

光声光谱仪用三维扩展光源光场整形系统设计实验

邱乙耕 范元媛 颜博霞 王延伟 吴一航 韩哲 亓岩 鲁平

Design and experiment of light field shaping system for three-dimensional extended light source used in photoacoustic spectrometer

Qiu Yi-Geng Fan Yuan-Yuan Yan Bo-Xia Wang Yan-Wei Wu Yi-Hang Han Zhe Qi Yan Lu Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 204201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210691

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210691>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

集成化导光板下表面微棱镜二维分布设计

Two-dimensional distribution design of micro-prism for partial integrated light guide plate

物理学报. 2019, 68(3): 038502 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181684>

一种非对称双面离轴非球面反射镜检测补偿变焦光路设计方法

A method of designing asymmetric double-sided off-axis aspheric mirror detection compensation zoom light path

物理学报. 2019, 68(11): 114201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182253>

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

物理学报. 2020, 69(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>

基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计

Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory

物理学报. 2019, 68(13): 134201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190299>

集成化导光板下表面微棱镜二维分布公式探究

Two-dimensional distribution expressions of micro-prism on bottom surface of partial integrated light guide plate

物理学报. 2019, 68(21): 218501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190854>

微腔效应对顶发射串联蓝光有机电致发光器件性能的影响

Influence of microcavity effect on the performance of top emission tandem blue organic light emitting devices

物理学报. 2020, 69(9): 096104 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191576>

光声光谱仪用三维扩展光源光场整形系统设计实验*

邱乙耕¹⁾²⁾ 范元媛^{1)2)3)†} 颜博霞¹⁾²⁾ 王延伟¹⁾²⁾ 吴一航⁴⁾
韩哲¹⁾²⁾ 亓岩¹⁾²⁾ 鲁平⁴⁾

1) (中国科学院微电子研究所, 光电技术研发中心, 北京 100094)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

4) (华中科技大学光学与电子信息学院, 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 武汉 430074)

(2021 年 4 月 12 日收到; 2021 年 6 月 8 日收到修改稿)

三维非相干扩展光源相比红外激光光源具有功率高、光谱范围宽、价格低等优势, 在高精度、多组分光声光谱仪中具有极高的应用价值. 然而, 其存在方向性差、能量密度低、形状不规则等现实问题, 需要在光学系统设计过程中进行光场整形. 光声光谱仪要求在小体积范围内收集并优化厘米级三维扩展光源向全空间的辐射, 经一系列波长及频率调制元件后, 最终实现毫米级半径、厘米级长度的圆柱体光场分布. 本文根据光学扩展量概念和边缘光线原理, 在光学系统设计与优化的过程中突破传统完全基于点光源的设计模式, 贯穿了扩展光源概念, 基于自行设计的测量方法和装置直接获取了三维扩展光源的发光特性, 并以微元的形式进行精准三维扩展光源建模. 借助非球面实现了光声光谱仪用三维扩展光源光场整形系统的设计并进行了相关实验验证. 以 Hawkeye IR-Si272 光源为例, 分别实现了光声光谱仪光声池入池光功率和侧壁噪声仿真值与实验值的较小偏差, 二者具有一致性. 相比原厂聚光系统, 自行设计的光声光谱仪用光源系统入池光功率从 0.86 W 提升至 1.32 W, 侧壁噪声从 50.3% 下降至 19.7%, 实现了百万分之一量级微量气体浓度检测.

关键词: 光学设计, 光场整形, 扩展光源, 光声光谱仪用光源

PACS: 42.15.Eq, 42.15.-i, 42.60.Jf, 42.79.Jq

DOI: 10.7498/aps.70.20210691

1 引言

光声光谱仪是利用光声光谱获取待测物质组成与浓度等信息的仪器^[1], 光源作为仪器的输入端直接影响辐射待测样品的激励光的的光学质量, 制约光声池光声转化过程的进行^[2]. 光声光谱仪用光源与光声池配合工作, 目标最大化实现携带待测样品信息的光信号向声信号的转化^[3]. 在光源系统的

学设计上, 一方面要求对辐射源发出的光线进行特定的调制, 满足不同待测样品产生光声效应的条件; 另一方面要按照光声池的实际情况对辐射源进行二次配光, 实现光场整形, 从而避免光源发出的光线辐射到待测样品以外的其它物质上产生噪音干扰^[4].

随着社会的进步与发展, 光声光谱仪的需求与日俱增. 目前市面上光声光谱仪用光源大部分直接使用激光器, 少部分使用非相干扩展光源配合其他

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFF01011801)、国家自然科学基金 (批准号: 12074405)、应用光学国家重点实验室开放基金 (批准号: SKLAO-201915) 和中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2020121) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fanyuanyuan@ime.ac.cn

光学元件进行简单的聚光. 由于不同物质红外吸收峰的差异, 前者不能满足同时检测多种待测物质的要求^[5], 而后者多未对光源系统进行过多的杂散光限制, 只在后期处理中进行滤波. 相比而言, 覆盖相同的光谱范围, 非相干扩展光源结构更简单、体积更小、价格更低, 而其产生的杂散光也可以在光学设计阶段通过光场整形来进行消除. 三维非相干扩展光源中, 红外热辐射光源因其输出功率大、光谱范围宽等优点, 是商用多组分、高精度光声光谱仪的首选光源^[6].

