

大孔径太赫兹波成像光学系统设计

曹一青 沈志娟

Design of terahertz wave imaging optical system with large aperture

CAO Yi-qing, SHEN Zhi-juan

引用本文:

曹一青, 沈志娟. 大孔径太赫兹波成像光学系统设计[J]. *中国光学*, 2024, 17(2): 374–381. doi: 10.37188/CO.2023–0129

CAO Yi-qing, SHEN Zhi-juan. Design of terahertz wave imaging optical system with large aperture[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 374–381. doi: 10.37188/CO.2023–0129

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0129>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学系统降敏设计方法综述

Review of optical systems' desensitization design methods

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 863 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0096>

空间引力波探测望远镜光学系统设计

Optical design of space gravitational wave detection telescope

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 761 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0018>

分孔径紫外多波段成像光学系统设计

Aperture-divided ultraviolet multiband imaging optical system

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1476 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0052>

低灵敏度空间引力波望远镜光学系统设计

Design of optical system for low-sensitivity space gravitational wave telescope

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1384 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0006>

矩形大口径激光光束质量评价光学系统设计

Design of optical system for quality evaluation of a large rectangular aperture laser beam

中国光学 (中英文). 2022, 15(2): 306 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0130>

基于粒子群算法离轴多反光学系统设计

Design of off-axis multi-reflective optical system based on particle swarm optimization

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1435 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0087>

文章编号 2097-1842(2024)02-0374-08

大孔径太赫兹波成像光学系统设计

曹一青^{1,2*}, 沈志娟¹

(1. 莆田学院 机电与信息工程学院, 福建 莆田 351100;
2. 福建省激光精密加工工程技术研究中心, 福建 莆田 351100)

摘要: 太赫兹波具有高穿透性、低能性及指纹谱性等特征, 被广泛应用于探测领域, 因此, 设计太赫兹波成像光学系统具有重要的意义和广泛的应用前景。首先, 以四块透镜构成的天塞物镜为参考结构, 应用近轴光学系统像差理论构建系统像差平衡方程, 给出了系统初始结构参数求解函数和方法, 再结合光学设计软件进一步校正系统像差, 最终设计了一种用于太赫兹波探测的大孔径光学成像系统。该光学系统由 4 块同轴折射透镜构成, 焦距为 70 mm, F 数为 1.4, 全视场角为 8°, 在奈奎斯特频率 10 lp/mm 处全视场角范围内的调制传递函数 (MTF) 值均大于 0.32, 各视场内的弥散斑均方根 (RMS) 半径均小于艾里斑半径。最后对系统各种公差进行分析和讨论。设计结果表明, 本文设计的太赫兹波探测光学成像系统具有孔径大、结构简单且紧凑、成像质量较好且加工性易于实现等特点, 满足设计要求, 它在太赫兹波段高分辨率探测领域具有重要应用价值。

关键词: 光学系统设计; 太赫兹波; 大孔径; 像差平衡; 公差分析

中图分类号: O439 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0129

Design of terahertz wave imaging optical system with large aperture

CAO Yi-qing^{1,2*}, SHEN Zhi-juan¹

(1. School of Mechanical, Electrical & Information Engineering, Putian University, Putian 351100, China;
2. Fujian Laser Precision Machining Engineering Technology Research Center, Putian 351100, China)

* Corresponding author, E-mail: caoyiqing1987@163.com

Abstract: The Terahertz wave has some characteristics of high penetration, low energy and fingerprint spectrum, etc., and is widely used in the detection field. Therefore, design of Terahertz wave detection optical imaging system holds substantial significance and wide application prospects. Firstly, referring to the structure of Tessar objective lens consisting of four lenses, we apply the aberration theory of paraxial optical system to establish the balance equations of aberration of the system, and give solve function and method of the initial structure parameters of the system. Then, by combining with optical design software to further correct the aberration of the system. Finally, a Terahertz wave detection optical imaging system with large aperture is designed. The optical system is composed of four coaxial refractive lenses. Its total focal length is 70 mm, F-

收稿日期: 2023-08-03; 修订日期: 2023-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62205168); 福建省教育厅中青年教师教育科研项目 (No. JAT220294); 福建省自然科学基金项目 (No. 2020J01916)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62205168); Young and Middle-aged Teachers' Educational Research Projects of Fujian Province (No. JAT220294); Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2020J01916)

number is 1.4, full field of view angle is 8° . The value of modulation transfer function (MTF) in the range of full field of view angle is greater than 0.32 at the Nyquist frequency of 10 lp/mm, and the root mean square (RMS) radius of the diffused spot in each field of view is less than the Airy disk radius. At last, we analyze and discuss the various tolerance types of the system. The design results show that the Terahertz wave detection optical imaging system designed in this paper has a large aperture, a simple and compact form, a lightweight structure, excellent imaging performance and simple processing, etc., which meets the design requirements, and it has important applications in the field of high-resolution detection and other fields within the Terahertz wave band.

