Email:ycyk704@163.com TEL:010-68382327 010-68382557

一种手持式太赫兹探测系统的光学及结构设计*

曹恩达,于 勇,宋长波,赵一鸣 (北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要:随着现代安检技术与健康、隐私问题之间的矛盾愈加突出,人们迫切需要高效、便捷、安全的安检技术。 首先介绍太赫兹非成像光谱探测技术的原理,提出适合于安检应用的太赫兹光谱探测系统技术指标,然后基于 ZEMAX 设计出配合该技术指标的光学系统,采用非序列模式对其进行仿真和评价,最后基于 ProE 设计完成了配合上述光学 系统的紧凑型探测系统结构,实现了探测系统的手持式应用。

关键词:太赫兹;光谱探测;手持式;光学设计;结构设计 中图分类号:O439;TH74 文献标识码:A 文章编号:CN11-1780(2020)02-0001-09

An optical and structural design of a hand-held Terahertz detection system based on ZEMAX and ProE

CAO Enda, YU Yong, SONG Changbo, ZHAO Yiming

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: People need efficient, convenient and safe security inspection technology urgently, as the contradiction between modern security inspection technology and health privacy issues becomes more prominent. This article first introduces the principle of terahertz non-imaging spectral detection technology, proposes the technical indicators of the terahertz spectral detection system suitable for security applications, and then designs an optical system based on ZEMAX that matches the technical indicators, and uses non-sequential mode to simulate and Evaluation, finally based on ProE, completed the design of the compact detection system structure with the optical system, and realized the handheld application of the detection system.

Key words: Terahertz; Spectrum detection; Hand-held; Optical design; Configuration design

引 言

太赫兹 THz (Terahertz, 1THz=1000GHz)是波动频率单位之一。目前,普遍定义的太赫兹波频 率范围在 0.1THz~10THz 之间,波长范围为 0.03mm~3mm。太赫兹波是介于毫米波和远红外线之间的 电磁辐射^[1],在太赫兹物质特征光谱研究领域中,被广泛研究的太赫兹频段集中于 0.1THz~5THz 范围 内。由于大部分非极性材料不会明显地吸收太赫兹波,太赫兹波能够以很小的衰减穿透陶瓷、脂肪、 布料及塑料等物质^[2-5],因此,太赫兹辐射对于这些常用的覆盖材料有非常强的穿透能力;同时,由于 1THz 电磁辐射的单光子能量只有 4.1meV,远低于各种化学键的键能^[6],并非是有害的电离辐射,这 使采用太赫兹在公共场所进行安全检查方面具有非常好的应用前景。目前,国内外已经研究出多种太 赫兹成像系统,包括用于安检的太赫兹成像系统^[7-10]。

在安检领域中,THz 成像系统与 X 射线成像系统的安检原理类似,THz 成像系统仅解决了 X 光 机的电离辐射危害,并没有解决困扰毫米波和 X 射线安检技术应用的重大隐私问题(揭示了人体体 貌特征^[11],如图 1^[12]所示),导致 THz 成像系统在安检领域的应用同样受到限制。同时,为了保证太 赫兹成像质量,所采用的太赫兹光谱范围很窄,无法发挥太赫兹技术的频谱特征在物质成分鉴别上的 应用优势。要解决上述问题的较好办法是,采取 THz 非成像光谱扫描的模式。由于不再需要 THz 成 像,所采用的太赫兹光谱范围可以很大,足以覆盖物质特征指纹谱的范围。而且,也由于不再需要成 像,系统对像差几乎没有要求,所使用的光学系统可以采用透镜构成的折射系统来代替目前广泛研究 的反射太赫兹光学系统,而不用担心复杂的像差校正。这使得太赫兹光学系统可以发挥折射光学系统 的优势,实现系统的小型化,以用于手持式太赫兹光谱探测。



图 1 THz 成像技术的隐私问题 Fig. 1 The privacy issue of THz imaging technique

1 太赫兹非成像光谱探测原理

太赫兹非成像光谱探测原理示于图 2。利用光电导激发效应,使用 InGaAs 光电导半导体作为 THz

波发射和接收器的关键元件,而光学延迟线可 以连续地改变激光的光程,产生相位延迟。具 体过程如下:

将飞秒激光分束后,一束激光经熊猫型保 偏光纤(在严酷环境条件下保证稳定和可靠 性)后照射 THz 波发射器,通过光电导效应 激发 THz 波。THz 波照射探测目标,反射 THz 波携带物质特征信息被 THz 波接收器接收。





利用光学延迟线连续调制另一束飞秒激光到 Fig. 2 Schematic of THz non-imaging spectra detection

达 THz 波接收器的时间,快速扫描重建 THz 波电场。通过计算机对 THz 波形做傅里叶变换等算法处理,获得探测目标的物质指纹光谱。

2 太赫兹非成像光谱探测系统技术指标

考虑到在太赫兹物质特征光谱研究领域中, 广泛研究的太赫兹频段集中于 0.1THz~5THz 范围, 并 根据系统要求的光谱范围(≥3THz),为保证足够的信噪比,设定探测系统的工作频段为0.1THz~4.5THz (波长 0.067mm~3.000mm)。其他系统技术指标:动态范围≥60dB,光谱获取率≥20Hz。在此基础上, 调研后找到合适的太赫兹时域光谱 THz-TDS(Terahertz Time Domain Spectroscopy)系统 Menlo Systems TERA15-FC,作为本文的 THz 源。

根据所选 THz 源,得到 THz 折射光学系统探测光 路设计输入条件: 波长范围 0.1THz~4.5THz; THz 源 的发射发散角±12.5°(用戈莱盒测得); THz 源的发射 面直径,即系统的入瞳直径 10mm; THz 波接收器接 收面尺寸半径 8mm。结合系统技术指标(探测线宽度 ≥15mm、目标距离≤10cm、手持探头重量≤1kg)对 探测光路设计的限制要求,设计一种适用于太赫兹非成 像光谱探测的折射光学系统。其技术指标总结如表 1 所示。

|--|

Table 1 Technical indices of detection sy	stem
---	------

系统要求	技术指标
工作频段	0.1THz~4.5THz
动态范围	≥60dB
光谱获取率	≥20Hz
探测线宽度	≥15mm
目标距离	≤10cm
探测头重量	≤1kg

3 太赫兹折射光学系统设计

设计太赫兹折射光学系统相比设计传统波段的光学系统面临如下难点:透射光学材料少⁶⁰、工作 波长范围大、波长远大于可见光和红外波段。这些难点对太赫兹折射光学系统的设计提出严峻考验, 特别是对太赫兹成像光学系统设计来说几乎不可能实现。而通讨采用非成像的光谱探测方式,只收集 太赫兹光谱能量,不仅解决了人体隐私问题,更避免了为获得足够高的调制传递函数 MTF(Modulation Transfer Function)以保证成像质量而进行复杂像差优化时所面对的由于光学材料少、波长范围大而导 致的优化不动的问题。

在现有 ZEMAX 光学设计软件的光学材料玻璃库中,材料的最大工作波长不超过 11um,距离太 赫兹 67µm 的最小工作波长依然很远。使用现有光学玻璃库的材料及数据根本无法进行太赫兹折射光 学系统设计,必须寻找合适的光学材料,建立专门的太赫兹光学材料玻璃库,才能进行太赫兹折射光 学系统设计。按照光学系统的设计经验,用于光谱扫描探测的物镜,对材料质量和表面均匀性的要求 比常规物镜更为严格^[13]。

目前,太赫兹光学材料研究领域已经研究出较成熟的几种太赫兹透射材料,可分成晶体材料和有 机聚合物材料两类。高阻硅(HRFZ-Si)是传统的太赫兹元件中最常用的太赫兹材料,它在太赫兹波 段有很好的透过率。除去昂贵的人造钻石,高阻硅是晶体材料中最适合宽大波长范围的太赫兹材料^[14]。 而 Tydex 公司提供的 HRFZ-Si 材料能在 1000μm 波段中有 50%~54%的透过率,该材料还可用于 3000μm~8000μm 波长的光。Z-cut 的石英晶体是传输 50 μm 以上波长的光的极好材料。Z-cut 的石英晶 体窗口镜可以传输可见光,很容易用 He-Ne 激光器来调节准直。由于石英材料色散非常大,石英晶体 材料的透镜将对可见光和远红外的光产生不同的焦距。如果需要对光学系统调节准直,那就必须考虑 透镜的色散。

