

密级_____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

基于太赫兹量子级联激光器的扫描成像研究

作者姓名：_____李孟奇_____

指导教师：_____曹俊诚 研究员_____

_____中国科学院上海微系统与信息技术研究所_____

学位类别：_____工学硕士_____

学科专业：_____微电子学与固体电子学_____

培养单位：_____中国科学院上海微系统与信息技术研究所_____

二零一七年五月

Research of Scanning Imaging System Based on
Terahertz Quantum-cascade Laser

By
Meng-Qi Li

A Dissertation Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirements
For the degree of
Master of Microelectronics and Solid-State Electronics

Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
Chinese Academy of Sciences

May, 2017

致 谢

回顾过去的三年研究生时光，有和同学一起完成各种课程任务时的辛苦，也有随好友一起结伴出游的欢乐，还有和同门师兄一起讨论科研的酣畅。在微系统所我不光学到了宝贵的科学知识，也结识了一群热爱科研的人们。

衷心感谢导师曹俊诚研究员对我的悉心指导和知遇之恩，曹老师为人谦逊、知识渊博，特别是他严谨认真的科研态度深深地感染了我，这将对我的未来产生深远的影响，他除了教授我必备的知识以外，更重要的是教会了我如何做人。曹老师为我提供了优越的科研条件，并为我课题研究方向的选取和论文的撰写给予了极大的帮助和指导。值此论文完成之际，我谨向导师表示崇高的敬意和感谢！特别感谢郭旭光老师和谭智勇博士在科研方面给我的指导和建议，郭老师学识渊博，为人谦虚友善，我所取得的成就离不开郭老师的帮助，衷心地祝他工作顺利，身体健康。谭智勇博士在实验室仪器的使用方面有着丰富的经验和技巧，帮助我完成了实验所需光路的搭建以及相关论文的撰写工作，再次感谢谭博士对我的耐心指导和悉心鼓励。

感谢实验室的同门们以及工作人员在学习和生活上给予的帮助和关心。感谢王长老师和黎华老师在科研方面给我的指导和建议；感谢周涛师兄和万文坚师兄在论文撰写方面给予的指导 and 帮助；感谢徐天鸿和张真真师姐在日常科研和生活方面给予的关心和帮助；感谢邱付成师弟在我遇到困难时为我出谋划策，陪我共渡难关；感谢课题组的刘征博士、张戎博士、王丰博士、姚辰博士、顾亮亮博士、顾立博士、谢仁强、吴义东、刘纯、符张龙、朱永浩、邵棣祥、王海霞、罗小青、李子平、侯秋实、廖小瑜等，他们给我的科研生活带来了轻松和乐趣。

感谢好友吴旭康、水赛兰、卢仕龙、陈敏华、王诗淼、王俊龙等的关心与帮助，这份友情我将一辈子珍藏。感谢微系统所研究生部的罗琦老师、邵天浩老师、余翔波老师、解佳老师以及上海科技大学的胡瑶老师在学习和工作上给予的关心和帮助。

感谢父母和家人长期以来对我默默的支持以及无私的关爱，使我在每次面对人生抉择和困难时能够勇往直前，你们的爱和理解是我所有力量的源泉。

特别感谢我的女友周雅慧，她的出现给我的生活带来了美丽的颜色，让我的学习和生活更加丰富多彩，在今后的岁月里，我愿陪她一起完成未来的一个个小目标。

最后，感谢所有帮助过我的师长、同学与朋友，愿你们永远幸福快乐！

基于太赫兹量子级联激光器的扫描成像研究

李孟奇 (微电子学与固体电子学)

指导老师: 曹俊诚 研究员

摘要

太赫兹 (THz) 成像作为 THz 技术应用的重要方向之一, 有着非常重要的学术研究和广阔的应用前景。成像质量和成像速度一直是 THz 成像需要解决的两个重要问题, 本论文以 THz 量子级联激光器 (QCL) 作为源, 以热辐射探测器 (Bolometer) 作为信号接收端, 采用可旋转和平移运动的二维扫描平台搭建了反射式快速扫描成像系统, 并实现了对样品的快速扫描成像。主要研究结果和创新点如下:

1. 基于 THz QCL 输出功率高, 以及 Bolometer 响应灵敏的特性, 利用直径为 76 mm 的高阻硅分束镜搭建了会聚光斑位置固定的 THz 反射式成像光路系统。在光路系统中, 利用分束镜半透半反和平面镜反射的光学原理, 仅使用一组抛物面镜即可实现 THz 信号的传输。采用这种共光路的设计方式, 可以使 THz 信号正入射在样品表面, 保证会聚光斑不会发生椭圆畸变, 并且有效减少了系统中光学元件的数目。此外, 这种共光路的设计使激光器与探测器可以工作在同一侧, 可以考虑将太赫兹激光器与太赫兹探测器封装在同一个热沉上, 并将其集成在同一个杜瓦瓶中, 进一步缩小成像系统的体积。
2. 通过坐标变换的方法将采集到的位置信息转换到直角坐标系, 利用三次多项式插值算法将探测信息转换为二维灰度值格点矩阵。旋转扫描采集到的位置信息表示的是角度和位移, 通过极坐标变换的方法将位置信息转换到直角坐标系。此时在坐标系中的数据是螺旋线形的离散点, 但这不符合计算机数字图像的 $M \times N$ 的数值阵列形式, 因此可以采用三次多项式插值算法对数据进行插值拟合, 将探测信息转为二维灰度值的格点矩阵, 再根据格点矩阵进行成像。
3. 通过控制旋转电机和平动电机的运动, 实现了快速旋转扫描成像的自动化过程, 并采用均值滤波、中值滤波以及直方图均衡化等相关算法对获得的成像结果进行图像处理。与传统的二维逐行扫描方式不同, 本套系统采用旋转和平移的扫

