

基于 Tracepro 的太赫兹探测阵列光学镜头设计

闫 森,王 军,杨 明,吴志明,蒋亚东
(电子科技大学光电信息学院,四川 成都 610054)

摘要:太赫兹探测成像技术是一种新兴的、极具发展前景的探测技术。为了满足太赫兹探测阵列的成像要求,设计了一种结构紧凑的折射型光学镜头,并采用 Tracepro 软件对该光学镜头轴上及离轴无穷远点在焦平面的成像情况进行了模拟仿真,优化了光学镜头结构参数。设计的光学镜头采用 HRFZ-Si 作透镜材料,并在透镜表面涂覆 parylene 抗反薄膜,其焦距为 26.2 mm,视场角为 16.3°,相对孔径为 1.9:1,分辨率为 20 lp/mm。

关键词:太赫兹;探测阵列;Tracepro;光学镜头

中图分类号: O435.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.019

Design of optical lens for terahertz detector array using Tracepro

YAN Miao, WANG Jun, YANG Ming, WU Zhi-ming, JIANG Ya-dong

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Terahertz imaging technology is a rising detection technology with great development prospects. In order to satisfy the requirement for terahertz detector array imaging, a compact refractive optical lens is designed. The lens material is HRFZ-Si with a parylene anti-reflection coating on the surface. The imaging on the focal plane of the point at infinity on the axis and off axis through the optical lens is simulated by using Tracepro software, and the structural parameters of the optical lens are optimized. The optimizing lens simulation results indicate that the focal length of the optical lens is 26.2mm, the field angle is 16.3°, the relative aperture is 1.9:1 and the resolution is 20 lp/mm.

Key words: terahertz; detector array; Tracepro; optical lens

1 引言

太赫兹(terahertz)波处于电子学与光子学之间的过渡区,其表现出的独特性质引起了科学界越来越浓厚的兴趣^[1-2]。太赫兹探测成像是太赫兹技术应用的重要方向^[3-4]。非制冷阵列热探测器具有低成本、轻便、可靠及宽频带的特性^[5],美国、日本、加拿大等多国的研究机构将其作为太赫兹探测器研究的重点^[6-8]。Tracepro 是一套普遍适用于照明系统、光学分析、辐射度分析及光度分析等的光学设计及仿真软件^[9]。

本文根据应用光学基础理论,为探测阵列规模 80×60,探测像元尺寸 75 μm 的太赫兹探测阵列设计了一种折射型光学镜头。应用 Tracepro 光学仿真软件对无穷远点通过设计的光学镜头在焦平面上的

成像情况进行模拟仿真,优化了光学镜头的结构参数。

2 光学结构设计

太赫兹微测辐射热计的光学镜头结构设计一般有三种:反射型、折射型、反射—折射型,三种光学结构示意图如图 1 所示。反射型结构的优点是不用考虑太赫兹波穿过材料时的透过率,只需要考虑具有高反射率的材料(表面镀金的反射镜对太赫兹波具有将近 100% 的反射率)。但是对于应具有相对较大的视场角及较小的光圈系数的探测光学结构,采

基金项目:国家自然科学基金(No. 61006036);教育部新世纪优秀人才计划(No. NCET-10-0299)资助。

作者简介:闫 森(1987-),男,硕士研究生,主要从事 THz 微测辐射热计方面的研究。E-mail: ueoewj@gmail.com

收稿日期: 2013-08-29; **修订日期:** 2013-09-24

取反射型设计很难校正其产生的像差。折射型结构的优点是可以通过对光学元件尺寸的调节而对像差进行较好的校正,但是会受到光学元件对太赫兹波透过率的制约。反射—折射型结构既可以对像差进行较好的校正,同时其透过率高于折射型结构(太赫兹波穿过光学元件的数目少于折射型结构),但是其结构相对复杂^[10]。本着在满足要求的前提下光学结构尽量简单的原则,同时反射—折射型结构的太赫兹波透过率相较于折射型结构并没有质的提升,因此选取折射型结构作为太赫兹微测辐射热计光学镜头的基本结构。

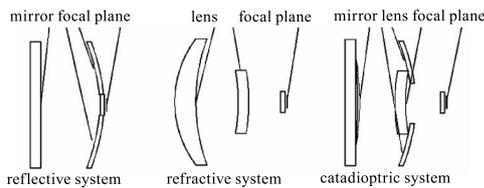


图1 三种光学结构(反射型、折射型、反射—折射型)示意图

Fig. 1 Three optical structures

(reflective system, refractive system, catadioptric system)