近年来,随着材料科学的发展,TPX、PE和 PTFE等太赫兹有机材料被证明在 200µm~1000µm 之 间透过率基本一致,可以达到 80%~90%^[14],这有效地推动了太赫兹折射光学系统的发展。其中 4-甲 基戊烯聚合物(商品名 TPX)是目前所有作为折射透镜材料的有机聚合物中密度最小的,这可以用于 有效地实现探测头的轻量化;而目该材料也是目前高透明度树脂中唯一的结晶性聚合体,具有明显的 熔点,注塑均匀性好,可以满足在扫描物镜设计中更严格的材料质量要求;同时,该材料耐高温、疏 水、收缩率小,经过上百次的高温蒸煮实验不会出现表面雾化现象[15],可以满足在扫描物镜设计中更 严格的镜片表面质量要求,且该材料在紫外、可见和太赫兹波段都是透明的,透过率超过80%^[14],这 意味着可以通过 He-Ne 激光器来进行装配的准直矫正,降低装

配难度。TPX 在整个透明窗口的折射率分布如表 2 所示。

为保证良好的透过率和较低的装调难度,通过比较目前成 熟的几种太赫兹透射材料的特性,选择 TPX 材料作为本文的 太赫兹折射光学系统镜片材料较为合适。根据表3的数据,通 过光学材料中常用的 Schott 函数,即式(1),可以建立 TPX 材料在 THz 波段的 ZEMAX 光学玻璃库。

> $n^{2} = A_{0} + A_{1}\lambda^{2} + A_{2}\lambda^{-2} + A_{3}\lambda^{-4} + A_{4}\lambda^{-6} + A_{5}\lambda^{-8}$ (1)

其中, *n* 为材料折射率, λ 为波长, A_i (i=0,1,2,3,4,5) 为 Schott 函数的参数。将表 2 数据输入到新建玻璃库,并选择 Schott 型函数进行拟合,得到对应的 Schott 型参数,如表 3 所 示。最后在玻璃库中添加 TPX 太赫兹光学材料。

通过 MATLAB 仿真该 Schott 函数并和离散折射率分布点 对比,得到的关系如图3所示,证明在 ZEMAX 玻璃库中所添 加的 TPX 材料的模型与实际情况基本符合。

まっ	TDV	从北山恋八左	
ж Z		いかかチケカ	

Table 2 TPX inde	ex of refraction
波长 (μm)	折射率 n
0.633	1.463
24	1.4568
60	1.4559
300	1.46
667	1.46
1000	1.465
3191	1.466

表3 TPX 的 Schott 型参数

Table 3 The Schott parameter of TPX

Schott 型参数	数值
A_0	2.13222183
A_1	1.77417878×10 ⁻⁹
A_2	-6.72231997
A_3	$4.68816822 \times 10^{-2}$
A_4	1.4676434×10^{-1}
A_5	3.66331735×10 ⁻¹

• 3 •

为确认 TPX 太赫兹材料已经在 ZEMAX 玻璃库中正确地建 立,并验证 ZEMAX 光学设计软件在太赫兹波段进行设计优化时 仍然有效,本文首先设计了一种太赫兹扫描物镜照明光路,并对 其进行设计优化。为提高照明光路在探测面的照明效果,应尽可 能地保证光线在探测面聚焦。为避免较大的像差导致光线在探测 面弥散,设计初始结构时,考虑调整光阑在镜组中的相对位置, 使用对称结构的光学系统。由于太赫兹波长相对于可见光、红外 线的波长长,衍射极限低,设计优化较为简单,所以在初始结构 中选择最简单的双镜片组扫描物镜结构。经过优化,由 ZEMAX 生成多幅分析图,如图 4 所示。



Fig. 3 TPX index of refraction



图 4 太赫兹扫描物镜照明光路多幅分析图 Fig. 4 Report graphic 6 of THz scanning objective lens illumination path

由图 4 可以看出,ZEMAX 光学系统设计软件的调制传递函数(MTF)、光程差函数(OPD)、场 曲畸变曲线(FCD)、点扩散函数(PSF)和几何能量包围(GEE)等各像质评价函数都可以正常表示, 且 ZEMAX 软件的各优化函数在太赫兹波段也可以正常进行操作数运算。通过上述设计过程可以确定, 光学系统设计软件可以用于太赫兹波段的光学系统设计,且已将太赫兹扫描物镜照明光路优化到衍射 极限。