描方式实现了反射式快速扫描成像，解决了二维逐行扫描中需要停顿换方向的问题，有效提升了扫描速度，成像的扫描时间为 5 s，扫描频率达 1 kHz，图像的平均空间分辨率约为 1 mm。实验中对无遮挡和有遮挡的塑料牙签、刀片和树叶等样品进行成像，均获得了很好的成像效果。最后，对获得的成像结果进行了图像处理，均值滤波虽然具有较好的滤波效果，但对图像细节的影响较大，会使图像中过渡线条变模糊；中值滤波算法可以有效解决均值滤波对图像造成的影响，并且对图像的波纹也有一定程度上的滤波效果。直方图均衡化操作可以改善图像的对比度，增加图像动态范围。

关键词： 反射成像，太赫兹量子级联激光器，旋转平移二维扫描，图像处理

Research of Scanning Imaging System Based on Terahertz Quantum-cascade Laser

Meng-qi Li (Microelectronics and solid state electronics)

Supervisor: Prof. Jun-Cheng Cao

Abstract

Terahertz(THz) imaging is one of the important directions of THz technology application, and it has very important academic research value and broad prospect. The imaging quality and speed are always two important issues to imaging technology. In this paper, reflective scanning imaging system was constructed by employing the THz quantum-cascade laser(QCL) as the source and the bolometer as the receiver. A fast scanning imaging system is built by using a rotating translational platform, and realizes the fast scanning imaging to the sample.

1. Based on the high output power of THz QCL and the sensitive response of Bolometer, A THz reflective imaging optical system with fixed spot position is built by using high-resistivity silicon beam splitter with diameter of 76 mm. The optical system achieved the THz signal transmission by using only one set of parabolic mirrors, based on the semi-transparent character of beam splitter and the reflection of plane mirror. The common light path design can make the THz signal avoid elliptical distortion under normal incidence, and also reduce the number of optical elements. Moreover, This design can make the laser and detector work in the same side. We will package the THz laser and THz detector on the same heat sink. In this way, they can be integrated into the same low temperature Dewar, the volume of imaging system will be reduced further.
2. The method of coordinate transformation is used to convert the position information to the Cartesian coordinate system, and the cubic polynomial interpolation algorithm is used to convert the detection information into a 2D gray value grid matrix. The position collected by rotation scanning is the angle and the displacement, and the position is

converted to the Cartesian coordinate system by the method of polar coordinate transformation. In this case, the data in the coordinate is discrete and spiral points, but it does not satisfy the numerical array form of digital computer image, like the type of $M \times N$. Therefore, the cubic polynomial interpolation algorithm is used to fit the acquisition data. The detection information is converted to 2D gray values grid matrix, and then the image is obtained according to the grid matrix.

3. The automatic process of fast rotation scanning imaging is realized by controlling the movement of the rotating motor and the translational motor. The algorithms of Mean filter, median filter and histogram equalization are used to process the image results. It is different from the traditional 2D row-by-row scanning imaging method, the system employs the rotational and translational scanning method to achieve the reflective fast scanning imaging. The pause problem of changing the direction on the 2D progressive scanning has been solved. The system can shorten the scanning time effectively, the scanning time is 5 seconds, the scanning rate is up to 1 kHz and the average spatial resolution of the image is about 1 mm. In the experiment, the image all have a good effect by imaging to a naked or sheltered plastic toothpicks, blades and leaves. Finally, Image processing was performed on the imaging results. Mean filter has good filtering effect, but it has bad influence on the image detail. Median filter algorithm can solve the influence what created by mean filter on the image, and the image ripple also can be filtered. Histogram equalization operations can improve the contrast of the image, and increase the dynamic range of the image.

Keywords: Catoptric imaging, terahertz quantum-cascade laser (THz QCL), 2-dimension scanner platform with revolving and displacement, image processing

目 录

致 谢	i
摘 要	iii
ABSTRACT	v
目 录	vii
第一章 绪论	1
1.1 太赫兹波简介	1
1.2 太赫兹成像概述	3
1.2.1 透射扫描成像	3
1.2.2 反射型扫描成像	4
1.2.3 太赫兹实时成像	5
1.2.4 太赫兹计算机层析成像	6
1.2.5 太赫兹近场成像	7
1.3 文章组织结构	9
第二章 太赫兹激光器和热辐射探测系统	11
2.1 太赫兹波的产生与探测	11
2.2 太赫兹量子级联激光器原理与概述	11
2.2.1 THz QCL 原理与概述	11
2.2.2 THz QCL 成像优势	13
2.3 热辐射探测器系统	17
2.3.1 Bolometer 简介	17
2.3.2 4.2 K 硅材料 Bolometer 探测系统	18
2.4 本章小结	21

第三章 基于 LabVIEW 的数据采集、机械控制和软件交互	23
3.1 数据采集基础	23
3.1.1 采样原理	23
3.1.2 数据采集卡	24
3.1.3 数据采集驱动软件 (NI-NAQmx)	26
3.2 机械控制	28
3.2.1 LabVIEW 编程实现电机控制	29
3.3 软件交互	30
3.4 本章小结	31
第四章 太赫兹快速扫描成像	33
4.1 成像系统	33
4.2 成像过程及成像原理	35
4.3 成像结果与分析	39
4.4 其它样品成像结果	42
4.5 图像处理	43
4.5.1 均值滤波和中值滤波	43
4.5.2 直方图处理	44
4.6 本章小结	47
第五章 总结与展望	49
参考文献	51
攻读硕士学位期间发表文章	57
简 历	59

第一章 绪论

1.1 太赫兹波简介

太赫兹 (Terahertz, THz) 波通常指的是频率在 0.1 - 10 THz (波长 3 mm - 30 μm) 之间的电磁波, 介于毫米波和红外光之间, 频谱范围相当宽, 在电磁波谱中占有特殊的位置, 处于电子学向光子学的过渡区域, THz 长波段和亚毫米波段交叠, 而短波段和远红外波段交叠^[1], 所以很多 THz 波领域新的研究进展和发现源于两种截然不同的机制之间的有效结合和相互借鉴。自然空间中充满着 THz 辐射, 但由于缺少经济有效的 THz 源和探测器, 导致与THz相关的研究工作相对滞后, 所以太赫兹频段也被称为“太赫兹空隙”^[2], 如图 1.1。在过去几十年, 得益于太赫兹辐射和探测技术的快速发展, 太赫兹在波谱分析^[3]、安全检查^[4]、医疗诊断^[5]和空间探测^[6]等领域都展现出很好的应用潜力和实际价值。