给定光源和目标光场分布, 逆向求解光学系统结构及光学元件表面参数是非成像光学系统设计的一般过程. 在光声光谱仪用三维扩展光源光场整形系统中, 光源和目标光场两端的要求都极为苛刻. 对于输入端光源来说, 三维非相干扩展光源方向性极差, 向全空间辐射, 能量密度很低, 光学系统需要收集足够多的光能, 供系统进行光场整形; 对于输出端目标光场来说, 要求光线在光声池腔体内形成一个毫米级半径、厘米级长度的柱状分布; 而对于光场整形系统本身, 由于光声光谱仪仪器内安装尺寸的限制, 体积不宜过大, 不能使用过复杂的光路结构和过多的光学元件.

虽然这种极端的设计要求相对较少, 但国内外也有一些设计案例分别针对输入和输出两端的情况进行讨论. 1996年, 美国科学应用国际公司的 Ong 等^[7]完成了一个用于管状光源照明的边缘光线系统的设计, 此系统专为管状光源的边缘光线设计, 在保证最大辐射效率的同时, 改善光通量的分布情况. 1997年, Shatz 等^[8]通过非旋转对称的形式完成了针对球形和圆柱形非相干光源的光场整形和传输效率的优化. 2007年, Henning^[9]发现非相干耦合系统中若光源位于椭圆反射镜焦点位置不能实现最大耦合效率, 文章通过计算椭圆反射镜的高倍放大特性解释了最大耦合效率位置为何偏离焦点. 2009年, Florian 等^[10]提出了面向任意光强分布的扩展光源使用单反射镜产生任意形状非均匀光强分布的方法, 并给出了相关设计实例. 2014年, Wester 等^[11]针对 LED (light-emitting diode) 光源在光学设计中视为点光源而需要加大光学元件尺寸的问题, 提出了两种基于自由曲面的扩展光源设计方法. 2015年, Wu 等^[12]提出了一种有效的为扩展光源创建指定强度分布的设计方法, 使边缘杂散光线得到控制. 2020年, Hoffman 和 Ilan^[13]提

出了针对面光源或管状光源的分段反射聚光器优化方法.

本文通过前期实验实际测量光源发光特性, 并根据测量结果在物理尺寸和辐射方式上均进行了扩展光源精准建模. 在光声光谱仪用三维扩展光源光场整形系统光学设计的过程中引入扩展光源概念, 对三维非相干扩展光源辐射的光场进行整形, 致力于从光学角度、整个仪器系统的输入端提升光声光谱仪的性能参数.

2 初始结构计算与建模

2.1 红外热辐射光源

红外热辐射光源工作温度较高, 自身发热量较大. 商用红外热辐射光源发光体形状不规则, 多为柱状或螺旋管状, 严重偏离点光源——非成像光学设计的理想情况, 并且有着非典型的辐射通量空间分布, 在光学仿真软件 ZEMAX 中使用几何形状类似的管光源、圆柱体光源等非导入光源, 模拟辐射分布与实际光源偏差严重. 因其复杂性, 难以单纯的使用以点光源为默认测量条件的近场光源文件进行相关数据获取和模型化描述, 而红外热辐射光源制造商一般不提供说明发光特性的配光曲线等光源文件.

以氧化硅、氮化硅、碳化硅等硅的化合物为发光材料的红外热辐射光源功率较大, 是光声光谱仪光源系统理想的辐射源. 以美国 Hawkeye 公司 IR-Si272 型红外热辐射光源为例, 其辐射体为柱状氮化硅, 尺寸为 $2.8(D) \text{ mm} \times 5(L) \text{ mm}$, 长度与直径比较小^[14], 较为接近点光源, 由 6 V, 5 A 直流电源驱动, 典型工作温度 1160 °C, 电光效率为 80%, 辐射波长覆盖 2—25 μm 范围. 为了在光学设计软件中较为全面而准确的建立红外热辐射光源模型, 以 IR-Si272 红外热辐射光源为例自行开展辐射通量空间分布情况测量. 考虑商用红外热辐射光源柱/管状辐射体的实际情况, 分别以柱/管状辐射体的中心对称轴夹角和柱/管状辐射体纵深长度划分角度和长度微元, 并分别以角度和长度微元为单位进行离散采样, 实验装置分别如图 1^[15]和图 2 所示. 红外探测器选用 GENTEC-EO 公司型号为 XLP12-3S-H2-D2 的热电堆探测功率计, 响应波段为 0.19—20 μm , 探测孔径为 12 mm, 探测孔径外罩内径 25.5 mm 的管状光阑, 用于消