Key words: optical system design; terahertz wave; large aperture; aberration balance; tolerance analysis

1 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波, 在长波段与毫米波相重合, 在短波段与红外光相重合, 属于远红外和亚毫米波范畴^[1]。正是因为 THz 波具有较强穿透性、良好时间和空间相干性、高时空分辨率、高效抑制背景噪声、无损性和指纹谱等特性, 使得 THz 成像与其它波段成像相比更加具有优势, 目前已经被广泛应用于生物医学、安全检测、药物分析、材料探伤、空间探测及航空航天等领域^[2-5]。因此, 人们研究和研制了许多种类 THz 成像仪器, 如用于安检的 THz 成像系统和用于材料分析的 THz 时域光谱系统。

THz 成像系统主要由 3 部分构成, 分别为光源、光学系统和探测器。其中, THz 光学系统是其重要组成部分, 它的成像质量直接影响最终 THz 成像系统的工作性能。武汉工程大学王华泽等人从设计 THz 成像系统的角度出发, 对系统在成像方面特点、工作原理、组成及关键技术进行详细分析研究^[6]; 北京遥感技术研究所的曹恩达等人根据太赫兹非成像光谱探测技术的原理, 应用光学设计软件 Zemax 设计了一种手持式太赫兹探测系统的光学系统结构^[7]; 中国科学院耿贺彬等人基于高斯波束的传播机理, 建立了合理的射线追迹模型来模拟高斯波束在准光系统中的传播, 并提出了一种太赫兹透镜的高效优化方法^[8]; 长春理工大学杨旭等人设计了用于太赫兹波段的视场角为 $0.3^\circ\sim 1.2^\circ$ 的共轴三反变焦系统与 $2^\circ\times 2^\circ\sim 0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 的无遮拦三反变焦系统^[9]; 国网供电公司李志雷等人借助 Zemax 设计软件的光学分析与优化功能, 设计了二次非球面 TPX 平凸透

镜, 并应用该种透镜设计了太赫兹波束整形光学系统^[10]。在 THz 成像系统信号较弱的情况下, 为了能够获得更多 THz 能量以及对较远物体进行清晰成像, 需要较大的光学系统接收孔径及较长的焦距; 同时, 为了能够使其应用领域更加广泛, 需要系统工作波段较宽, 故目前 THz 系统设计追求大孔径、长焦距及工作波段范围广, 但同时兼具这 3 个特点将导致系统像差较大且难以校正, 因此, 研究此类光学成像系统的设计具有重要理论意义和应用价值。

本文将类似由四块折射透镜构成的天塞物镜结构作为 THz 波成像系统设计的基础结构^[11], 分析并确定用于该类成像系统设计的光学透镜材料; 然后, 应用近轴光学系统三阶像差理论构建了系统像差平衡模型并对其进行求解, 得到较为合适的初始结构参数解, 再结合光学设计软件 Zemax, 选择合适的光学面设计为偶次非球面来对系统像差做进一步校正, 获得满足设计要求的光学系统结构参数; 最后, 对系统存在的各种公差进行分析, 并分析系统设计及加工工艺的合理性, 验证了本文给出的大孔径太赫兹波成像光学系统设计思路的有效性。

2 设计思路

2.1 设计指标

考虑到 THz 成像系统在安全检测、航空遥感探测等领域中的应用^[9, 12], 本研究中, 将 THz 波探测光学成像系统的工作波段设定为 $30\ \mu\text{m}\sim 35\ \mu\text{m}$, 并采用相应的图像接收器或空间相机。同时选用目前在 THz 波成像光学系统中最常用的非制冷焦平面阵列探测器作为设计系统的图像接收器, 其有 240×320 个像元, 每个像元尺寸为 $52\ \mu\text{m}$ 。