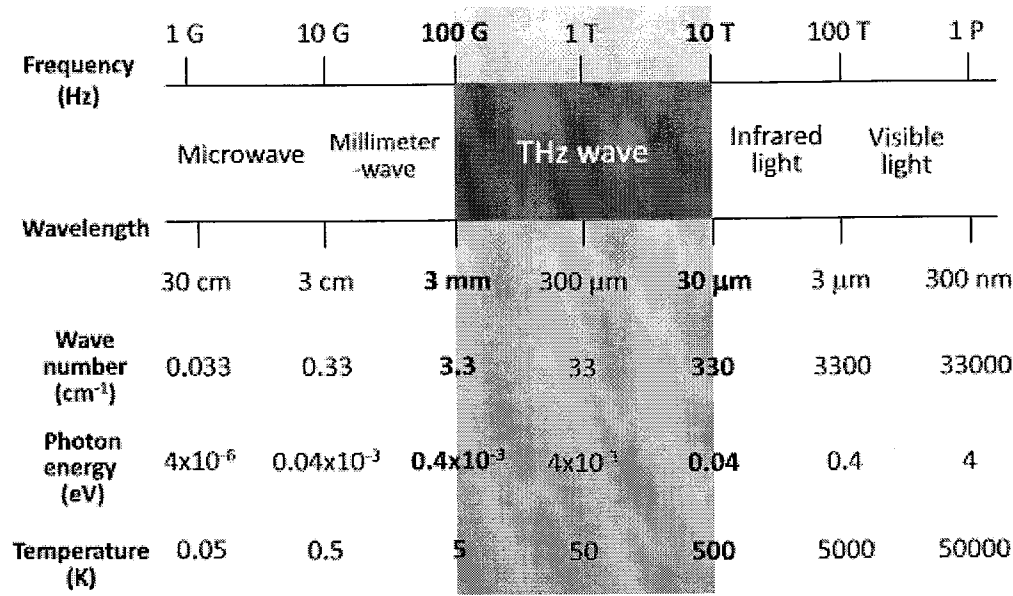


图 1.1 电磁波谱中的“太赫兹空隙”^[2]

THz 科学与技术在过去的几十年里发展迅速, 这主要得益于 THz 波段的辐射产生和探测技术的进展, 而在众多应用领域当中都离不开 THz 成像技术。随着 THz 相关理论和器件工艺水平的不断革新, THz 波应用技术的发展更加贴近现实社会的实际需

求。THz 技术的应用主要包括以下几个方面：

- (1) THz 成像技术。THz 波可以穿透很多可见光和红外光不能穿透的非极性和非金属材料，如塑料、纸张和纺织品等。利用这一穿透特性推动了科研人员在无损检测、质量监控以及国家安全在内的成像应用等方面的兴趣。THz 波的另一个重要特性就是它的非电离辐射特性，这一点也加快了其在生物学和生物医学方面的应用，利用水气对太赫兹的强吸收作用，可以用来检测肿瘤、烧伤烫伤等。具体的 THz 成像技术包括，扫描成像和实时成像，近场成像和远场成像，反射成像和透射成像，二维成像和三维成像等；THz 成像应用领域非常广泛，涉及隐蔽目标探测，安检成像，无损检测和癌变生物组织识别与标定等方面。
- (2) THz 通信技术。无线通信速率在过去三十年遵循着每18个月翻一番的规律^[7]，随着通信速率的不断提升，未来无线通信势必要落在带宽比微波宽的多的 THz 频段。此外，THz 同时也具有着保密性良好和抗干扰能力强的优点，使其特别适合于短距离保密通信领域^[8]。THz 雷达也是未来 THz 波应用的一个重要发展方向^[9]，THz 雷达比微波雷达的频率更高，所以会有更高的时间和空间分辨率，可以探测到更小的目标，使定位更加准确。
- (3) THz 光谱技术。THz 波具有独特的波谱特性，某些大分子物质的共振峰值都在太赫兹频段；另外一些气体（如水气、一氧化碳、二氧化碳等）在 THz 波段会有很强的吸收现象，通过对这些物质的 THz 光谱进行研究，对实现物质的探测和特性研究有着重要的意义。许多毒品和爆炸物的分子在 THz 波段有很强的特征吸收线，THz 也可以用于检测化学物质。根据 THz 光子能量低，不会对生物体造成损害的特性，也可将 THz 光谱技术用于对蛋白质、DNA 等生物大分子的分析检测。

此外，THz 技术还被用于环境质量检测和天文探测等领域。根据 THz 对水气的吸收特性，可以将 THz 辐射用于探测物体的水含量，实现对环境的遥感监测。与光学和近红外波段相比，THz 波具有穿透星际尘埃的能力；与微波毫米波段相比，THz 波的探测具有更高的空间分辨率，因此，THz 波段的天文观测在天体物理与宇宙学研究中具有不可替代的作用。目前，THz 技术的发展还不够成熟，仍需要大量的时间和经历去研究经济、有效和易集成的 THz 辐射源和探测器。随着相关理论的不断深入，关键器件和应用系统的多方向发展，在不久的将来，THz 技术也会像光学、红外和微波技术一样，给人们的生活带来巨大的便利。

1.2 太赫兹成像概述

THz 成像技术按照不同的应用途径有着不同的分类。根据是否有参考频率可以分为相干成像和非相干成像。根据成像手段的不同,可分为主动(有源)成像和被动(无源)成像。根据对样品的成像方式,主动(有源)成像又分为透射成像和反射成像。此外,THz 成像还可包括,实时成像(探测器为阵列)、扫描成像、近场成像以及层析成像等^[10]。通过近几十年的研究进展,THz 成像技术已经获得了较大的进步,积累了很多经验。下面归纳和分析了对 THz 成像技术发展具有重要影响的工作。

1.2.1 透射扫描成像

1995 年 B.B.Hu 等利用光电太赫兹时域光谱技术 (THz-TDS) 第一次实现太赫兹成像^[11]。2013 年,谭智勇等人利用激光频率为 3.9 THz 的量子级联激光器 (QCL) 和响应峰值在 3.2 THz 的量子阱探测器 (QWP) 实现了对人民币水印的透射成像^[12]。成像系统如图 1.2 所示, THz QWP 的响应光电流先由前置低噪声放大器进行放大, 并将转换的电压信号由锁相放大器提取。