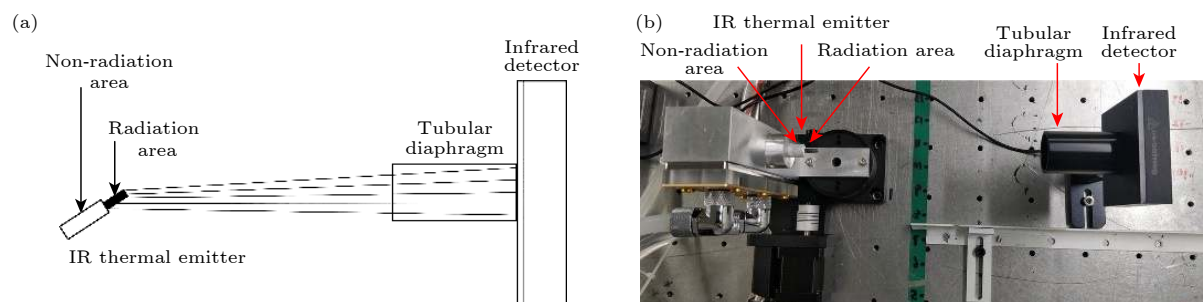


图 1 红外热辐射光源发光特性测量实验装置图^[15] (a) 示意图; (b) 实物照

Fig. 1. Experiment configuration for measuring the light distribution characteristic of IR thermal radiation light source^[15]: (a) Schematic diagram; (b) photograph.

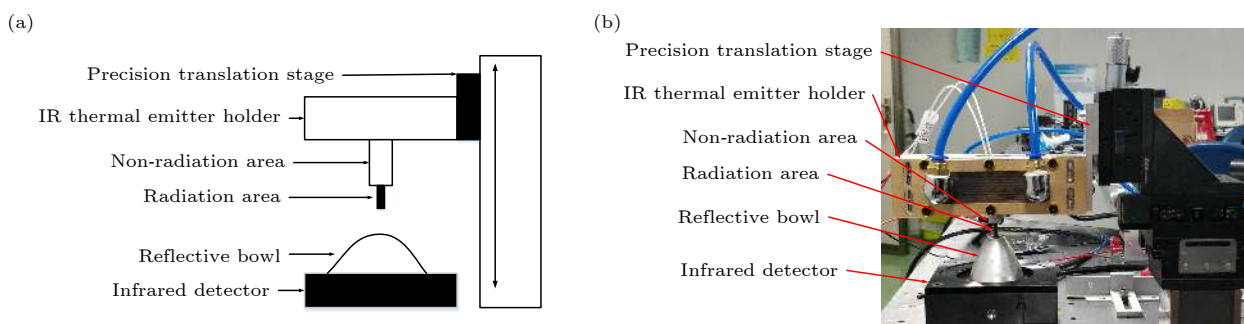


图 2 红外热辐射光源辐射通量长度分布测量实验装置图 (a) 示意图; (b) 实物照

Fig. 2. Experiment configuration for measuring the radiant flux distribution on the length of the IR thermal radiation light source: (a) Schematic diagram; (b) photograph.

除由空气湍流造成的功率波动并遮挡大角度杂散光. 为保证测量结果的相对准确, 实验中应避免内、外部环境条件的变化对红外热辐射光源及红外探测器产生干扰. 实验全程在暗室中进行, 无其他光源、热源, 且控制暗室内温度为 26 °C, 相对湿度为 55%.

图 1 中红外热辐射光源辐射区域中心位于转台旋转轴上, 使二者可以进行同步旋转. 如文献^[15]所述, 红外探测器与红外热辐射光源同轴等高, 通过调整二者间距保证所探测的辐射通量数值始终位于有效量程范围内. 测量过程中, 红外热辐射光源发出的光线在传播特定距离后被红外探测器接收, 通过旋转转台改变红外热辐射光源柱/管状辐射体的中心对称轴与探测器之间的夹角, 进行均值和归一化处理后得到各角度下的相对辐射通量, 即光源模型的角度微元^[15].

图 2 实验中选用铝制反光碗作为锥形光管, 入口直径为 4 mm, 出口直径为 55 mm, 具有 85%—90% 的反射率^[16]. 红外热辐射光源垂直向下固定于集成水冷的灯座中, 灯座固定于精密位移台上, 可带动红外热辐射光源进行上下移动. 红外热辐射

光源正下方放置红外探测器, 探测器靶面上安装锥形光管 (反光碗), 红外热辐射光源、锥形光管与探测器靶面三者同心放置. 锥形光管入口比柱状光源横截尺寸略大, 出口尺寸与红外探测器靶面尺寸相当, 可有效地收集红外热辐射光源所辐射的能量, 同时遮挡了其他杂散光. 测量过程中通过位移台改变红外热辐射光源伸入锥形光源中的长度, 获取红外热辐射光源柱状辐射体发出的辐射通量在柱状纵深长度上的分布, 进行等距差值和归一化后可得到纵深各单位长度下的相对辐射通量, 即光源模型的长度微元.

