

文章编号: 1672-8785(2014)02-0017-04

50 ~ 100 μm 太赫兹成像物镜设计

朱海宇 张鸿佳 王文生 *

(长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘 要: 根据太赫兹探测成像用户的需求, 设计了一种适用于太赫兹波段的光学系统。其焦距为 50 mm, F 数为 1, 工作波段为 50 ~ 100 μm , 接收器为非致冷型 IRM160A 红外探测器, 全视场角为 11.9°。该系统采用共轴式结构, 由 3 片球面透镜和 1 片 CCD 保护玻璃组成, 并使用了 Topas COC 新型材料。另外还引入了 1 个非球面, 以实现系统结构简单、重量轻和成本低的目标。设计结果表明, 当截止频率为 10 cy/mm 时, 该光学系统的调制传递函数接近衍射极限, 各个视场的点列图均方根半径均远小于艾里斑半径, 并具有良好的成像质量, 因此能够满足太赫兹光学系统的总体设计要求。

关键词: 太赫兹; 成像系统; 共轴球面; Topas 环烯烃共聚物

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.02.003

Design of 50–100 μm Terahertz Imaging Lens

ZHU Hai-yu, ZHANG Hong-jia, WANG Wen-sheng *

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: According to the requirements of THz imaging detection, an optical system suitable for the THz waveband is designed. The optical system has a focal length of 50 mm, a F number of 1, an operation waveband from 50 μm to 100 μm and a full field of view of 11.9°. Its receiver is an uncooled IRM160A infrared detector. In the system, a coaxial structure consisted of three spherical lenses and a piece of glass for protecting a CCD is used. A new material Topas COC is used. In addition, to meet the requirements of simplicity, low weight and low cost, an aspheric surface is also introduced. The design result shows that at a cut-off frequency of 10 cy/mm, the optical system has a modulation transfer function close to the diffraction limited curve. In each field of view, the RMS radii of the spot diagrams are far less than the airy disk radius. Its imaging quality is good. So it can meet the overall design requirements of a THz optical system.

Key words: terahertz; imaging system; coaxial sphere; Topas COC

0 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是指频率在 0.1 ~ 10 THz 范围内的电磁波。它在长波段与毫米波重合, 在短波段与红外线重合, 属于远红外线和

亚毫米波的范畴。THz 波的出现填补了毫米波波段与红外波段之间的空白。THz 波的波带位置使其具有一系列特殊的成像性质: (1) 光子能量比 X 射线和 γ 射线低得多, 对人体或其他生物的细胞组织不会产生破坏作用; (2) 信噪比高;

收稿日期: 2014-01-03

基金项目: 总装备部预研局“十二五”基金项目 (5131××××05)

作者简介: 朱海宇 (1989-), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事光学设计与光学仪器等方面的研究。

E-mail: llzhuhaiyu@163.com

* **通讯作者:** 王文生, 男, 教授, 主要研究方向为现代光学测试技术和现代光学设计。E-mail: wwsciom@163.com

(3) THz 辐射能够以很小的衰减穿透陶瓷、布料和塑料等物质,适用于低浓度气体探测和环境监测;(4) THz 波在太空环境中很少被吸收,传播距离很远,适用于天文观测;(5) THz 波不仅比毫米波具有更好的方向性和更高的空间分辨率,而且还比红外光具有更大的带宽和容量,因此在军事和通信领域具有广阔的应用前景^[1]。

根据结构形式的不同,THz 光学系统主要可以分为反射式、折射式和折反式三种^[2]。其中,反射式 THz 光学系统又可分为同轴反射式和离轴反射式两种。同轴反射式系统能够较好地校正球差和彗差,但是其视场较小,并且存在中心遮拦会导致能量损失的问题,从而不利于对微弱信号的探测。文献[3]设计的 THz 光学系统属于离轴三反射式光学系统。该系统具有通光孔径大、视场大、无中心遮拦以及对波长无选择性等特点,比较有利于对微弱信号的探测。但是其光机结构比较复杂,加工装调比较困难,制作成本也较高。文献[4]设计的 THz 光学成像系统属于折射式系统,具有结构简单紧凑、体积小巧、制作成本低廉以及加工装调工艺成熟等特点。但是其视场较小,而且透镜材料为溴化铯-碘化铯(KRS-5)。该材料在 30 ~ 40 μm 波段的透过率约为 60%,超过 40 μm 以后的透过率下降较快;当波段接近 70 μm 时,透过率几乎降为 0。因此,KRS-5 材料在 THz 波段的使用范围较窄。同时,这种系统使用的探测器也未投入实际生产,因此不易实现。另外,文献[4]中还提到了一个工作波段为 12 ~ 26 μm 的空间相机。该相机的光学系统也属于折射式系统。它由 5 片透镜组成,结构复杂,而且也使用了 KRS-5 材料。文献[5]设计的 THz 面阵透射成像系统属于折反式系统,它由多个离轴抛面镜和聚乙烯透镜组成。该系统成像速度快,像素多,但是工艺复杂,不宜装调,误差较大,制作成本较高。