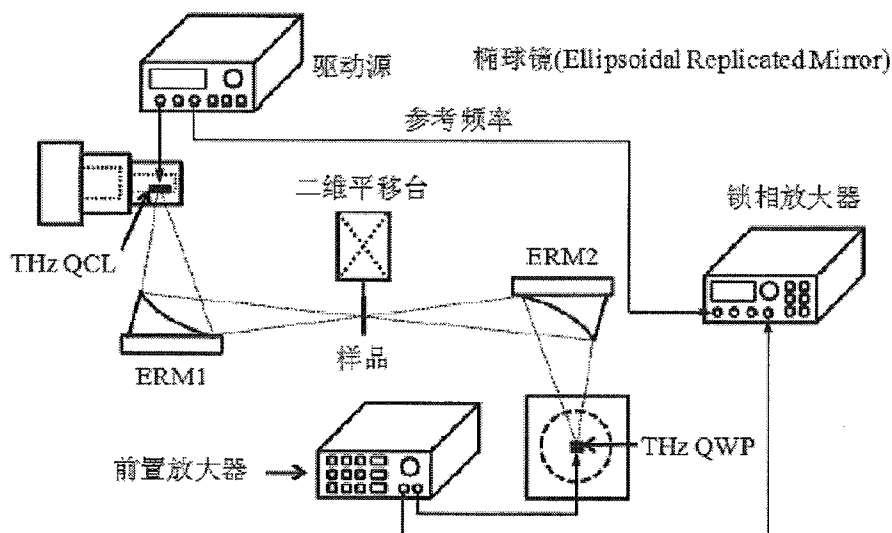


图 1.2 基于 THz QCL 和 THz QWP 的扫描成像系统示意图^[12]

实验中扫描范围为 $33\text{ mm} \times 52\text{ mm}$ 的人民币水印部分, 共计 7035 个像素点, 空间分辨率 0.5 mm , 成像总时长大约 3 个小时。成像如图 1.3 所示, 通过透射扫描成像很好地还原了人民币水印中的头像, 两个“100”的数字印记也很好地呈现出来, 其

中颜色越黑表示 THz 信号透过率越低。通过图像可以看出透射扫描成像可以达到很高的成像分辨率，图像的细节也可以很好还原，但是成像速度过慢，主要受到机械扫描方式和锁放积分时间的限制。

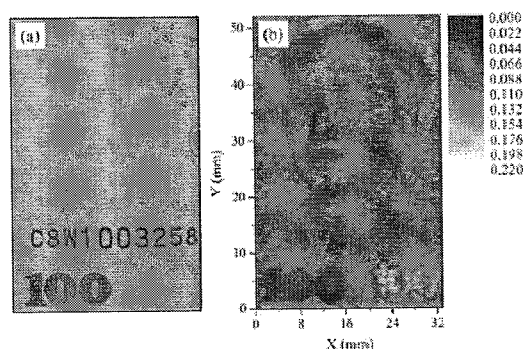


图 1.3 (a) 人民币水印区域照片, (b) 水印区域的 THz 成像结果^[12]

1.2.2 反射型扫描成像

反射式太赫兹扫描成像一般用于对光厚介质或者藏匿物进行成像^[13]。2017年, Doria 等人利用 97 GHz 的 THz 源和肖特基二极管探测器对壁画进行 THz 反射成像^[14]。成像系统实物图和结构原理图如图 1.4 所示, 扫描装置除了可以实现 xy 方向的二维扫描外, 还可以调节激光器与样品表面的距离 z, 保证了探测相位幅度的一致性。成像面积为 $500 \times 300 \text{ mm}^2$ 的矩形区域, 空间分辨率为 1 mm, 成像时长大约为 40 分钟。

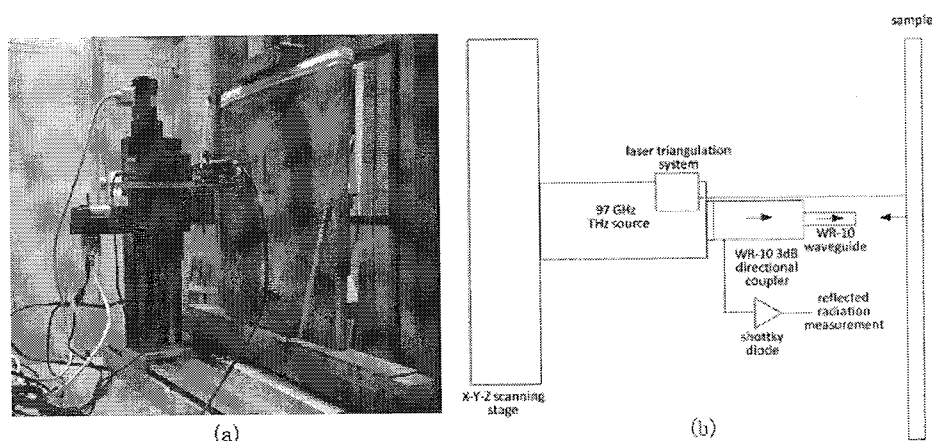


图 1.4 (a) THz 扫描系统实物图; (b) THz 成像系统结构原理图^[14]

如图 1.5 展示了探针与油画表面不同间距的成像结果，在辐射波长一半的变化范围内，图像的灰度值由白变黑再变白。通过对 THz 成像结果的分析发现，97 GHz 的 THz 波不能对不同的油彩进行区分，但是利用 THz 的穿透性可以对油画画板内部的缺陷进行分析。