在 ZEMAX 软件中, 径向光源为轴对称光源, 可基于任意强度-角度数据进行样条拟合, 可满足自定义光源发光特性的需求. 光源模型以径向光源为微元, 按照 HAWKEYE IR-SI272 红外热辐射光源的几何尺寸进行建模, 并以实验测得 IR-SI272 红外热辐射光源的相对辐射通量-长度微元分布和相对辐射通量-角度微元分布对每一径向光源的光线总能量和能量方向分布进行设置. 综上, 建立了 HAWKEYE IR-SI272 红外热辐射光源的三维模型, 如图 3 所示.

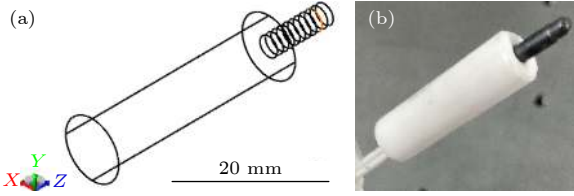


图3 HAWKEYE IR-SI272 光源 (a) 三维布局图; (b) 实物照

Fig. 3. HAWKEYE IR-SI272: (a) 3D layout; (b) photograph.

2.2 锥形光管

相比普通反射镜, 锥形光管能收集更多角度范围的光线, 在非相干光源光学系统中不可或缺. 锥形光管的应用使系统对辐射源有更高的能量收集效率, 通过改变锥形光管内壁反射面的面型, 可以控制光场分布, 进行光场整形. 由 2.1 节可知, 红外热辐射光源向全空间 4π 立体角辐射能量, 几乎没有方向性. 具有一定方向的辐射源出光方向对准普通光管入口, 便可实现耦合; 方向性较差的辐射源可以利用抛物面、椭球面等二次曲面的特殊光学特性, 将辐射源置于锥形光管内部, 二次曲面焦点上, 提高能量收集效率. 二次曲面可以使光源辐射出的部分光线收敛角度, 作为锥形光管的初始结构. 二次曲面面型由标准矢高方程^[17]描述:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}, \quad (1)$$

式中, c 为曲率, 与曲率半径互为倒数; r 为表面沿径向方向半径; k 为二次曲面系数, 即 conic 系数. 根据 conic 系数的不同, 面型则不同, 如表 1 所列.

表 1 二次曲面 conic 系数-面型对应表
Table 1. Correspondence between conic coefficient of quadric surface and surface type.

Conic系数取值	面型
$k = 0$	球面
$k < -1$	双曲面
$k = -1$	抛物面
$-1 < k < 0$	椭球面
$k > 0$	竖椭球面

理想情况下, 光学元件传输能量没有损耗, 即光学扩展量不变. 对于光声光谱仪用红外热辐射光源, 辐射体为圆柱体, 设直径为 d , 长为 h , 则光源的光学扩展量简化近似为

$$E_{\text{Source}} = \pi h d. \quad (2)$$

锥形光管是扩展光源不可缺少的能量收集元

件, 红外热辐射光源加入锥形光管后如图 4 所示, 锥形光管入口边缘与近焦点之间的夹角为 φ_1 , 锥形光管出口与近焦点之间的夹角为 φ_2 , 在锥形光管近焦点 F_1 处建立极坐标系, 锥形光管可表示为

$$\begin{cases} f = a(1 - k), \\ k = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}, \end{cases} \quad (3)$$

式中, f 为近焦点与二次曲面 conic 系数椭球顶点之间的距离; k 为锥形光管反射面的二次曲面 conic 系数.

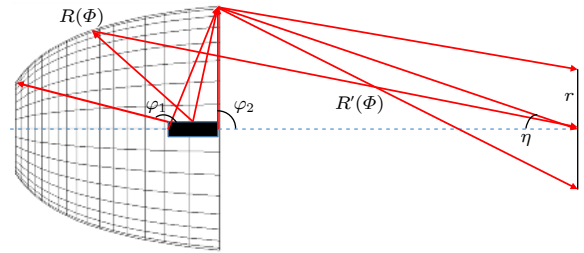


图 4 带锥形光管光源的光学扩展量分析

Fig. 4. Analytical diagram of the Etendue of light source with tapered light pipe.

