曲线

4.3 探测组件的光谱响应 V_I

探测组件的光谱响应包括探测光路的光谱透过率 G_I 和探测器的光谱响应 D_I . 前者由收集/准直/会聚透镜、明视滤光片的光谱透过率构成, 经光谱光度计测量得到. 后者由硅光二极管的光谱响应构成, 经在相应探测器响应标准装置上标定得到. 则

$$V_I = G_I \cdot D_I \quad (10)$$

探测组件的光谱响应 V_I 如图 6 所示.

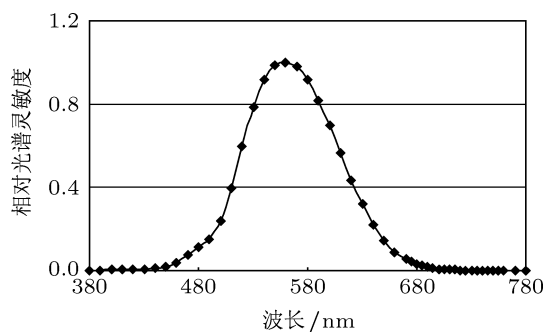


图6 探测组件的光谱响应曲线 V_I

4.4 探测组件的线性

在大密度范围 (0—6) 的测量中, 光探测器与后续放大器组合的光度线性, 对于精密测量结果的准确度会有一定影响. 用双孔径法测得探测系统的光度线性如图 7 所示. 在测量电流信号在 $4 \mu\text{A}$ — 1 pA 范围内线性为 1.002.

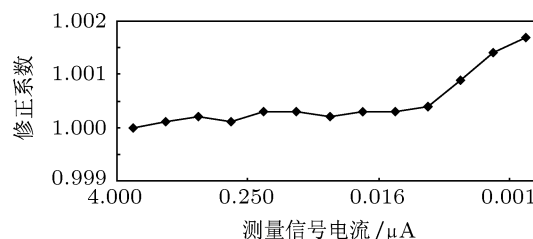


图7 探测组件的光度线性

4.5 新测量装置的不确定度分析

由 (8) 式可以得出, 测量的不确定度受探测器的线性 K 、探测器响应的准确性 $S(I)$ 、光源的光谱特性引入的波长因子 $S(\lambda)$ 、光源复合漫射器的漫射系数 β 和系统的稳定性 $S(L)$ 影响. 其中系统的稳定性包括了光源的发光稳定性、被测样品的定位精度、密度片的均匀性, 探测系统的稳定性等. 所以由 (8), (9) 式得不确定度分析模型为

$$D_T = K \cdot S(I) \cdot S(\lambda) \cdot \beta \cdot S(L). \quad (11)$$

经实验得光源稳定性高优于 0.01% (20 min 内), 接收器经光电屏蔽后信号噪声小于 $1 \times 10^{-12} \text{ A}$ (不同量程有所不同), 系统的定位精度约为 0.1 mm, 综合得标准不确定度

$$u(S(L)) = 0.001, \quad (0 < D < 4.5),$$

$$u(S(L)) = 0.0022, \quad (4.5 \leq D < 5.0),$$

$$u(S(L)) = 0.0052, \quad (5.0 \leq D < 6.0).$$

由 4.1 节数据得漫射系统的漫射系数 $\beta = 0.945$, 其标准不确定度 $u(\beta) = 0.0005$.

由 4.2 节数据计算得光谱函数偏离标准光谱函数^[9]而产生的标准不确定度 $u(S(\lambda)) = 0.0008$.

由 4.3 节数据得探测器响应的标准不确定度 $u(S(I)) = 0.0005$.

由 4.4 节数据得探测系统的线性的标准不确定度 $u(K) = 0.0005$.

不确定度分析数据如表 1 所示.

表 1 系统不确定度分量表

序号	符号	来源	类型	分布	标准不确定度
1	K	探测器非线性	A	正态	0.005
2	$S(I)$	探测器响应	B	均匀	0.005
3	$S(\lambda)$	光谱特性	A	正态	0.008
4	β	漫射系数	A	正态	0.005
					0.001(0 < D < 4.5)
5	$S(L)$	系统稳定性	A	正态	0.0022(4.5 ≤ D < 5.0)
					0.0052(5.0 ≤ D < 6.0)

则合成不确定度为

$$u_c(D_T) = [u^2(K) + u^2(S(I)) + u^2(S(\lambda)) + u^2(\beta) + u^2(S(L))]^{1/2}$$

$$= 0.0015, \quad (0 < D < 4.5),$$

$$u_c(D_T) = 0.0025, \quad (4.5 \leq D < 5.0),$$

$$u_c(D_T) = 0.0054 \quad (5.0 \leq D < 6.0).$$

取扩展因子 $k = 2$, 则视觉密度的扩展不确定度为

$$U(D_T) = 0.003, \quad (0 < D < 4.5),$$

$$U(D_T) = 0.005, \quad (4.5 \leq D < 5.0),$$

$$U(D_T) = 0.011, \quad (5.0 \leq D < 6.0).$$

5 亥姆霍兹倒易律的实验验证

将装置的光源组件和探测组件对调安装, 即将漫射照明 (90° 乳玻)、单向收集 ($\leq 10^\circ$) 的光路颠倒成单向照明 ($\leq 10^\circ$)、漫射收集 (90° 乳玻) 的光路, 实现了将密度测量的几何条件由漫入射模式改变成漫出射模式, 而且由 $u(S(\lambda))$ 的分析可得本装置具有高实验重复性, 因此装置达到了进行亥姆霍兹透射光倒易律实验验证所需的几何条件互易. 透射光倒易律目前没有实验验证结果发表, 仅在 ISO 的国际标准中视作定律而引用^[10,11].