另外, 由于 THz 波成像光学系统中信号较弱, 为了能够更好地收集太赫兹能量, 需要较大的接收孔径, 而 F 数直接决定了系统接收孔径的大小。 F 数越小表明系统孔径越大, 但也会相应增加系统设计难度, 因此, 为了能够充分利用系统选用的探测器分辨率, 从系统成像分辨率方面考虑, 像面上能够分辨得开的两点间的最小距离应小于像元大小, 则

$$\Delta y = 1.22\lambda \frac{f'}{D} = 1.22\lambda \cdot (F) < \sigma, \quad (1)$$

式中, f' 和 D 分别为系统焦距和入瞳直径, λ 为系统工作主波长, σ 为探测器像元尺寸。

本文设计的 THz 光学成像系统的工作主波长 λ 取 $30 \mu\text{m}$, 由式 (1) 可以得出系统对应的 F 数应小于 1.42, 经过综合考虑, 本设计中 F 数取 1.4。由奈奎斯特定理知, 物点经过光学系统所成像的大小至少要覆盖像方两个像素才能被接收器分辨, 因此该光学系统奈奎斯特(Nyquist)频率约为 10 lp/mm 。综上所述, 大孔径太赫兹波成像光学系统设计指标如表 1 所示。

表 1 光学系统设计指标

Tab. 1 Design specifications of the optical system

Parameter	Value
Wavelength band/ μm	30-35
Effective focal length/mm	70
Full field of view angle/ $^\circ$	8
F -number	1.4
Pixel size/ μm	52×52
Pixel	240×320

2.2 初始结构确定方法

目前, 太赫兹光学成像系统结构主要有 3 类, 分别为反射式、折反射式、折射式。与反射式和折反射式相比, 折射式结构较为简单且不存在视场遮拦现象, 特别是同轴情况, 装调比较容易实现, 故本文采用折射式结构设计。并在较普遍的由四块折射透镜构成的天塞物镜结构基础上, 为了增加系统设计自由度, 将物镜结构中的双胶合透镜设计为两个单透镜。以此结构为系统设计基础, 其对应的结构简图及光路图如图 1 所示。其中 h_i 和 \bar{h}_i ($i=1, 2, 3, 4$) 分别为任意一条孔径光线和主光线在第 i 块薄透镜的入射高度, d_i 为第 i 块与第 $i+1$ 块薄透镜的间隔。

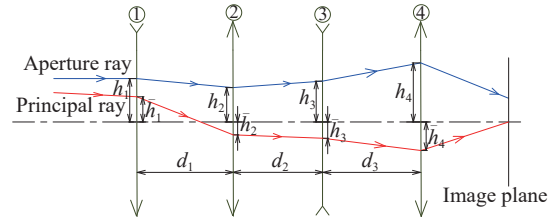


图 1 光学系统基础结构应用薄透镜简化结构和光路图
Fig. 1 Simplify structure and optical pass diagram using thin lens in optical system infrastructure

设计的太赫兹波光学系统在大孔径成像情况下需要考虑高阶像差的影响。然而, 高阶像差表达式非常复杂, 应用它很难求解出系统初始结构参数, 因此, 提出应用三阶像差理论研究系统中、小孔径 (F 数取 5) 成像情况下的初始结构确定方法。然后, 在采用光学设计软件进一步校正系统像差时, 不断增大系统孔径, 最终达到系统设计孔径要求。将上述的光学系统基础结构分为由薄透镜 ϕ 、 κ 和薄透镜 λ 、 μ 构成的前组和后组光学系统。对于光学系统设计, 首先需要确定系统中的透镜材料, 目前应用于 $30 \sim 35 \mu\text{m}$ 波段范围的材料较少, 主要有溴化铯 (CsBr)、碘化铯 (CsI) 和溴化铯-碘化铯 (KRS-5) 等晶体。由于 CsBr 和 KRS-5 晶体材料在该 THz 波段具有较好的透过率且折射率在该波段范围内变化较小, 因此其色散较小, 选用这两种晶体作为本文 THz 光学成像系统的透镜材料, 能在宽工作波段范围内有效减小色差, 以及能降低成本和实现系统结构简单且性能稳定等特点。