由方程的几何关系可得远焦点处光斑半径和光线发散角:

$$r(\varphi) = \frac{\sqrt{h^2 + d^2}}{2} \frac{R'(\varphi)}{R(\varphi)} \frac{\sin(\varphi + \arctan(d/h))}{\cos \eta(\varphi)}, \quad (4)$$

$$\sin \eta(\varphi) = \frac{R(\varphi)}{R'(\varphi)} \sin \varphi. \quad (5)$$

出射光斑的光学扩展量为

$$E_r = \iint dr(\varphi) d\cos \eta(\varphi) = f[r(h, d, \varphi)]. \quad (6)$$

光源辐射的光线服从光强-角度分布, 其中, 光强分布情况与光源位置相关, 角度分布与光源辐射的立体角相关, 考虑光强-角度关系后, 光强分布为

$$\begin{aligned} I_{\text{beam}} &= \eta_r \iiint r(h_i, d_i, \varphi_i) P(h_i, d) G(\varphi_i) dh_i dd_i d\varphi_i \\ &= \eta_r \iiint f^{-1}(E_{\text{ref}}) P(h_i, d) G(\varphi_i) dh_i dd_i d\varphi_i \\ &= \eta_r I(E_r, h, d, \varphi), \end{aligned} \quad (7)$$

式中 η_r 为反光碗反射率; $P(h_i, d_i)$ 为点光强分布; $G(\varphi_i)$ 为点角度分布. (7) 式建立了光强分布与光学扩展量之间的关系^[18].

在进行锥形光管设计时, 还需要综合考虑光学元件的材料折射率和光程差, 借助反射光焦公式^[19]:

$$\varphi = (n_2 - n_1)c. \quad (8)$$

对于反光碗这种反射光学元件来说, n_2 与 n_1 互为相反数, c 为曲率半径倒数, φ 为光焦度即焦距的倒数, 反光光焦公式变为

$$f = R/2. \quad (9)$$

根据前文的讨论, 光声光谱仪用红外热辐射光源期望的光线是不能辐射到圆柱形光声池腔体侧壁上的, 理想的边界情况是平行光线贯穿光声池. 借助光学扩展量概念和边缘光线原理, 在实际设计中, 让光线稍稍进行聚焦, 以形成束腰, 光柱半径最小处位于光声池内. 光场整形的前提是有足够的能量耦合进系统, 进而谈及光线调制与取舍问题. 因此, 锥形光管最基本的功能是能量收集, 阻止输出光束的截面积随着传播变大, 能量密度随着传输变低. 以理想情况光线平行贯穿光声池为初始结构, 选取可产生平行光的抛物面作为锥形光管的初始面型. 对于本设计中所讨论的抛物面来说, $\text{conic} = -1$, 代入到标准方程中后得到:

$$z = \frac{r^2}{2R} = \frac{r^2}{4f}. \quad (10)$$

根据此公式和实际需求, 计算反光碗的初始参数. 考虑光声光谱仪光源中斩波器与滤光轮的安装位置, 反光碗的半径 r 被限制在 12 mm 内, 反光碗焦距 f 应大于红外热辐射光源长度 9 mm, 得到抛物面反光碗曲率半径为 18 mm、矢高 z 为 16 mm. 此反光碗深度较浅, 具备加工可行性, 故作为后续设计优化的初始结构参数.

2.3 光声池

光声光谱仪用红外光源系统与光声池衔接使用, 共同工作. 光声池的几何尺寸作为红外光源系统光学设计上的目标光场分布, 依据相关尺寸进行光学建模, 光声池光学模型如图 5 所示. 根据光声光谱仪用红外光源系统光学指标, 对应于入池光功率、出池光功率和侧壁光功率分别在光声池入口、出口和圆柱侧壁设置探测器. 其中光声池入口和出口位置的探测器为圆形, 半径为 5.75 mm, 与光声池圆柱腔体截面尺寸相同, 所探测到的功率数值分别为光声池入池和出池光功率. 在光学模型中可直接获取侧壁光功率. 光声池圆柱腔体侧壁的柱面为半径为 5.75 mm、长 21 mm 的圆柱管, 将其设定为物体探测器, 其功率值即为光声池侧壁光功率.

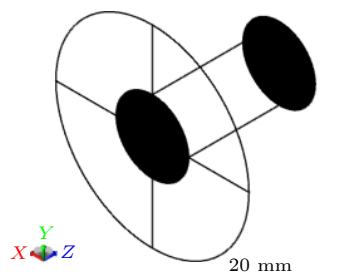


图 5 光声池三维布局图

Fig. 5. 3D Layout of photo-acoustic cell.

3 系统优化设计

3.1 评价函数

利用评价函数对自动优化过程进行约束, 主要包含系统光学指标优化方向和结构控制两部分. 光场整形系统的光学指标主要有入池光功率和侧壁噪声比. 其中入池光功率为进入光声池的总光功率, 可直接进行调用, 侧壁噪声比可由侧壁光功率与入池光功率做商而得. 结构控制部分主要用于限制光学元件之间的相对位置, 避免在自动优化过程中因位置的调整造成穿模, 违背实际物理状态, 无法进行后续实验装调. 主要包含红外热辐射光源、锥形光管、斩波器的相对位置.