2.1 光学元件材料选取

折射型结构会受到光学元件对太赫兹波透过率的制约,因此太赫兹探测阵列光学结构的设计应选取对太赫兹波吸收率低、透过率高的材料作为透镜材料,并增加有效的抗反膜以降低太赫兹波在透镜表面的反射。

大多数材料对太赫兹波都具有较高的吸收率,但一些聚合物表现出较好的透过性,如TPX(聚4-甲基戊烯-1),HDPE(高密度聚乙烯),Picarin(聚四氟乙烯)等。这些聚合物材料的吸收率在4%/mm左右,要保障较高的太赫兹波透过率必须使用厚度较薄的透镜(一般2~3 mm),否则将会有较大的损耗(10 mm厚度约损耗40%)。同时这些聚合物的折射率在1.5左右,较小的折射率与较薄的透镜厚度将限制像差的校正。要达到成像质量的要求只有增加透镜的数目,这增加了光学结构的复杂性,同时也增大了太赫兹波的损耗。

另一种在太赫兹波段表现出优良性能的材料是高阻浮区硅(HRFZ-Si),其吸收率在0.2%/mm~1%/mm之间。低的吸收率允许较厚的透镜厚度。HRFZ-Si的折射率在3.4左右,大的折射率与较厚的透镜厚度可以方便校正像差,双透镜结构可以满足像质要求。但是HRFZ-Si的折射率较大,其表面反射率也较大,太赫兹波的透过率反而较低,其透过率与反射率如图2所示^[11]。

为增加太赫兹波的透过率,减小其反射率,需要

在HRFZ-Si表面涂覆有效的抗反膜。parlyene(聚对二甲苯)薄膜可以有效地降低透镜表面THz波的反射率,是一种有效的抗反膜。涂覆了parlyene抗反膜的透镜透过率可以由涂覆前的50%~60%提升到80%~90%。

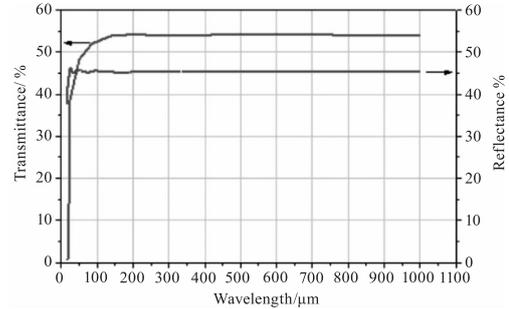


图2 太赫兹波段5mm厚HRFZ-Si透过率与反射率

Fig. 2 Transmission and reflection of HRFZ-Si 5mm-thick sample in THz range

因此选取HRFZ-Si作为折射型光学镜头透镜的材料,并在其表面涂覆parlyene抗反膜以增强太赫兹波的透过率。

2.2 光学结构参数设计

描述光学结构特性的主要参数有四种:焦距 f' ,相对孔径 D/f' ,视场角 2ω 以及分辨率 N 。焦距决定物像的比例,相对孔径决定像平面的光照度,视场角决定成像的空间范围,分辨率表示分辨被测物细节的能力^[12]。

视场角决定了成像的空间范围,它由探测器的感光尺寸及光学结构的焦距决定,视场角为:

$$\tan\omega = y'_{\max}/2f' \quad (1)$$

其中, y'_{\max} 为探测阵列对角线的长度。

本文设计的太赫兹探测阵列大小为 80×60 ,探测像元尺寸为 $75 \mu\text{m}$,因此。视场角 2ω 要达到 15° 的要求,焦距 f' 应满足:

$$f' \leq y'_{\max}/2\tan\omega = 28.484 \text{ mm} \quad (2)$$

光学结构的分辨率应大于探测阵列的分辨率,该探测器探测频点在3 THz左右,即波长 $\lambda = 100 \mu\text{m}$,则根据瑞利判据:

$$N = D/(1.22\lambda f') \quad (3)$$

入瞳直径 D 应满足:

$$N = 8.2D/f' \geq 1000/75 \quad (4)$$

$$D \geq 1.626f' = 45.528 \text{ mm} \quad (5)$$

相对孔径决定像平面的光照度,相对孔径越大,到达探测阵列的光能量越强。根据光度学理论,轴上像点的照度公式为:

$$E'_0 = \frac{\pi\tau L}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \quad (6)$$