基于太赫兹照明光路的设计优化方法,作进一步的探测光学系统整体光路的设计。考虑到由简单 的单透镜构成的用于傅里叶变换的 4f 光学系统的特点,通过对其进行改动和优化,可以快速获得适用 于太赫兹光谱探测的光学系统,如图 5 所示。



图 5 太赫兹探测光学系统光学结构 Fig. 5 3D layout of THz detection optical system

图 5 中第 6 表面为探测面, 第 1 表面和最后表面分别是 THz 源和探测接收面。在上述光路中, 加 入反射镜折叠光路, 并调整和优化光学系统的结构参数, 得到小型化太赫兹反射光谱探测光学系统, 如图 6 所示。



图 6 小型化太赫兹反射光谱探测光学系统多幅分析图

Fig. 6 Report graphic 4 of micro THz reflectance spectrum detection optical system

其中第12表面(即中间的反射面)为目标探测表面。由于采用的序列模式 SM (Sequential Mode)

设计,在对光学元件进行空间布局时,各元件的位置坐标和偏转坐标的定义是沿主光线方向,各元件 依次以光线传播的方向的前一元件为参考标准定义。在本设计中,光学元件的三维空间布局较为复杂。 首先对光路进行了简化,取消了图 6 右上分图所示的最右侧两个反射镜向下垂直反射的偏转变换。在 简化后,对光路进行优化,并由衍射能量集中度曲线作评价,如图 6 右下分图所示。该评价曲线显示 了像面(即探测器接收面)上太赫兹能量分布的情况,其横坐标表示以像面主光线为中心的圆半径, 纵坐标表示对应半径的圆所围面积内的能量占总能量的比例。由评价图可以看出,在半径 1mm 时, 全视场角 2*w*=25°范围内的光线能量聚焦已经接近 90%,而在半径 3mm 后,能量集中度曲线基本已经 趋平,能量集中度达到 97%,基本达到衍射极限,且能量集中区域可以被探测器接收面完全覆盖,满 足设计要求。

考虑到序列模式设计的系统光路并不能模拟实际的光线追迹情况^[16],本文将上述设计的系统用 ZEMAX 的非序列模式 NSM (Non-Sequential Mode)重新进行了仿真和优化,所得结果如图 7 所示。 图中黑色正方形表面为用于仿真的跟踪分析光线探测器虚拟面,在实际光路中并不存在。





图 7 探测光学系统在 ZEMAX 非序列模式下的仿真 Fig. 7 Simulation of detection optical system in NSM of ZEMAX

应用 NSM,不仅加入了在序列模式下逻辑错误(在序列模式中不允许光线多次透射同一元件)的 探测系统 THz 窗口(如图 7 右分图所示,绿色反射镜和目标探测面之间的薄光学平板 THz 窗口),而 且将序列模式下难以定义坐标位置和偏转角度的太赫兹反射镜按照实际情况对其坐标进行了定义。在 序列模式下,只能进行子午面和弧矢面两个方向的光线追迹,而在非序列模式中,只要定义光源 XY 方向的视场角和半宽度大小,即可追迹光源发出的光线在沿主光线各个平面上不同视场角的情况,实 现了真实的光线追迹。

为了将系统光路情况清晰地表述,相比 SM 只需几十条布局光线,NSM 所需要的布局光线数要多 很多。考虑到仿真计算量,本文在光源的布局光线(layout rays)数上设定为 1000,同时为保证光线 追迹仿真的有效性,跟踪分析光线(analysis rays)数量通常很大,本文设定其为 500 万。仿真的 THz 源能量为 0.02W,其他输入条件同上文所述。本文的跟踪分析光线探测器虚拟面像素分布为 XY 方向 上的 200×200。经光线追迹仿真运算,获得了本文设计的光学系统三个关键位置和最终探测器光敏面 处的光线追迹分布及能量分布,如图 8 所示。

由图 8 可明显地看出,THz 源发出的发散非均匀太赫兹波,在经过太赫兹照明物镜光路部分后, 得到能量均匀分布的准直太赫兹波,如图 8 右上分图所示。均匀太赫兹波经折转光路和探测面反射后 进入缩束光路中,可以看出太赫兹波的均匀性变差,并产生太赫兹波像差,如图 8 左下分图所示。而 经过缩束光学系统后,在探测器光敏面上,可以看出太赫兹波形基本校正,并较为均匀地汇聚到探测