3.2 优化结果

根据前文计算得到的初始结构参数及编写的评价函数^[20], 使用阻尼最小二乘法和正交下降法, 以光学元件相对位置和锥形光管反射面各面型参数为变量进行局部优化. 设计结果如图 6 所示, 非球面反光碗光学表面参数如表 2 所列. 优化设计后, 系统入池光功率为 1.38 W, 侧壁噪声为 17.7%, 光声池截面能量分布情况如图 7 所示.

表 2 非球面反光碗光学表面参数

Table 2. Optical surface parameters of spherical reflective bowl.

半径/mm	曲率半径/mm	圆锥系数	二阶非球面系数	四阶非球面系数
12.0	9.896	-0.634	5.275×10^{-3}	-3.870×10^{-3}

4 实验结果与分析

4.1 光学参数测试

根据设计完成相关光学与机械元件加工后, 进行光声光谱仪用光源系统的搭建与调试, 如图 8

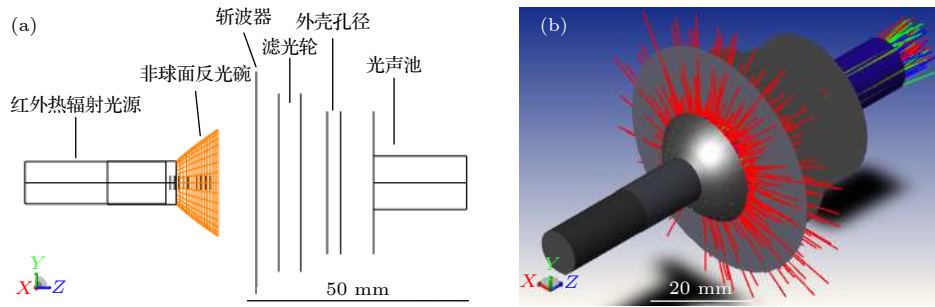


图 6 光源光学系统 (a) 三维布局图; (b) 实体渲染图

Fig. 6. Total reflection optical system: (a) 3D layout; (b) shaded model.

所示. 比照光声池入口和出口的物理尺寸, 加工光阑, 按光声池位置固定前后两光阑, 等效为光声池的入口和出口, 如图 9 所示. 分别测量前后两光阑后的功率值, 作为光声池入池功率与出池功率. 实验测得光声池入池功率为 1.32 W, 出池功率为 1.06 W, 侧壁噪声为 19.7%, 侧壁噪声问题得到了明显控制. 三维扩展光源光场整形系统光学参数指标实验值相比设计值略有下降, 主要考虑锥形光管光学反射面镀膜无法达到理想的全反射, 标称镀膜后反射率可达 95% 以上, 参数指标偏差在其范围内.

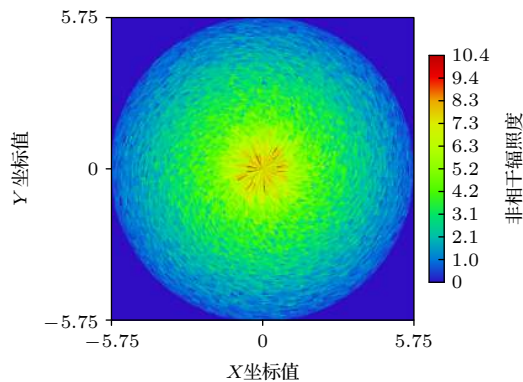


图 7 光声池截面能量分布

Fig. 7. The cross-section energy distribution of the photoacoustic cell.



图 8 实验装置图

Fig. 8. Experimental setup.

使用 HAWKEYE IR-SI272 光源配套的 MC-234 原厂聚光器替换光声光谱仪用三维扩展光源光场整形系统中自行设计加工的锥形光管, 进行对比实验. 在保证出池光功率, 即有用功率最高的条件下, 实验测得入池光功率为 1.73 W, 出池光功率为 0.86 W, 侧壁噪声为 50.3%. 图 10 为采用两种光场整形系统时, 光源在光声池出口端和探测器上形成的光斑结果. 可见, 相较于原厂聚光器, 自行优化设计的锥形光管更好的控制了边缘杂散光, 有效地提升了贯穿光声池的有用功率, 侧壁噪声问题得到了明显改善.

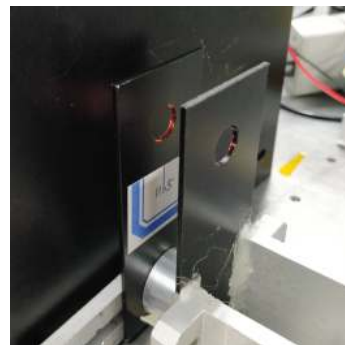


图 9 光源光学指标测量

Fig. 9. Measurement of optical index of light source.