其中, L 为被测物体的亮度; τ 为光学结构的透射比。太赫兹源的能量比较弱, 因此需要大的相对孔径, 与分辨率的光学结构尺寸要求相符合。

折射型光学结构采用图 1 中所示的双透镜结构, 第一块透镜为凸凹透镜, 汇聚被测物发出的光束并成像, 第二块透镜为同心弯月形透镜, 用于校正像差, 第三块为太赫兹波入射窗口, 用于封装及保护探测器。设定两块透镜的初始结构尺寸应使其满足上述光学结构参数限定。根据厚透镜基点位置与焦距公式^[13]:

$$l_H' = \frac{-r_2 d}{n(r_2 - r_1) + (n - 1)d} \quad (7)$$

$$l_H = \frac{-r_1 d}{n(r_2 - r_1) + (n - 1)d} \quad (8)$$

$$f' = \frac{nr_1 r_2}{(n - 1)[n(r_2 - r_1) + (n - 1)d]} = -f \quad (9)$$

其中, l_H' 与 l_H 分别为厚透镜像方基点位置与物方基点位置; f' 与 f 分别为厚透镜像方焦距与物方焦距; r_1 与 r_2 分别为厚透镜前表面曲率半径与后表面曲率半径; n 为厚透镜材料的折射率; d 为透镜厚度。

双光组复合像方公式:

$$f' = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2' - d} \quad (10)$$

$$l_H' = -f' \frac{d}{f_1'} \quad (11)$$

$$l_F' = f'(1 - \frac{d}{f_1'}) \quad (12)$$

其中, f' 为双光组像方焦距; l_H' 为双光组像方基点位置; l_F' 为双光组像方焦点位置, f_1' 与 f_2' 分别为双光组中第一块透镜与第二块透镜的像方焦距; d 为第一块透镜与第二块透镜的间距。

当 $\lambda = 100 \mu\text{m}$ 时, HRFZ-Si 的折射率约为 3.422, 可以得到探测光学结构的初始结构:

第一块凸凹透镜: 前后两面的曲率半径 $r_{11} = 40 \text{ mm}$, $r_{12} = 97 \text{ mm}$, 透镜厚度 $d_1 = 10 \text{ mm}$, 焦距 $f_1' = 25 \text{ mm}$, 直径 $D_1 = 50 \text{ mm}$;

第二块同心弯月透镜: 前后两面的曲率半径 $r_{21} = -100 \text{ mm}$, $r_{22} = -105 \text{ mm}$, 透镜厚度 $d_2 = 5 \text{ mm}$, 焦距 $f_2' = -2967 \text{ mm}$, 直径 $D_2 = 30 \text{ mm}$;

第一块透镜的后表面与第二块透镜的前表面距离 $d_{12} = 10 \text{ mm}$;

第三块为两面为平面的 THz 波入射窗口, 厚度 $d_3 = 2 \text{ mm}$, 直径 $D_3 = 15 \text{ mm}$;

第二块透镜的后表面与第三块透镜的前表面距离 $d_{23} = 8 \text{ mm}$;

焦平面与第三块透镜后表面的距离 $d_{34} = 1 \text{ mm}$;

系统焦距 $f' = 26 \text{ mm}$, 视场角 $2\omega = 16.4^\circ$ 。

3 光学结构仿真与优化

基于以上设计, 在 Tracepro 中建立光学镜头模型, 如图 3 所示。

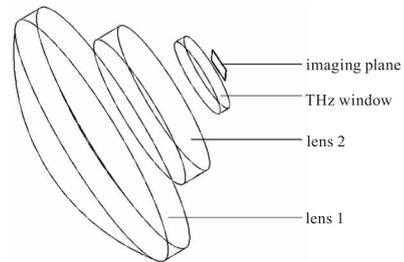
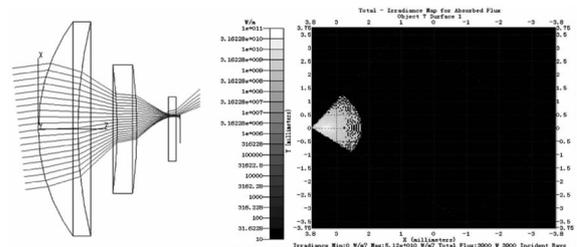