假设光学系统总的光焦度为 Φ , 前组和后组光学系统光焦度分别为 Φ_F 和 Φ_B , 两光学系统之间的间隔为 d_{F-B} , 则系统光焦度分配应满足如下条件:

$$\Phi = \Phi_F + \Phi_B - d_{F-B} \Phi_F \Phi_B \quad (2)$$

应用下面给出的近轴光学系统三阶像差理论分别计算前组和后组光学系统的球差、彗差、像散、场曲、畸变、位置色差及倍率色差的波像差系数^[13, 14],

$$\begin{aligned} W_I &= -\frac{1}{8}S_I, & W_{II} &= -\frac{1}{2}S_{II}, & W_{III} &= -\frac{1}{2}S_{III}, \\ W_{IV} &= -\frac{1}{4}(S_{III} + S_{IV}), & W_V &= -\frac{1}{2}S_V, \\ W_{IS} &= -\frac{1}{2}S_{IS}, & W_{IS} &= -S_{IS} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, W_I 、 W_{II} 、 W_{III} 、 W_{IV} 、 W_V 、 W_{IS} 和 W_{IS} 分别为波面球差、波面彗差、波面像散、波面场曲、波面畸变、波面位置色差和波面倍率色差系数; S_I 、

S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IV} 、 S_V 、 S_{IS} 和 S_{IS} 的计算表达式见文献 [15] 中的式 (2)~式 (6)。

对于确定的光学系统基础结构, 在应用式 (3) 计算得到前组和后组光学系统的各类型波像差计算表达式后, 利用后组光学系统的波像差来平衡前组光学系统波像差, 光瞳坐标采用归一化处理, 建立了关于系统一阶光学参量(光焦度和间距)的系统总波像差平衡方程:

$$Q = \sum_{i=1}^7 \alpha_i Q_i \quad (4)$$

其中, α_i 为各类波像差平衡表达式的加权系数, Q_i 的计算表达式为:

$$\begin{aligned} Q_1 &= (W_I + \bar{W}_I) (\bar{\eta}^2 + \bar{\xi}^2)^2, & Q_2 &= (W_{II} + \bar{W}_{II}) \bar{y} \bar{\eta} (\bar{\eta}^2 + \bar{\xi}^2), \\ Q_3 &= (W_{III} + \bar{W}_{III}) \bar{y}^2 \bar{\eta}^2, & Q_4 &= (W_{IV} + \bar{W}_{IV}) \bar{y}^2 (\bar{\eta}^2 + \bar{\xi}^2), \\ Q_5 &= (W_V + \bar{W}_V) \bar{y}^3 \bar{\eta}, & Q_6 &= (W_{IS} + \bar{W}_{IS}) (\bar{\eta}^2 + \bar{\xi}^2), \\ Q_7 &= (W_{IS} + \bar{W}_{IS}) \bar{\eta} \bar{y}, & & \end{aligned} \quad (5)$$

式中, W 和 \bar{W} 分别表示前组和后组光学系统对应的波像差系数; η 和 ξ 为归一化的光阑坐标; y 为归一化的物面坐标。式 (4) 的值越小, 说明系统像差平衡的越好。由于该表达式很难直接求解出光学结构参数解析解, 因此, 应用一种自适应交叉变异概率遗传优化算法来对该评价函数进行求解, 尽量得出该方程在取最小值的情况下, 光学系统中薄透镜的光焦度以及它们之间空气间隔的取值。

2.3 优化设计过程

应用上述 THz 波光学成像系统初始结构确定方法, 得到薄透镜下光学系统初始结构的一阶光学参量值, 具体数据由表 2 给出。对应的初始结构及光路图如图 2 所示。

表 2 光学系统初始结构的一阶光学参量

Tab. 2 First-order optical parameter of the initial structure of the optical system (Unit: mm⁻¹, unless otherwise stated)

Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	d_1	d_1	d_3
-0.0157	0.0356	-0.0201	0.0264	6 mm	15.51 mm	80 mm

光学系统初始结构与最终需要满足系统各项指标要求的系统结构相比, 还存在一定的差异, 需要进一步对系统初始结构像差进行反复校正。在应用光学设计软件对系统结构及像差进行优化

时, 需要在光学设计软件 Zemax 中应用光学材料的 Sellmeier 函数, 如式 (6) 所示, 建立 KRS-5 和 CsBr 材料在 THz 波段的光学玻璃库。