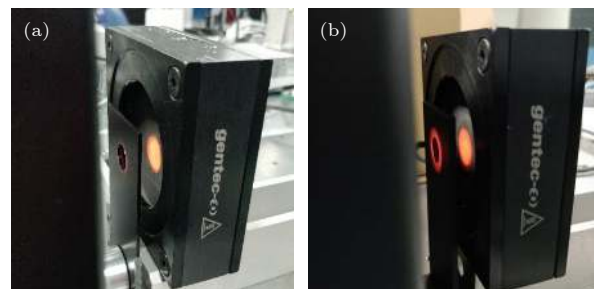


图 10 探测器光斑 (a) 自设计锥形光管; (b) 原厂 MC-234 聚光器

Fig. 10. Light spot: (a) Self-designed tapered light pipe; (b) original MC-234 condenser.

4.2 气体浓度测试

完成光源系统的搭建后, 将其安装到光声光谱仪中. 在 25 °C 恒温下对二氧化碳、一氧化碳、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔六种典型气体进行不同浓度 (0, 2, 5, 10, 50 和 100 $\mu\text{L/L}$) 的检测, 记录微音器在不同气体不同浓度下所输出的多组电压值. 对光源系统的效果检验, 是通过气体检测下限来判断的. 气体检测下限的公式^[21]为

$$L = c \cdot (\sigma/k), \quad (11)$$

式中, L 为气体浓度检测下限, 单位为 $\mu\text{L/L}$, 即体积分数为百万分之一; c 为系数, 根据导则规定, 当空白测量次数为 21 次时, 系数取 2.528; σ 为微音器输出电压的标准差; k 为微音器输出电压与气体浓度拟合直线的斜率. 根据检测下限公式, 依次对 6 种气体进行测试, 需要分别空白测量 (即通入氮气 N_2) 21 次, 计算其标准偏差. 再对每种气体的另外 5 种不同浓度进行测量, 得到其线性关系, 计算出其斜率, 最后计算出每种气体的检测下限. 在实际测试中, 通过流量计限制压强范围, 控制在 60—80 mL/min , 避免流量过小使通气时间过长或流量过大导致微音器性能下降. 对每种气体不同浓度下记录的多组电压值的平均进行线性拟合, 根据检测下限公式, 对每种气体检测浓度的下限进行计算, 相关参数和结果如表 3 所示. 可见, 检测下限可至百万分之一量级.

表 3 光源激励下气体检测参数表
Table 3. Gas detection parameters under excitation of light source.

	CO_2	CO	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2
标准差	0.9866	0.5285	0.9118	0.7888	0.7255	0.6947
斜率	11.7280	0.7824	2.1508	2.9748	0.4488	1.8032
检测下限 ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.2126	1.7076	1.0717	0.6703	4.0870	0.9739

5 结 论

本文对光声光谱仪用三维扩展光源光场整形系统进行了优化设计与实验验证. 以 Hawkeye IR-Si272 光源为例进行设计与实验验证, 光学参数指标方面, 优化设计结果与实验参数接近, 即光声池入池光功率仿真优化值为 1.38 W, 实验值为 1.32 W, 侧壁噪声仿真优化值为 17.7%, 实验值为 19.7%. 相较于原厂聚光器实验结果, 入池光功率从 0.86 W 提升至 1.32 W, 侧壁噪声从 50.3% 降

至 19.7%. 可见, 在保证有效入池功率的前提下, 侧壁噪声得到明显控制. 本文提出的针对三维非相干扩展光源的发光特性测量、光学建模、优化方法具有可行性, 利用非球面反射结构面向三维扩展光源进行光场整形的探索初见成效. 实际应用方面, 光声光谱仪实际的气体浓度检测实验没有出现太大的浓度偏差, 方差均在可接受范围内. 计算得到的气体浓度检测下限均小于 5 $\mu\text{L/L}$, 达到百万分之一微量气体检测量级. 系统设计与实验结果表明, 光学设计与优化过程中贯穿扩展光源概念, 在物理尺寸和辐射方式上均采用三维扩展光源进行准确建模并配合非球面面型, 可有效地控制扩展光源偏离点光源产生的杂散光线, 实现光场整形, 为三维扩展光源的应用提供新的设计与优化思路.