图 3 光学镜头模型示意图

Fig. 3 Model of Optical lens

利用 Tracepro 中的 Grid Raytrace 对所建立的模型进行光线追迹, 为观察焦平面上的照度细节, 设定照度以对数刻度值显示, 仿真结果如图 4 所示。



(a) 无穷远处轴外点的光线追迹

(b) 焦平面上的光照度图

(a) Ray tracing of point at infinity off axis

(b) Irradiance map on the focal plane

图 4 仿真结果

Fig. 4 Simulation Results

图 4 反应了无穷远处的轴外点发出的光线经过所设计的光学镜头在焦平面上的成像情况。可以看出无穷远点发出的光线经过所设计的光学镜头会汇聚到焦平面上, 但由于像差的影响, 在焦平面上并未汇聚到一点, 而是形成了一个弥散斑。弥散斑的有效半径为 $75 \mu\text{m}$, 光学分辨率小于探测阵列的分辨率, 这就要求对所设计的光学镜头结构参数进行优化, 提高成像质量。图 4 所示轴外点发出光线的入射角为 ω (即视场角的一半), 它可以汇聚在探测阵列上, 只是由于像差, 有一部分光线溢出了探测阵列。这说明所设计的光学结构是满足视场角的要求的。

通过调节各光学元件的尺寸与位置可以优化所设计的光学镜头。

太赫兹入射窗口为两面为平面的透镜,它会引入像差,并且越厚引入的像差越大,因此窗口越薄越好。但考虑到实际加工与封装,将原本 2 mm 厚的窗口减为 1 mm。窗口减薄后光线汇聚将更集中于焦点,弥散斑有效半径也将更小。

考虑无穷远处轴外一点在焦平面上的像,通过调节第一块凸凹透镜与第二块同心弯月透镜的尺寸与位置提高成像质量。优化得到一组成像质量较好的光学结构参数:

第一块凸凹透镜:前后两面的曲率半径 $r_{11} = 45 \text{ mm}$, $r_{12} = 147.67 \text{ mm}$,透镜厚度 $d_1 = 10 \text{ mm}$,焦距 $f_1' = 25 \text{ mm}$,直径 $D_1 = 50 \text{ mm}$;

第二块同心弯月透镜:前后两面的曲率半径 $r_{21} = -80 \text{ mm}$, $r_{22} = -85 \text{ mm}$,透镜厚度 $d_2 = 5 \text{ mm}$,焦距 $f_2' = -1921.5 \text{ mm}$,直径 $D_2 = 30 \text{ mm}$;

第一块透镜的后表面与第二块透镜的前表面距离 $d_{12} = 10 \text{ mm}$;

第三块为两面为平面的 THz 波入射窗口,厚度 $d_3 = 1 \text{ mm}$,直径 $D_3 = 15 \text{ mm}$;

第二块透镜的后表面与第三块透镜的前表面距离 $d_{23} = 9 \text{ mm}$;

焦平面与第三块透镜后表面的距离 $d_{34} = 1.1 \text{ mm}$;

系统焦距 $f' = 26.2 \text{ mm}$,视场角 $2\omega = 16.3^\circ$ 。

优化前与优化后的结构及其焦平面上的成像情况对比如图 5 所示。

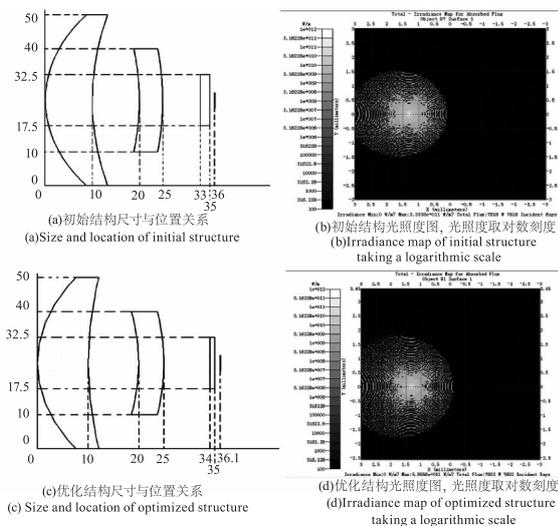


图 5 初始结构与优化结构及其成像情况对比

Fig. 5 Size location and imaging of initial structure and optimized structure

优化后的结构,虽然焦平面上的光线分布半径更大,但焦点附近集中的光线更多,偏离焦点的位置光线分布更稀松,功率密度更小,弥散斑的有效半径

由初始结构的 $75 \mu\text{m}$ 减到优化后的 $25 \mu\text{m}$ 。光学镜头的分辨率由 6.67 lp/mm 提升到 20 lp/mm ,由小于探测阵列的分辨率优化到大于其分辨率,满足了设计要求。