本文设计采用共轴式结构,由 3 片球面透镜组成,并引入了 1 个非球面;使用 Topas COC 新型材料以及高效的实用化 THz 探测器,并对 50 ~ 100 μm THz 波段进行了设计。该系统也可将波长延伸到 200 μm ,而且成像质量依旧良好,

性能稳定,并具有可消除各种像差、结构简单、重量轻以及易于装调等特点。

1 THz 成像系统

1.1 THz 成像系统的探测原理

利用 THz 源产生的已知 THz 波作为成像光束。经被测目标反射或透射后,该 THz 波便记录下相关光谱信息(包括复介电常数强度、振幅以及相位的空间分布信息)或目标自身辐射载有的目标信息^[6]。经过 THz 光学系统后,在斩波器的作用下,该 THz 波被聚焦到 THz 探测器上并引发其发生相应变化。然后根据不同的变化将其转换为对应的电信号响应,最终经过信号采集、分析和处理,得到目标的二维或三维图像^[2]。

THz 成像系统由 THz 光源、被测目标、THz 光学系统、THz 探测器、数据采集模块、数据处理模块、数据存储模块以及显示器等几部分组成。图 1 为 THz 成像系统的组成框图。

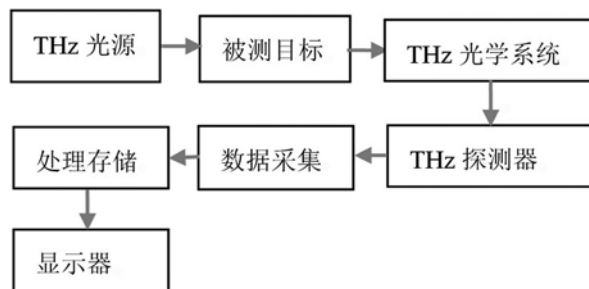


图 1 THz 成像系统的组成框图

在整个 THz 成像系统中,最关键的部分是 THz 光学系统。故其在设计中应该满足以下要求:(1) 结构小巧,易于装调;(2) 满足视场角的要求;(3) 在所选波段内光能损失最小;(4) 具有较强的环境适应能力,光学性能稳定。

1.2 与其他成像技术的比较

THz 波属于远红外线和亚毫米波的范畴,其成像技术已经成为红外成像和毫米波成像技术的有力补充。表 1 列出了各种成像技术的对比情况。

2 太赫兹光学系统设计

2.1 光学系统的技术指标

根据用户的实际需求,我们确定了此系统

表 1 各种成像技术的对比情况

成像方式	波长 / μm	成像系统的优点	成像系统的缺点
红外成像	$0.76 \sim 10^3$	抗干扰能力强; 可夜间工作; 伪装识别能力强; 对地扫描快	对冷目标的成像质量较差; 穿透力弱; 环境适应性不强; 成本高
THz 成像	$30 \sim 3 \times 10^3$	抗干扰能力强; 可全天工作; 成像安全; 穿透能力强, 成像速度快	成像质量不够高; 欠缺高效、实用的辐射源; 探测器和透镜材料稀缺
毫米波成像	$10^3 \sim 10^4$	抗干扰能力强; 可对小目标进行远距离成像; 具有一定的穿透能力	存在绕射现象; 分辨率和实时性不够高; 体积大

的技术参量: 焦距为 50 mm; F 数为 1; 工作波段为 50 ~ 100 μm 。选用的接收器为非致冷型 IRM160A 红外探测器, 外形尺寸为 8.32 mm × 6.24 mm, 像元尺寸为 52 μm × 52 μm , 全视场角为 11.9°。