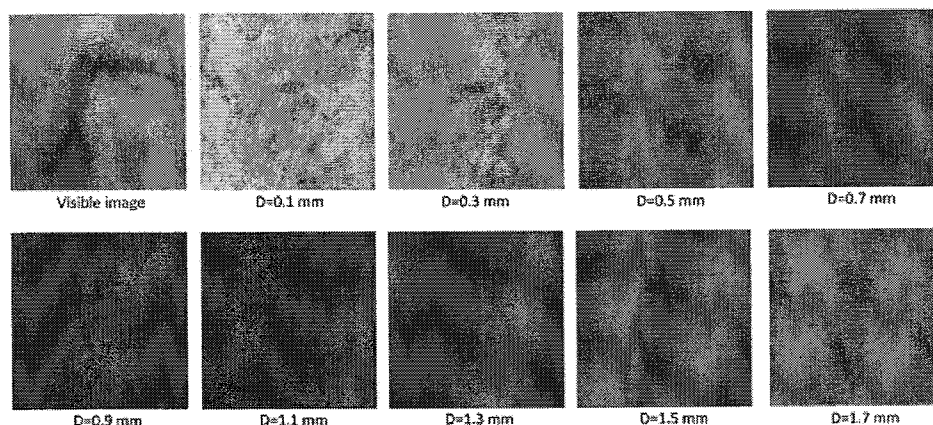
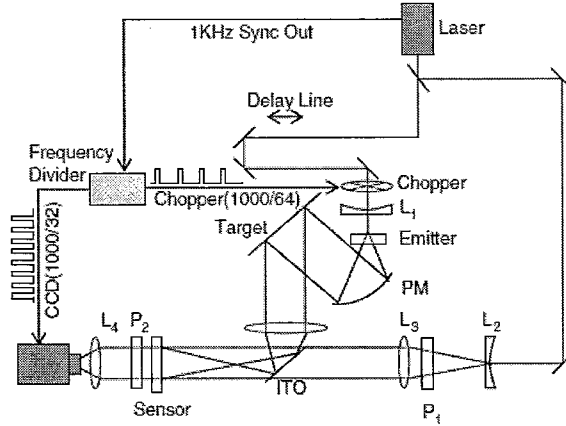
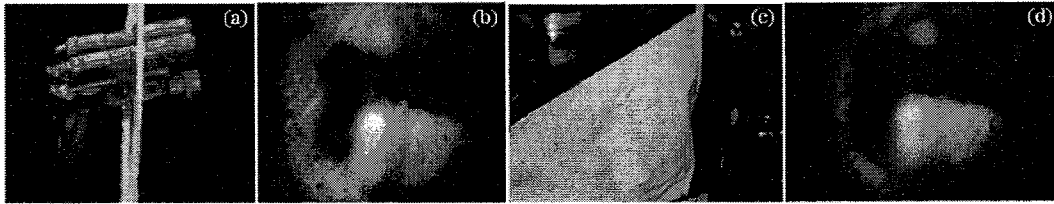


图 1.5 探针与油画间距从 0.1 mm 到 1.7 mm 的 THz 成像结果^[14]

1.2.3 太赫兹实时成像

通过上述的两个实例可以发现，扫描成像可以获得比较好的成像结果，但是扫描时间较长，除了可以通过改变扫描机制来缩短扫描时间外，另一种比较直接的方法就是利用太赫兹实时成像技术。实时成像技术类似于数码相机的成像原理，即将探测器集成为成像所需的探测阵列，由于目前还没有能够达到高分辨率的太赫兹探测阵列，一般利用电光晶体进行频率转换，将太赫兹波段转换为 CCD 可探测的红外波段，电光晶体是一种在外加电场作用下可以改变折射率的半导体材料，CCD 阵列可以对不同强度的红外光进行探测，并将探测强度以电信号的形式记录。Zhang L L 等利用探测阵列实现了实时成像^[15]，如图 1.6 所示，为具体的成像系统光路图。

对于实际的实时成像实验，光路中不能利用锁相放大器降噪，由于 THz 波通过电光晶体时会发生折射，因此需要对物体进行多次成像求平均来实现降噪的目的，高灵敏度的 CCD 响应速度可以达到 100 帧/秒，通过求平均后即可获得比较清晰的太赫兹图像。如图 1.7 所示。根据论文中报道信噪比可以超过 200，空间分辨率为 2 mm，每帧图像的曝光时间为 32 ms。此外利用该套系统还可以实现对运动物体和活体的成像，以及可以用来探测藏匿的危险品，为未来在国家安全领域的应用打下基础。

图 1.6 太赫兹实时焦平面成像系统^[15]图 1.7 (a) 用绳子固定的玩具手枪照片；(b) 图(a)玩具手枪的THz实时成像结果；(c) 用帆布袋包裹的实物图；(d) 图(c)对应的隐匿物体的THz实时成像结果^[15]

利用电光晶体和 CCD 间接成像虽然大幅度提高了成像速度，但因为增加了电光晶体的频率转换模块，使图像受噪声影响较大，所得成像结果的分辨率较低，成像效果远不如扫描成像。

1.2.4 太赫兹计算机层析成像

THz 计算机层析成像 (CT) 是通过借鉴 X 射线 CT 及滤波反投影算法实现的^[13]。实现过程以 THz 波为扫描信号，对样品进行横向扫描获取 THz 透射数据，将数据通过算法还原获得断层图像。然后以相同的间距对样品的多层用同样的方式进行扫描成像，最后使用图像插值拟合技术还原出样品的三维图像。2013 年，周涛等人利用基于 THz QCL 和 Thz QWP 的成像系统实现了三维扫描成像^[16]，如图1.8 所示。

成像系统采用刀片移动的方法对光斑尺寸进行测量，成像系统细小分辨距离约为 1.5 mm。成像结果如图1.9 所示，三维图像是通过24个断层图像重建获得的，每个断层间距 1 mm。其中，作为成像样品的抛物面镜和塑料外壳均得到了准确还原。但是

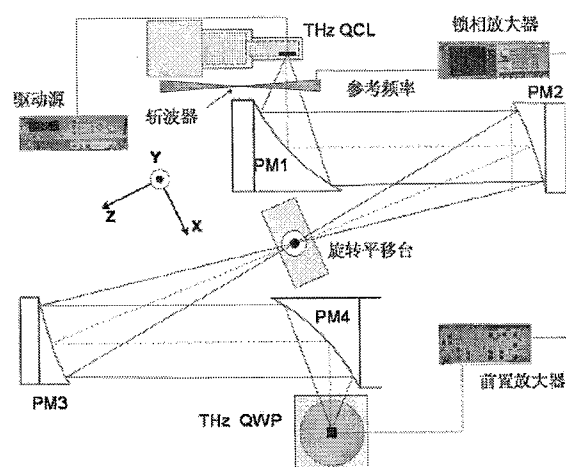


图 1.8 THz CT 成像系统光路图^[16]