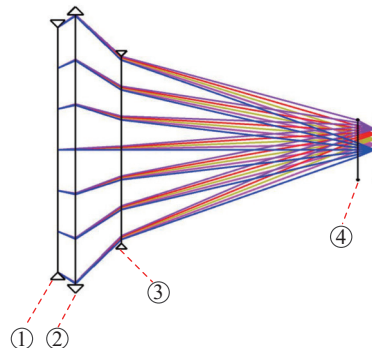


图 2 光学系统初始结构简化及光路图

Fig. 2 Simplified structure and optical path diagram for initial structure of the optical system

$$n^2 = 1 + \frac{K_1 \lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2 \lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3 \lambda^2}{\lambda^2 - L_3} + \frac{K_4 \lambda^2}{\lambda^2 - L_4} + \frac{K_5 \lambda^2}{\lambda^2 - L_5} \quad (6)$$

式中, n 为材料折射率, λ 为工作波长, K_i 和 L_i ($i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$) 为 Sellmeier 函数的拟合系数。基于 KRS-5 和 CsBr 材料的波长与折射率的对应数据进行参数拟合, 得到最终的拟合系数, 如表 3 所示。通过在玻璃库中添加该 Sellmeier 函数的玻璃材料与离散折射率数据点, 通过对比分析能够得出 KRS-5 和 CsBr 材料模型与实际情况基本符合, 说明添加的上述两种材料的正确性。

表 3 KRS-5 和 CsBr 材料的 Sellmeier 函数拟合参数

Tab. 3 Sellmeier function fitting parameters of KRS-5 and CsBr materials

Sellmeier fitting parameters	Material	
	KRS-5	CsBr
K_1	1.8293958	0.9533786
L_1	2.25×10^{-2}	$8.20189243 \times 10^{-3}$
K_2	1.6675593	0.8303809
L_2	6.25×10^{-2}	$2.79396908 \times 10^{-2}$
K_3	1.1210424	2.847172
L_3	0.1225	1.41646892×10^4
K_4	4.513366×10^{-2}	-
L_4	0.2025	-
K_5	12.380234	-
L_5	2.70898681×10^4	-

应用光学设计软件的操作数 WFNO 控制系统相对孔径, 优化过程中不断减少该操作数的数值, 最终使得系统的 F 数达到 1.4。应用 EFLX、EFLY 及 EFFL 操作数来控制各光学元件焦距和系统焦距, 利用 MNCA、MNEA、MNCG、MXCG、MNEG、MXEG 操作数控制透镜及空气中心厚度和边缘厚度, 防止在优化过程中光学系统结构变化太大且不合理。此外, 应用各类像差相应的控制操作数来控制系统球差、彗差、场曲、像散、畸变及色差^[16-17]。另外, THz 波光学系统在大孔径成像情况下, 轴外视场的高阶像差比较明显, 校正难度往往较大, 因此将第 1 块和第 2 块透镜朝向物方和像方光学面放置, 以及第 3 块和第 4 块透镜朝向物方光学面放置。它们均选用偶次非球面设计, 其对应的面型表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^n a_i r^{2i}, \quad (7)$$

式中, z 和 k 分别表示非球面的弧矢高度和二次圆锥系数, $c = 1/R_0$, R_0 为非球面顶点曲率半径, r 为非球面的径向半径, a_i 为第 i 次径向坐标项系数。

对 THz 波光学成像系统进行优化设计, 对系统不断进行像差校正, 并根据每次得到的结果对优化策略进行适时调整, 使得系统各项指标均达到要求。最终优化后的光学结构参数由表 4 给出, 对应系统结构图及光路图如图 3 所示。

表 4 经优化设计后光学系统的光学结构参数

Tab. 4 Optical structure parameters of the optical system after optimization design

Surface	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Material
1	Even Aspheric (STOP)	-83.93	6.28	CsBr
2	Even Aspheric	46.66	0.70	
3	Even Aspheric	27.45	14.98	KRS-5
4	Even Aspheric	185.48	7.65	
5	Even Aspheric	-27.00	17.50	CsBr
6	Standard	32.64	3.25	
7	Even Aspheric	38.61	17.50	KRS-5
8	Standard	316.43	35.47	
Image plane	Standard	Infinite		

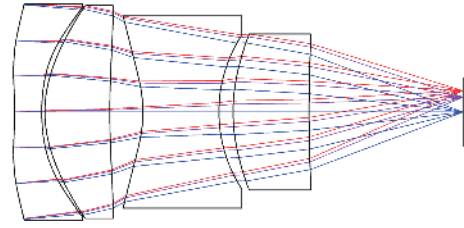


图 3 优化设计后的光学系统的光学结构及光路图

Fig. 3 Optical structure and optical path diagram of the optical system after optimization design