在本装置上进行透射光倒易律实验所测得的漫入射模式与漫出射模式密度的差值如图 8 所示, 在 $0.10 < D < 3.4$ 的密度范围内, 两种模式的测量

值仅相差 $0.003D$. 实验结果表明在两种极端的条件下密度测量值与几何条件无关, 证明了亥姆霍兹透射光倒易定律.

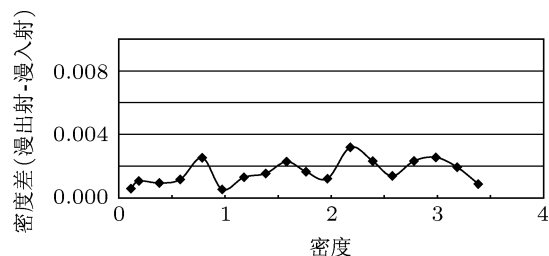


图 8 两种模式下密度差值随密度水平的变化

6 结论

本文采用自行设计的光纤半球发射器形成的复合漫射器为特征的新方案将视觉漫透射密度国家基准的光源漫射系数提高到 0.945, 比欧美国家基准高 0.02—0.03. 实现了符合最新视觉密度测量国际标准 ISO5 的测量装置, 形成宽量程 0—6.0. 其中 5.0—6.0 的新测量能力满足了生物医学影像和航天军事质检的新需求. 另一方面形成了高不确定度的密度测量能力, 实验得到其合成不确定度为 0.0015 ($0 < D < 4.5$) 和 0.0054 ($5.0 \leq D < 6.0$), 大幅提高了国家视觉密度基准测量水平, 相比欧美国家所代表的国际先进水平也有大幅提高. 同时通过该设计和测量方法实验验证了亥姆霍兹透射光倒易定律.

[1] Smetana K, Klamova H, Jiraskova I, Mikulenkov D, Zapotocky M, Hrkal Z 2012 *J. Appl. Biomed.* **10** 103

[2] GB/T 11500-2008/ISO5-2: 2008 (in Chinese) [GB/T 11500-

2008/ISO5-2: 2008]

[3] Early E A, Cromer C L, Xiong X X, Dummer D J, O'Brian T R, Parr A C 1999 *J. Imag. Sci. Technol.* **43** 388

- [4] Chen R, Wang Y 2009 *Metrology Technology* **6** 29 (in Chinese)
[陈锐, 王煜 2009 计量技术 **6** 29]
- [5] GB/T 12823.1-2008/ISO5-1: 2008 (in Chinese) [GB/T 12823.1-2008/ISO5-1: 2008]
- [6] McCamy C S 1966 *Photogr. Sci. Eng.* **10** 314
- [7] Buhr E, Hoeshen D, Bergmann D 1999 *J. Imag. Sci. Technol.* **43** 382
- [8] Buhr E, Bergmann D, Early E A, O'Brian T R 2000 *J. Imag. Sci. Technol.* **44** 156
- [9] GB/T 11501-2008/ISO5-3: 2008 (in Chinese) [GB/T 11501-2008/ISO5-3: 2008]
- [10] Clark F, Parry J J 1985 *J. Lighting Research and Technology* **17** 11
- [11] Buhr E, Hoeshen D, Bergmann D 1995 *J. Imag. Sci. Technol.* **39** 453

Greatly enhanced visual density measurement level of the national standard densitometer*

Liu Zi-Long^{1)2)†} Chen Rui²⁾ Liao Ning-Fang¹⁾ Li Zai-Qing²⁾ Wang Yu²⁾

1) (National Professional Laboratory of Color Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

2) (Optical Division, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

(Received 11 April 2012; revised manuscript received 2 July 2012)

Abstract

The national standard densitometer can be used for calibrating photographic film and visual photo. The development of biomedical image and space technology need large measurement range and high uncertainty of visual density. A newly designed equipment using hemispherical emitter with optic fiber can enhance the diffuse coefficient of the light to 0.945 which is higher than the other national standards (0.02–0.03). Thus the measurement range can be increased to 0–6.0 and the combined uncertainties are 0.0015 ($0 < D < 4.5$) and 0.0054 ($5.0 \leq D < 6.0$). On the other hand, the structure design for the whole equipment can realize the reciprocal fixing between the light module and the detect module. So the validity of Helmholtz reciprocity for transmittance measurement can be examined and proved on this new equipment.

Keywords: visual density metrology, uncertainties, combined diffuse, Helmholtz reciprocity

PACS: 06.20.–f, 06.20.Dk, 06.20.fb

* Project supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2011BAI02B02).

† E-mail: liuzl@nim.ac.cn