整个成像系统的扫描时间过长，急需新方法或新技术来提高 CT 成像速度。

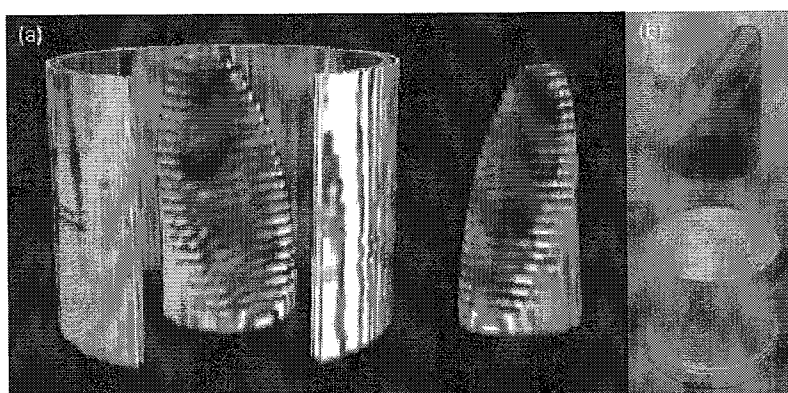


图 1.9 THz CT 三维图像重建结果。(a) 被测样品的三维图像，(b) 实物图^[16]

通过 CT 技术可以帮助我们获得目标的内部构造以及内部可能存在的缺陷或损伤。相比于 X 射线 CT 技术，THz CT 扫描除了更安全以外，而且可以获得 X 射线不能得到的一些细节信息，属于对 X 射线 CT 扫描很好的补充，随着太赫兹技术的不断成熟，THz CT 成像技术也将会获得更大的发展。

1.2.5 太赫兹近场成像

扫描成像的图像质量在很大程度上是由成像分辨率决定的，也就是扫描光斑的最小尺寸，根据瑞利判据可知，任何电磁波都有衍射特性，存在着分辨率极限。THz 波

长范围为 $3\text{ mm}-30\text{ }\mu\text{m}$ ，因此 THz 的成像分辨极限在亚毫米至毫米量级。为了获得更高的成像分辨率就需要突破衍射极限，提高 THz 波的空间分辨率，这就需要用到近场成像技术^[17]。近场成像是通过探针对成像样品表面的瞬逝波进行采集探测，探针必须靠近样品表面，因为瞬逝波会随着距离增加而指数降低，通常距离要控制在一个波长范围内，通过这种方式扫描获得的成像结果可以达到亚波长量级的分辨率。早在 1998 年 Hunsche 等人就第一次实现了太赫兹近场成像^[18]，成像的最小分辨率可达平均波长的 $1/4$ 。如图 1.10 所示为文献中所对应的近场成像系统，光路系统采用透射扫描成像，在样品前放置孔径为 $50\text{ }\mu\text{m} \times 80\text{ }\mu\text{m}$ 的小孔对 THz 波进行约束。小孔需要紧贴样品表面，通过锁相探测技术对透射信号进行采集。最后成像结果如图 1.10 (b) 所示，图中样品为硅衬底上不同间距的金属条，最小间距为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。图 1.10 (c) 为远场成像结果，成像分辨率远不及近场成像的结果。此后近场成像技术迅速发展，目前太赫兹近场成像技术主要有三种，分别是利用高度聚焦光束技术、探针技术、以及孔径在亚波长量级的探测技术。

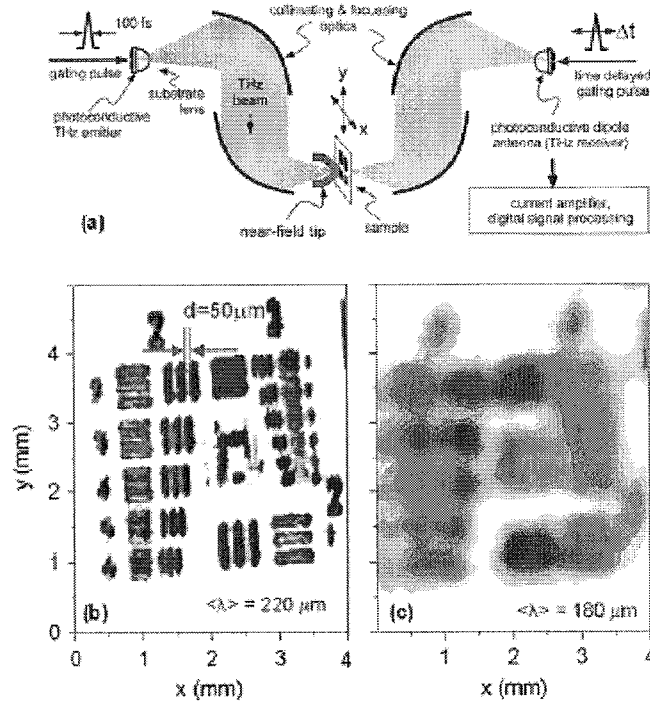


图 1.10 太赫兹近场成像系统。(a) 成像装置示意图；(b) 近场扫描结果；(c) 远场扫描结果^[18]

综上所述，因目前探测器水平的限制，要获得高分辨率的成像效果需要通过点扫描的成像方式，相比于频率上转换的实时成像，扫描成像的背景噪声干扰小，可以获

得较高的信噪比和分辨率。但是扫描成像速度急需提升，通常可以采用改变扫描方式或使用扫描镜来提高扫描速度。要获得更高精度的空间分辨率可以采用近场成像方式，使成像空间分辨率达到亚波长量级。

1.3 文章组织结构

本论文主要研究基于太赫兹量子级联激光器的反射式快速扫描成像实验。在太赫兹成像技术中，成像质量和成像速度是对成像效果进行判断的两个重要指标，在过去的成像实验中成像速度一直是制约单源单探测器扫描成像发展的一个重要因素。本文主要针对过去的二维逐行机械扫描进行了改进，采用旋转扫描的方式进行成像，整个扫描采集过程匀速且连续。