2.2 光学系统的材料选取

在 THz 波段具有良好透射性的材料比较少, 目前主要有高阻硅和塑料两类。其中, 塑料主要包括高密度聚乙烯 (High Density Polyethylene, HDPE) 和聚四氟乙烯 (Polytetrafluoroethylene, PTFE) 等。本文使用了一种新型材料——环烯烃类共聚物 (Cyclic Olefin Copolymer, COC), 其商品名为 Topas COC。与高阻硅相比, Topas COC 的折射率较低, 其透镜在电介面处具有很低的反射损耗^[7]。与 HDPE 和 PTFE 相比, Topas COC 在 THz 波段具有更低的损耗以及可忽略不计的色散。这种光学材料具有众多良好的表现: 在全光谱范围内都有极高的透射率、低双折射系数、极低的吸水率以及较高的阿贝数等; 同时具有较好的耐热性、较低的热膨胀系数、较稳定的化学性能以及较优良的机械特性等^[8]。

2.3 初始结构选取

根据一个单透镜所能承受的角偏差极限以及本系统的技术指标, 该系统至少需要 3 片透镜才能满足设计要求。通过查找相应文献, 我们选择图 2 所示的 3 片式初始结构。

2.4 设计过程分析

使用 ZEMAX 光学设计软件对初始结构进行优化。通过设置使光阑与第一个面重合。由于光阑与透镜相重合, 不仅能较好地校正太赫兹光学系统的畸变和倍率色差, 而且还能有效地

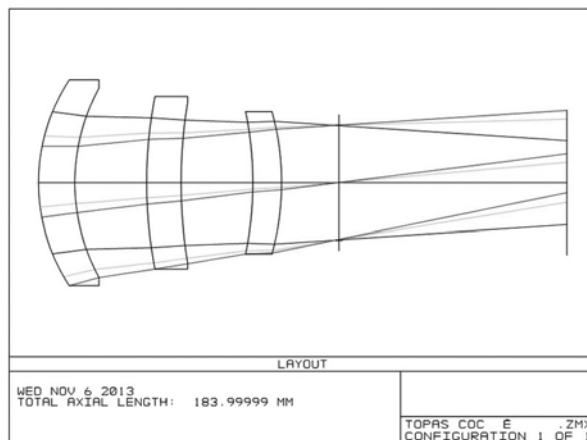


图 2 光学系统的初始结构

减小透镜直径和系统尺寸。CCD 前面的保护玻璃会产生除场曲以外的所有像差, 校正像差时应将其与 3 个透镜一起进行校正。下面分析系统各面的像差贡献。先将像差贡献较大的表面的曲率半径设为变量并对其进行优化, 然后逐步增加变量个数, 并对其进行相互补偿。通过自动优化和人为调校的方法, 让系统跳出小范围内的最优值。经过多次优化后, 分析此时系统的像差情况。为了提高成像质量和简化结构, 我们决定在设计中引入非球面。这里, 非球面最主要的作用是控制球差。优化后得到偶次非球面的 2、4、6、8 次相位系数分别为 -7.289×10^{-3} 、 2.299×10^{-6} 、 -8.002×10^{-10} 、 4.331×10^{-14} 。

2.5 设计结果

对系统进行反复优化后, 最终得到了高性能 THz 成像物镜 (其结构见图 3)。该系统由 3 片球面透镜和一片 CCD 保护玻璃组成, 其中第一个面引用非球面, 保护玻璃的厚度为 1.5 mm。优化后光学系统的焦距为 50 mm, F 数为 1, 全视场角为 11.9°, 满足实际应用需求。

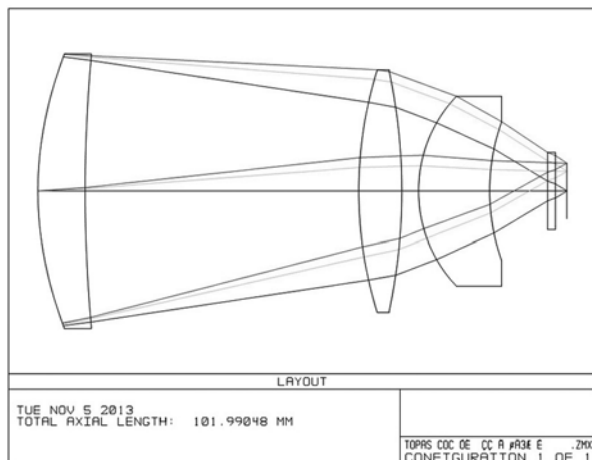


图 3 光学系统的结构图

将设计的 THz 成像系统的焦距由 50 mm 缩放至 30 mm 或 70 mm 时, 整个系统的成像质量依旧良好。同时, 将此系统的工作波段由 50 ~ 100 μm 延伸到 200 μm 时, 依旧满足成像要求。