3 成像性能分析

基于上述优化设计得到的 THz 波光学成像系统, 系统视场角是关于 Y 轴对称的, 因此只需要分析半视场角范围内成像性能就可以代表整个视场角情况。选取轴上点视场 (0°)、 0.7 视场 (2.8°) 及全视场 (4°) 3 个视场, 在工作主波长为 $30 \mu\text{m}$ 的情况下分析系统成像性能评价指标。

图 4 和图 5 (彩图见期刊电子版) 给出了该光学成像系统的调制传递函数曲线图和像平面上的点列图, 可以得出在 0.5 倍奈奎斯特频率 5 lp/mm 处, 全视场角范围内在子午和弧矢方向上的调制传递函数值分别大于 0.67 和 0.63 ; 以及在奈奎斯特频率 10 lp/mm 处, 它们分别大于 0.39 和 0.34 , 基本上接近系统衍射极限; 在全视场角范围内, 系统最大均方根半径 (Root Mean Square radius, RMS radius) 为 $21.87 \mu\text{m}$, 明显小于艾里斑半径 $51.91 \mu\text{m}$; 系统的垂轴色差在整个视场角范围内均小于 $9.09 \mu\text{m}$ 。结果说明系统的各类像差均校正比较完全, 成像质量较好。

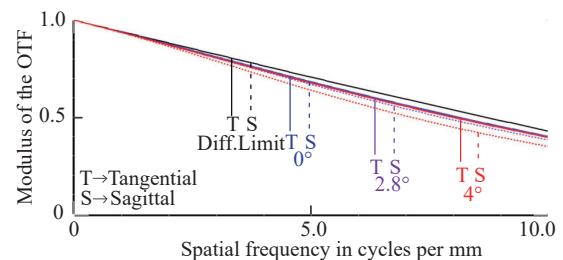


图 4 优化设计后光学系统的调制传递函数曲线图

Fig. 4 MTF curve diagram of the optical system after optimization design

图 6 和图 7 (彩图见期刊电子版) 给出了系统相对照度和畸变曲线图, 从图中可以得到全视场角范围内的相对照度值均大于 0.98 以上,

且畸变均小于 0.007%, 表明系统像面上的图像成像亮度较好且满足灵敏要求, 并且系统成像畸变非常小。综上所述, 设计的系统完全符合要求。

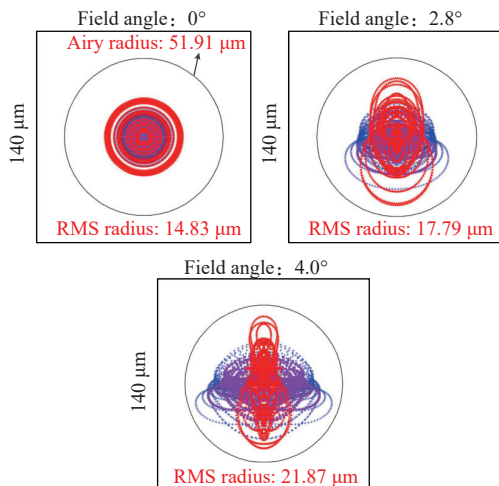


图 5 优化设计后光学系统的点列图

Fig. 5 Spot diagram of the optical system after optimization design

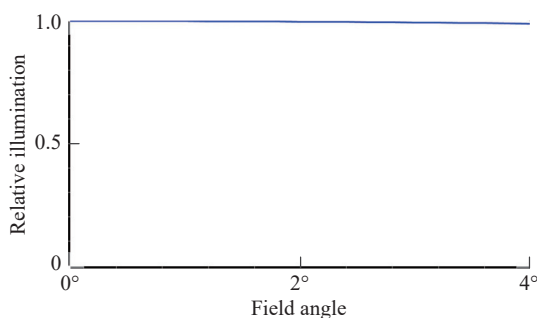


图 6 优化设计后光学系统的相对照度曲线图

Fig. 6 Relative illumination curve diagram of the optical system after optimization design