本论文共分为五个章节，每个章节的具体内容安排如下：

第一章为绪论，首先介绍了太赫兹技术的研究背景及意义，然后对太赫兹成像技术进行了详细介绍，主要包括太赫兹成像的分类，以及国内外对太赫兹成像的研究进展。

第二章介绍了实验所用的太赫兹激光器和探测器，通过介绍太赫兹量子级联激光器的工作原理和优点分析了其在成像方面的优势与应用。探测器方面主要介绍了热辐射探测器，并对整套热辐射探测器系统进行了详细介绍。

第三章主要对太赫兹扫描成像的硬件和软件部分进行了介绍。硬件部分包括数据采集卡、伺服驱动器以及配套电机；软件部分主要利用了 LabVIEW 和 MATLAB 进行混合编程。详细介绍了数据采集的原理，并根据采集原理描述了如何利用 NI-DAQmx 对数据采集卡进行编程。其次，通过 LabVIEW 的外部程序接口技术实现了对电机的控制，并实现机械的自动化运行。最后通过 LabVIEW 中内嵌的 MATLAB Script 节点实现了后台调用 MATLAB，并完成数据处理和成像的相关任务。

第四章是具体实验部分，第一节对成像系统整体进行介绍，成像系统中使用了激光频率为 4.3 THz 的 QCL，工作温度为 10 K，输出平均功率为 0.8 mW，器件采用频率为 10 kHz 的脉冲工作方式；采用低温热辐射探测器作为信号接收端。其次，对整个扫描过程进行了详细介绍，实现了对直径 80 mm 的圆形区域的快速扫描成像，扫描时间为 5 s，图像的平均空间分辨率约为 1 mm。最后对成像结果进行分析，采用均值滤波，中值滤波和直方图操作等相关算法对成像结果进行图像处理，改善成像效果。

第五章对本论文的研究工作做了较为系统的总结，并指出了系统的不足以及下一步的工作方向。

第二章 太赫兹激光器和热辐射探测系统

2.1 太赫兹波的产生与探测

太赫兹辐射源的种类可以按照电子学和光子学两种进行分类。广泛使用的 THz 电子源主要有电子束源、固态源以及倍频源^[19-21]。THz 光子源主要包括 THz 半导体源、气体激光器^[22]和 THz 光电导源^[23]。太赫兹探测技术主要有直接探测、利用倍频技术的间接探测和光谱探测技术。直接探测器件主要有利用热辐射效应的焦热电探测器和实验中用的热辐射计 (Bolometer)，利用电子学的探测器（如肖特基二极管探测器），还有本实验室研究的 THz 量子阱探测器 (QWP) 等等。太赫兹高灵敏度的制冷探测器已经被开发并应用于射电天文学，室温探测器仍是一个巨大的挑战。

下一节中将介绍目前热门的太赫兹量子级联激光器 (THz QCL)，它是一种周期性半导体器件，具有能量转换效率高、体积小等优点。

2.2 太赫兹量子级联激光器原理与概述

2.2.1 THz QCL 原理与概述

最具有应用前景的 THz 半导体激光器就是量子级联激光器 (Quantum Cascade Laser, QCL)，QCL 是一种单极型激光器，THz QCL 则是对中红外 QCL^[24] 在 THz 频段的扩展，目前太赫兹波段的 QCL 仍处于研究阶段。其工作原理如图 2.1 所示，THz QCL 的能带结构由很多周期叠加而成，每个周期包括三个部分：

- (1) 注入区：当器件处于一定的外加偏压时，注入区的主要作用是把上一个周期的电子注入到下一个周期；
- (2) 有源区：在有源区内的电子从高能态跃迁到较低能态的同时向外辐射出光子；
- (3) 弛豫区：最后弛豫区中的电子被注入到下一个周期，重复上述过程。

对于有 N 个周期的有源区，一个电子可以辐射出 N 个光子，通过设计器件的周期数可以有效提高激光器的辐射功率。激光器辐射的波长主要由量子阱中能级之间的能量差所决定，通过调节能量差可以设计出不同激射频率的器件。

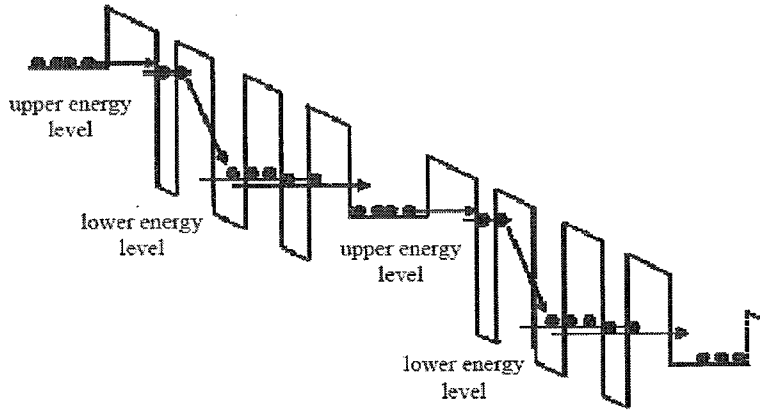


图 2.1 THz QCL 能带结构示意图

GaAs/AlGaAs 材料体系^[25]和 InGaAs/AlInAs/InP 材料体系是用于生长 THz QCL 有源区结构的主要材料^[26]，采用分子束外延的生长方法交替生长几百个周期。第一个 THz QCL 的有源区结构为啁啾超晶格结构。目前根据工作温度和输出功率方面的考虑，共振声子^[27]和散射辅助^[28]两种结构的器件性能会更好一些^[29]。根据不同的波导结构，可以将器件分为等离子波导和双面金属波导^[30]。器件的激射频率一般可以达到 3 THz，有源区的厚度一般只有 10 μm 。当器件在工作时，从器件端面的出射光存在衍射效应，因此输出的光束会比较发散。对于器件性能，等离子体波导结构的器件激射光束比较集中，有效功率较高，但能量损耗较多，很大一部分光没有限制在波导内；通过双面金属波导结构可以将大部分光都限制在波导内，但是光束在远场时发散角会较大，近年来通过对工艺的改善，已经研制出发散角小于 10° 的器件^[31]。