图 8 分析光线探测器获得的太赫兹辐射分布 Fig. 8 THz radiation distribution acquired by analysis detector viewer

考虑到本文设计的光学系统的特殊性,该光学结构拟采用 3D 打印一体成型技术,而 3D 打印的精度相比于传统光学结构件精密机加的加工精度低。为研究本光学系统对加工误差的耐受性,本文采用 多重结构设计的方法,进一步对光学系统做工装精度耐受性分析。

将上文所述光学系统定义为初始结构系统,考虑到 3D 打印的加工精度为 0.05mm~0.1mm,通过 多重结构编辑,将各光学元件间的距离和反射镜偏转角度提取为多重结构变化参数,并将±0.1 和 0 三 个数值定义为结构参数变量取值范围,得到多个系统结构,并对比各系统的仿真结果,所得结果基本 与图 8 一致,证明本文设计的太赫兹探测光学系统可以用于 3D 打印的结构工装。

4 太赫兹折射光学系统结构设计

根据上文设计的探测头光学系统,考虑探测头整体重量指标要求,本文决定在结构材料上选择树 脂等低密度的复合材料,通过 3D 打印一体成型技术实现。首先提出手持式探测头结构的组装概念: 探测头光学系统结构可以采用高加工精度、低热收缩性的光敏树脂一体成型;探测头外壳采用高强度、 耐腐蚀、抗氧化的尼龙材料一体成型;并考虑气密性设计^[17]。根据上述组装概念,探测头结构设计原 则及解决方法如下所述:

① 针对探测头工作中可能影响探测头封闭性的可移动部件,进行合理的设计。

② 探测头结构设计可以采取多重密封的方式。在探测头的结构设计中,为了光学元件的安装方便,难以做到仪器整体的全密封。可以根据需要设计两个分离的一体化密封外壳,通过密封对接设计实现良好气密性。同时,除必要的走线孔和光学窗口外避免其他开孔。

③ 在探测头结构设计中,难以通过结构设计达到密封效果的地方可以采取其他密封技术。如通 过向缝隙填充硅胶密封条,以消除接触面间可能存在的缝隙。在光纤和计算机数据线连接处,可以用 橡胶等常用的密封材料作整体包覆。同时,在探测头的必要位置可放置干燥剂,保证探测头内部光路 处于干燥中,进一步降低水汽对系统的影响。

根据上述设计原则,设计了一种简单、易于构建且低成本的手持式探测头,并制造了原型机,用 于系统测试。如图 9 所示,本文研究设计的一种手持式探测头系统结构使用很少的部件构建,实现了 上述设计原则所述的功能,使其结构简单、可靠性高以及成本低。



图 9 一种手持式探测头系统结构 Fig. 9 A configuration of the handheld detection system

各部件可以安装组成一个特殊设计的手持式探测头,图 9(a)、图 9(b)展示了探测头光学结构的细节和外观,通过在探测器工装下设计干燥剂储盒,实现探测头内部干燥及紧凑的空间布局。将光学系统设计为一体,并在结构的边缘设计了密封槽和实现盲螺纹孔的梁,不仅保证了探测头气密性,还通过底板梁,增强了探测系统的结构强度。图 9(c)、图 9(d)展示了探测头系统结构的外观和细节。将系统外壳设计为两部分,降低系统的安装难度,并减少不必要的间隙实现了良好密封;探测头把手部分设计了防脱密封结构,使探测头和计算机等有线连接时,可以通过密封胶套实现气密,避免数据线等走线开孔破坏探测系统的干燥气密性;同时在探测头外壳的顶部保留有足够的空间,为设计可视屏幕提供可能。

5 结束语

本文论证了一种手持式太赫兹探测系统在人体安检和室内爆炸物危险品探测方面应用的可行性。 探测系统结合了太赫兹时域光谱技术在快速精准识别物质指纹谱、反射太赫兹光谱探测极性液体等透 射光谱无法探测的物质、以及反射太赫兹时域系统可以小型化这几方面的技术优势。通过在系统窗口 位置加持保护罩结构,使其在探测时保证探测器窗口和探测表面位置相对固定,提高了探测器信噪比 和探测精度。通过调整太赫兹源发射的工作频段和能量,太赫兹时域光谱系统也可以很方便地应用于