光学系统通常以调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 作为评价成像质量的主要手段。图 4 所示为 THz 光学系统的 MTF。根据探测器的像元尺寸 (52 $\mu\text{m} \times 52 \mu\text{m}$), 可以计算出相对应的空间截止频率为 10 cy/mm。从图 4 中可以看出, 当截止频率为 10 cy/mm 时, 该传递函数接近衍射极限, 说明成像质量良好。

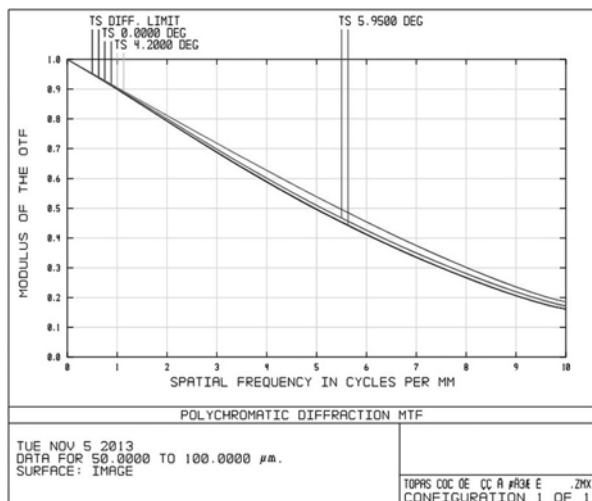


图 4 光学系统的 MTF

图 5 为 THz 光学系统的点列图。其中, 各视场弥散斑的均方根半径分别为 31.463、16.950 和 27.072, 均远小于理想光学系统的艾里斑半径

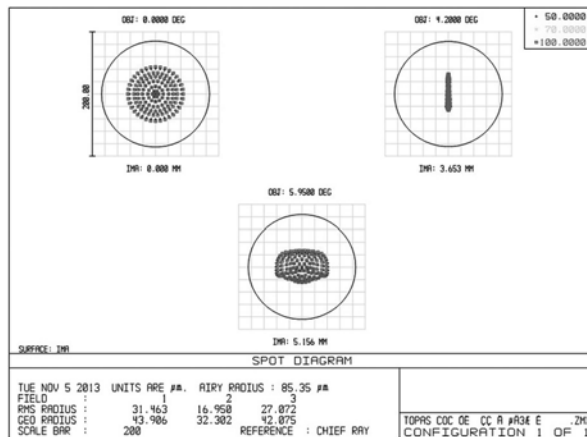


图 5 光学系统的点列图

(85.35), 满足系统的使用要求。

由于畸变是主光线像差, 利用 MTF 不能评价系统的畸变, 故需对畸变进行单独分析。一般光学系统的畸变应小于 5%, 本系统的畸变小于 2% (见图 6), 说明该系统的畸变完全满足成像要求。

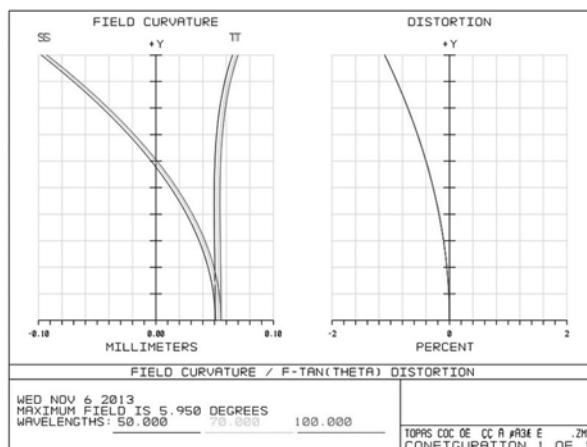


图 6 光学系统的畸变

根据设计要求, 用 MTF 对该镜头的像质进行了评价, 并在 20 $^{\circ}\text{C}$ 温度和一个大气压的条件下获得了测试结果。Topas COC 具有优良的光学性能。当温度在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化时, 其折射率不变, 镜头的 MTF 仍属优良。

3 结束语

本文针对用户需求设计了一种高性能 THz 成像系统。该系统仅由 3 片球面透镜和 1 片 CCD 保护玻璃组成, 具有结构简单和重量轻等特点。

(下转第 25 页)