参考文献

- [1] Wang Q, Wang J, Li L, Yu Q 2011 *Sens. Actuators B* **153** 214
- [2] Li B R 2014 *M. S. Thesis* (Changsha: Central South University) (in Chinese) [李奔荣 2014 硕士学位论文 (长沙: 中南大学)]
- [3] Li S C 2003 *Ph. D. Dissertation* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [李少成 2003 博士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [4] Fan Y Y, Qiu Y G, Wang Q, Qi Y 2020 *AOPC 2020: Optical Sensing and Imaging Technology* Beijing, China, November 5, 2020 115672F
- [5] Yang X L 2003 *M. S. Thesis* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [杨晓龙 2003 硕士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [6] Zhang W, Yu Q X 2007 *Spectrosc. Spectral Anal.* **27** 614 (in Chinese) [张望, 于清旭 2007 光谱学与光谱分析 **27** 614]
- [7] Ong P T, Gordon J M, Rabl A 1996 *Appl. Opt.* **35** 4361
- [8] Shatz N E, Bortz J C, Harald R, Roland W 1997 *Nonimaging Optics: Maximum Efficiency Light Transfer IV* San Diego, United States, October 3, 1997 p76
- [9] Henning R 2007 *Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems IV* San Diego, United States, September 18, 2007 667008
- [10] Fournier F R, Cassarly W J, Rolland J P 2009 *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration VI* San Diego, United States, August 20, 2009 742302
- [11] Wester R, Müller G, Völl A, Berens M, Stollenwerk J, Loosen P 2014 *Opt. Express* **22** A552
- [12] Wu R, Qin Y, Hua H, Meuret Y, Benítez P, Miñano J C 2015 *Opt. Lett.* **40** 2130
- [13] Hoffman C, Ilan B 2020 *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XVII* San Diego, United States, August 20, 2020 1149508
- [14] HawkeyeTechnologies <http://hawkeyetechnologies.com/source-selection/> [2021-4-8]
- [15] Qiu Y G, Fan Y Y, Wang Q, Yan B X, Wang Y W, Han Z, Qi Y 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 0212003 (in Chinese) [邱乙耕, 范元媛, 王倩, 颜博霞, 王延伟, 韩哲, 亓岩 2021 光学学报 **41** 0212003]
- [16] Lee F, Lester C, Bruce D, William H, Joseph H, Ritva K 2012 *Opt. Eng.* **51** 011006
- [17] Ye J, Chen L, Li X, Yuan Q, Gao Z 2017 *Opt. Eng.* **56** 110901

- [18] Su Y P 2017 *Design Methods for Non-imaging Optics* (Beijing: China Machine Press) pp26–27
- [19] Daniel M, Zacarias M 2012 *Handbook of Optical Design* (Boca Raton: CRC Press) p6
- [20] Li X T, Cen Z F 2014 *Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design* (Zhejiang: Zhejiang University Press) pp213–215
- [21] Chinese Research Academy of Environmental Sciences, http://english.mee.gov.cn/Resources/standards/others1/others3/201102/t20110216_200847.shtml [2010-5-1]

Design and experiment of light field shaping system for three-dimensional extended light source used in photoacoustic spectrometer*

Qiu Yi-Geng¹⁾²⁾ Fan Yuan-Yuan^{1)2)3)†} Yan Bo-Xia¹⁾²⁾ Wang Yan-Wei¹⁾²⁾

Wu Yi-Hang⁴⁾ Han Zhe¹⁾²⁾ Qi Yan¹⁾²⁾ Lu Ping⁴⁾

1) (*R & D Center of Optoelectronic Technology, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130033, China*)

4) (*National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

(Received 12 April 2021; revised manuscript received 8 June 2021)

Abstract

Compared with infrared laser sources, the three-dimensional incoherent extended light source has the advantages of high power, wide spectral range, and low cost. It has extremely wide applications in high-precision and multi-component photoacoustic spectrometers. However, it encounters some problems about poor directivity, low energy density, irregular shape, light field shaping needed in the design of optical system. The photoacoustic spectrometer is required to collect and optimize the radiation of the centimeter-level three-dimensional extended light source to the whole space in a small volume. Through using a series of wavelength and frequency modulation elements, the final cylindrical light field distribution with millimeter-level radius and centimeter-level length is realized. According to the concept of optical expansion and the principle of edge light, this paper breaks through the traditional design mode based on point light source in the process of optical system design and optimization. The concept of extended light source is used throughout the design process. The luminous characteristics of the three-dimensional extended light source are directly acquired by the self-designed measurement method and device which is accurately reflected in the three-dimensional extended light source model in the form of micro-element. The design of the light field shaping system of the three-dimensional extended light source for the photoacoustic spectrometer is realized by the aspheric surface, and the relevant experimental verification is carried out. Taking the Hawkeye IR-Si272 light source for example, the experimental value of the light power at the entrance of the photoacoustic cell and the sidewall noise rate of the photoacoustic spectrometer have a small deviation from their corresponding simulation values. Compared with the original condenser system, the self-designed photoacoustic spectrometer light source system increases the value of the light power at the entrance of the photoacoustic cell from 0.86W to 1.32W, and reduces the value of the sidewall noise rate from 50.3% to 19.7%. The lower limit of detection of the concentration of trace gas in the order of ppm (parts per million) is also achieved.

Keywords: optical design, light field shaping, extended light source, light source for photoacoustic spectrometer

PACS: 42.15.Eq, 42.15.-i, 42.60.Jf, 42.79.Jq

DOI: 10.7498/aps.70.20210691

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFF01011801), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12074405), the Open Fund Project of the State Key Laboratory of Applied Optics, China (Grant No. SKLAO-201915), and the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. 2020121).

† Corresponding author. E-mail: fanyuanyuan@ime.ac.cn