其他领域,比如文物的无损探测鉴别与保护、汽修的涂层质量探测等。

参考文献

- 张兴宁,陈稷,周泽魁. 太赫兹时域光谱技术[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(7): 35-38.
 ZHANG Xingning, CHEN Ji, ZHOU Zekui. THz time-domain spectroscopy technology[J]. Laser& Optoelectronics Progress, 2005, 42(7): 35-38.
- [2] TRIBE W R, NEWNHAM D A, TADAY P F, et al. Hidden object detection: security applications of terahertz technology[J]. Proc. SPIE, 2004, 5354: 168–176.
- [3] 韩元,周燕,阿布来提,等. 太赫兹技术在安全领域中的应用[J]. 现代科学仪器, 2006, 2: 45-47.
 HAN Yuan, ZHOU Yan, ABLET, et al. Application of terahertz technology in security field[J]. Modern Scientific Instruments, 2006, 2: 45-47.
- [4] 任荣东,王新柯,赵国忠,等. 建筑材料的太赫兹谱实验研究[J]. 量子电子学报,2006,23(4):555-559.
 REN Rongdong, WANG Xinke, ZHAO Guozhong, et al. Experimental research on terahertz spectrum of architectural materials[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(4):555-559.
- [5] KEMP M C, CLUFF J A, TRIBE W R. Security applications of terahertz technology[J]. Proc Spie, 2003, 50–70.
- [6] 卜凡亮, 行鸿彦. 太赫兹光谱技术的应用进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(4): 1-6.
 BU Fanliang, XING Hongyan. Progress of terahertz spectroscopy[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(4): 1-6.
- [7] 江舸,杨陈,周晓青,等. 雷达信号处理技术在太赫兹成像中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1555–1560. JIANG Ge, YANG Chen, ZHOU Xiaoqing, et al. Application of radar signal processing in terahertz imaging[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(6): 1555–1560.
- [8] DUBREUILL D, BAUDRAND J, ABERGEL A, et al. Optical design for the 5~28μm NGST infrared damager of MIRI[C]. Proc of SPIE, 2003, 4850: 564–573.
- [9] PAMELA S D, MATTHEW R B, BRENT J B, et al. Focus determination for the James Webb Telescope Instruments: A survey of methods[C]. Proc of SPIE, 2003: 626512.
- [10] 魏佳宾,邓琥. 基于 LabVIEW 的太赫兹扫描成像系统设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(1): 21–26.
 WEI Jiabin, DENG Hu. Design of terahertz time-domain spectroscopy scanning imaging system based on LabVIEW[J].
 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(1): 21–26.
- [11] 叶金晶,周健,孙谦晨,等. 主动毫米波成像隐私保护算法[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(4): 505-512.
 YE Jinjing, ZHOU Jian, SUN Qianchen, et al. A privacy protection algorithm for active millimeter-wave imaging[J].
 Infrared Millim Waves, 2017, 36(4): 505-512.
- [12] CLERY D. Brainstorming their way to an imaging revolution[J]. Science, 2002, 297: 761–763.
- [13] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014.
- [14] ZHANG X C, XU J, STEVEN D J, et al. THz material –Datasheet[R]. Highlight Optics: TYDEX, 2011.
- [15] 三井化学. TPXTM (Polymethyl Pentene)聚甲基戊烯产品目录[EB/OL]. https://mccn.mitsuichemicals.cn/service/ mobility/polymers/tpx/index.htm.
- [16] 林晓阳. ZEMAX 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [17] DEMIAN D, DUMA VF, SINESCU C, et al. Design and testing of prototype handheld scanning probes for optical coherence tomography[J]. Engineering in Medicine, 2014, 228(8): 743–753.

[作者简介]

- 曹恩达 1994年生,在读硕士,主要研究方向为太赫兹时域光谱探测系统设计。
- 于 勇 1971年生,博士,研究员,主要研究方向为雷达总体技术、雷达信号处理技术。
- 宋长波 1979年生,博士,研究员,主要研究方向为激光雷达技术与激光大气遥感。
- 赵一鸣 1983年生,博士,研究员,主要研究方向为激光雷达遥感。