探测器探测范围为 1 m 到无穷,因此需要设定调焦范围。根据透镜成像的高斯公式:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \tag{13}$$

无穷远点的像点与 1 m 处点的像点距离相差 0.7 mm 。再考虑到透镜的加工误差及封装时的装配误差,设定透镜的调焦范围为 4 mm 。

4 结论

本文设计了一种适用于太赫兹探测阵列的折射型光学镜头,并利用 Tracepro 软件对所设计的光学镜头进行了模拟,优化后得到了较好的尺寸参数。所设计的光学镜头视场角为 16.3° ,分辨率为 20 lp/mm ,可以满足太赫兹探测阵列的成像要求。但是对于更大阵列、更小探测单元的太赫兹探测阵列,所设计的光学结构可能会形成制约,需要做进一步改进。采用非球面透镜可进一步改善像差,提高光学镜头的成像质量。

参考文献:

[1] YAO Jianquan, LU Yang, ZHANG Baigang, et al. New research progress of THz Radiation[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(4): 503 - 510. (in Chinese)
姚建铨, 路洋, 张百刚, 等. THz 辐射的研究和应用新进展[J]. 光电子·激光, 2005, 16(4): 503 - 510.

[2] LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481 - 486. (in Chinese)
刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481 - 486.

[3] ZHANG Lei, XU Xinlong, LI Fuli. Review of the progress of T-ray imaging [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(2): 129 - 134. (in Chinese)
张蕾, 徐新龙, 李福利. 太赫兹 (THz) 成像的进展概况 [J]. 量子电子学报, 2005, 22(2): 129 - 134.

[4] YANG Yang, YANG Ruichen, YANG Yang. Research of the domestic terahertz target characteristics [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(7): 726 - 731. (in Chinese)
杨洋, 杨瑞臣, 杨洋(女). 国内太赫兹目标特性的研究概况 [J]. 激光与红外, 2013, 43(7): 726 - 731.

[5] R K Bhan, R S Saxena, C R Jalwania, et al. Uncooled infrared microbolometer arrays and their characterization

- techniques[J]. Defence Science Journal, 2009, 59(6): 580-589.
- [6] H Oulachgar, L Marchese, C Alain, et al. Development of MEMS microbolometer detector for THz applications[J]. IEEE, Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2010, 9: 1-2, 978-1-4244-6657-3.
- [7] Naoki Oda, Hajime Yoneyama, Tokuhito Sasaki, et al. Detection of terahertz radiation from quantum cascade laser, using vanadium oxide microbolometer focal plane arrays [J]. Proc. of SPIE, 2008, 6940: 69402Y-1.
- [8] Barry N Behnken, Gamani Karunasiri, Danielle Chamberlin, et al. Optimization of a 3.6-THz quantum cascade laser for real-time imaging with a microbolometer focal plane array[J]. Proc. of SPIE, 2008, 6893: 68903L-1.
- [9] AN Yupeng, WANG Yiding, LI Li, et al. Design of the optical structure of the mid-infrared gas sensing system by using the TracePro[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(11): 1198-1202. (in Chinese)
- 安宇鹏, 王一丁, 李黎, 等. 采用 TracePro 进行中红外气体检测系统的光路结构设计[J]. 激光与红外, 2009, 39(11): 1198-1202.
- [10] Timothy Pope, Michel Doucet, Fabien Dupont, et al. Uncooled detector, optics, and camera development for THz imaging[J]. Proc. of SPIE Vol. 7311 73110L(2009).
- [11] <http://www.tydexoptics.com/>
- [12] CHI Zeying, CHEN Wenjian. Applied optics and elements of optical design [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008: 358-368. (in Chinese)
- 迟泽英, 陈文建. 应用光学与光学设计基础[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008: 358-361.
- [13] YE Yutang, XIAO Jun, RAO Jianzhen. Optical course [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 36-47. (in Chinese)
- 叶玉堂, 肖峻, 饶建珍. 光学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 36-47.