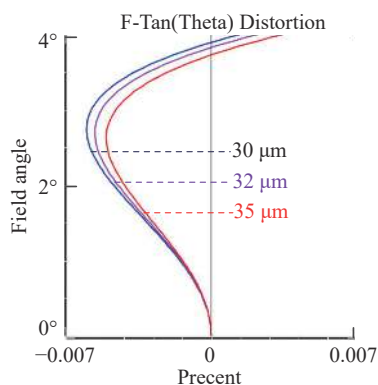


图 7 优化设计后光学系统的 F -Tan (Theta) 畸变曲线图

Fig. 7 F -Tan (Theta) distortion curve diagram of the optical system after optimization design

4 公差分析

一个满足成像质量要求的 THz 光学成像系统设计好后, 为了验证其能否加工及装调, 从而实现产业化并在探测领域中的应用, 需要对系统进行公差分析并得到合适的加工及装调公差范围。本文应用光学设计软件 Zemax 对系统进行公差分析, 采用奈奎斯频率 10 lp/mm 处的子午和弧矢方向上的调制传递函数的平均值作为评价标准, 以后截距变化量作为补偿量, 并结合光学透镜加工误差和装调误差的公差分析操作数, 初步确定公差范围值, 采用灵敏度分析方法和蒙特卡罗模拟来评估实际产品的调制传递函数值的变化情况, 对变化结果进行详细分析, 看是否满足要求。不断重复上述步骤, 最终得到系统加工和装调公差分配值, 分别为: 曲率半径为 1 个光圈, 透镜厚度和空气间隔均设定为 0.02 mm, 表面和元件偏心及倾斜均分别为 0.01 mm 和 0.01°, 非球面表面不规则度采用 S+A 不规则度进行分析。该值设定为 0.5 光圈, 折射率和阿贝数公差分别设置为 0.0002 和 0.5%。

运行 100 个蒙特卡罗模拟, 其模拟后得到的生产过程产品的良率预估曲线图如图 8 所示。从图 8 中可以得出, 10%、20%、50%、80% 和 90% 的样本 MTF 值分别为 0.38、0.37、0.35、0.26、0.19, 满足系统成像质量设计要求, 表明系统具有较好的可实现性。

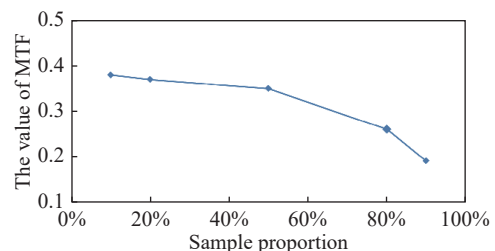


图 8 良率预估曲线图

Fig. 8 Yield estimate curve

5 结论

本文以四片式天塞物镜为设计基础结构, 应用三阶像差理论分析了系统初始结构部分光学参

数求解方法,并利用光学设计软件 Zemax 对系统像差进行深入分析及校正,最终设计了一款大孔径、宽光谱且焦距较长的 THz 波光学成像系统。它采用了两种较为普遍的 CsBr 和 KRS-5 晶体作为透镜材料进行合理搭配,不断优化光学结构参数,使得系统像差校正完全,成像性能较好。另外,该系统各种加工及装调公差合适,易于实现。

因此,设计的光学成像系统不仅孔径大、工作波长范围较宽、焦距较长、结构简单紧凑而且可加工性较好,能广泛应用于安全检测、航空航天探测等方面,具有较好的实际应用价值。本文研究的 THz 波光学成像系统设计方法对具有类似系统结构及成像特点的光学系统设计提供了一种有效指导方法。

参考文献:

- [1] 金钻明,郭颖钰,季秉煜,等.超快太赫兹自旋光电子学研究进展(特邀)[J].*光子学报*,2022,51(7):0751410.
JIN Z M, GUO Y Y, JI B Y, *et al.*. Development of ultrafast spin-based terahertz photonics (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 0751410. (in Chinese).
- [2] 郑江鹏,余平,赵萌,等.利用低信噪比小样本太赫兹光谱实现心肌淀粉样变检测[J].*中国光学*,2022,15(3):443-453.
ZHENG J P, YU P, ZHAO M, *et al.*. Detection of myocardial amyloidosis by a small number of terahertz spectra with low signal-to-noise ratio[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 443-453. (in Chinese).
- [3] 马卿效,李春,李天莹,等.基于太赫兹光谱和机器学习算法的二元及三元混合物定量分析[J].*激光与光电子学进展*,2022,59(19):1930003.
MA Q X, LI CH, LI T Y, *et al.*. Quantitative analysis of binary and ternary mixtures based on Terahertz spectroscopy and machine learning algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(19): 1930003. (in Chinese).
- [4] 卢雪晶,葛宏义,蒋玉英,等.太赫兹技术在农产品检测中的应用研究进展[J].*光谱学与光谱分析*,2022,42(11):3330-3335.
LU X J, GE H Y, JIANG Y Y, *et al.*. Application progress of Terahertz technology in agriculture detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(11): 3330-3335. (in Chinese).
- [5] 胡军,刘燕德,孙旭东,等.基于BP神经网络的太赫兹时域光谱对面粉中苯甲酸的定量检测研究[J].*激光与光电子学进展*,2020,57(7):302-308.
HU J, LIU Y D, SUN X D, *et al.*. Quantitative determination of benzoic acid in flour based on Terahertz time-domain spectroscopy and BPNN model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 302-308. (in Chinese).
- [6] 王华泽,吴晗平,吕照顺,等.太赫兹成像系统分析及其相关技术研究[J].*红外技术*,2013,35(7):391-397.
WANG H Z, WU H P, LV ZH SH, *et al.*. Research on THz imaging system and related technologies[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(7): 391-397. (in Chinese).
- [7] 曹恩达,于勇,宋长波,等.一种手持式太赫兹探测系统的光学及结构设计[J].*遥测遥控*,2020,41(2):1-9.
CAO E D, YU Y, SONG CH B, *et al.*. An optical and structural design of a hand-held Terahertz detection system based on ZEMAX and ProE[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2020, 41(2): 1-9. (in Chinese).
- [8] 耿贺彬,李超.一种太赫兹透镜优化方法[J].*电子测量技术*,2020,43(8):159-165,188. (in Chinese).
GENG H B, LI CH. Optimization approach for Terahertz lens[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(8): 159-165, 188.
- [9] 杨旭,牟达,陈炳旭,等.基于太赫兹波段的三反变焦系统设计[J].*长春理工大学学报(自然科学版)*,2021,44(1):1-6.
YANG X, MU D, CHEN B X, *et al.*. Design of three reflective zoom system based on Terahertz band[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 44(1): 1-6. (in Chinese).
- [10] 李志雷,刘海峰,池威威,等.基于太赫兹光谱技术的光学系统设计及应用[J].*应用光学*,2022,43(3):409-414.
LI ZH L, LIU H F, CHI W W, *et al.*. Design and application of optical system based on Terahertz spectroscopy technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 409-414. (in Chinese).
- [11] 宋菲君,陈笑,刘畅.近代光学系统设计概论[M].北京:科学出版社,2019.
SONG F J, CHEN X, LIU CH. *An Introduction to the Modern Optical System Design*[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese).

- [12] 李梅. 15~38 μm 太赫兹波成像光学系统设计研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2006.
LI M. Design study of 15-38 μm THz spectrum wave band imaging optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006. (in Chinese).
- [13] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University, 2005.
- [14] 史光辉. 用高斯光学和三级像差理论求变焦距物镜的初始解 [J]. *中国光学*, 2018, 11(6): 1047-1060.
SHI G H. Find preliminary solution of zoom objective lens using Gaussian optics and third-order aberration theory [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 1047-1060. (in Chinese).
- [15] 沈志娟, 曹一青. 大相对孔径长焦距同轴折反射式望远物镜设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(1): 0108002.
SHEN ZH J, CAO Y Q. Design of a coaxial catadioptric telescope objective with a large relative aperture and long focal length [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1): 0108002. (in Chinese).
- [16] 曹桂丽, 刘芳芳, 贾永丹, 等. 大相对孔径、长焦距的紫外告警光学系统设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 122203.
CAO G L, LIU F F, JIA Y D, *et al.*. Design of ultraviolet warning optical system with large relative aperture and long focal length [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 122203. (in Chinese).
- [17] 李康, 周峰, 王保华, 等. 制冷型被动式消热差红外光学系统设计 [J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(4): 853-860.
LI K, ZHOU F, WANG B H, *et al.*. Passive athermalization design of a cooled infrared optical system [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 853-860. (in Chinese).

作者简介:



曹一青(1987—), 男, 江西九江人, 博士研究生, 讲师, 硕士生导师, 2018年于上海大学获得博士学位, 主要从事光学成像系统像差分析及智能优化设计方法等方面研究。E-mail: caoyiqing1987@163.com