随着近几年的发展研究，目前 THz QCL 在 1.2-5 THz 范围内已经可以达到多个激射频率^[32,33]，器件在有外加磁场的工作模式下最低工作频率可达 0.68 THz^[27]。THz QCL 在连续工作模式下，最高激射温度为 129 K^[34]，脉冲工作模式下，最高激射温度可达 199.5 K^[35]。在最近的报道中，THz QCL 的脉冲工作模式的峰值功率已超过 1 W^[36]，而连续波工作模式的输出功率已远远超过 100 mW^[37]。

在实验中 THz QCL 通过液氮压缩制冷机制冷，如图 2.2 首先对器件腔体抽真空，真空度大约在 10^{-4} Pa 量级，其次利用液氮制冷机循环制冷，通过自来水带走多余的热量，制冷温度大约在 10 K 左右。对如图 2.2 (b) 所示的真空泵，在使用时应注意先运行机械泵，当内部气压降到 10 Pa 以下才能打开打开分子泵继续降压，在关真空泵组时顺序相反，先关分子泵当转速减到 300 r/s 时再关闭机械泵。如图 2.2 (c) 所示为液氮

压缩制冷机，它的最大的优势就是节约液氮，而且使用比较方便，在使用时需要利用自来水降温。但是由于制冷机采用的是电机压缩制冷，因此会带有一些机械振动，会使 THz 光斑产生不必要的抖动，影响成像质量。

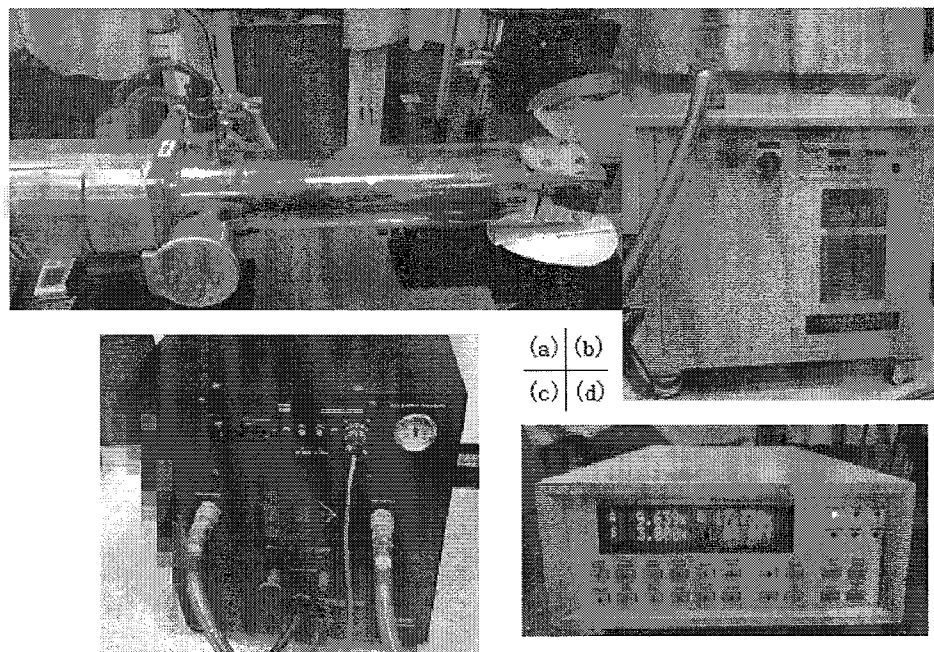


图 2.2 (a) THz QCL 器件腔体，器件在窗片位置处；(b) 真空泵；(c) 液氮循环压缩制冷机；(d) 温控仪

2.2.2 THz QCL 成像优势

2.2.2.1 高动态范围的相干成像

动态范围描述的是系统探测到的信号峰值与本底噪声最高波谱成分的振幅之间的差值，故激光器的辐射功率越高，成像的动态范围质量越好。THz QCL 最好的特性之一就是其高发射功率，通常比泵浦光电导 THz 源可以高出几个数量级。对于成像系统，这种高发射功率器件可以直接用于高动态范围成像，或者用于探测高衰减目标（如生物样品）的衰减度。在过去的大部分文献中，早期采用 THz QCL 作为辐射源进行的成像实验，通常采用的都是非相干的热探测方法^[38-40]，因此并没有体现出相干探测的优势，成像效果也并没有采用光泵浦辐射源的效果好。不过，通过使用低温环境下工作的热辐射探测器 (Bolometer) 进行实验，证明了非相干探测可以实现高动态范

围成像。例如, Kim 等人报道了在输出功率为 4 mW 的条件下实现了 33 dB 的成像动态范围, 试验中 QCL 采用较低的占空比驱动^[40]。利用 THz QCL 的高动态范围特性, 在早期实验中实现了对高衰减样品例如老鼠大脑切片^[38]和转移性肝癌样品^[39]的成像。当采用更高时间平均功率的源作为激光器, 用 Bolometer 作为探测器, 构成优化后的成像装置, 可以在 10 ms 的锁定时间下达到约 49 dB 的成像动态范围, 如果采用更长的采集时间, 这一动态范围可达到 68 dB^[41]。Ravaro 等人利用激光频率 2.8 THz, 连续波功率 2 mW 的 QCL, 采用纳米场效应晶体管探测, 信噪比接近 80 dB。对于泵浦光电导 THz 源, 由于其在 2 THz 以上光谱范围的辐射功率会大幅度下降, 因此, THz QCL 为 2 THz 以上光谱区域的高动态范围成像提供了机遇。还应该注意到的, 动态范围的提高除了采用高功率的 THz QCL 来实现外, 还可以采用相干成像技术进一步改进。例如, 文献报道了采用基于肖特基二极管相邻纵向腔模之间混合的伪外差技术, 实现动态范围达到 60 dB 的成像演示, 理论上该系统中探测器的时间常数可以低于 10 μ s^[42]。

2.2.2.2 高空间分辨率成像

与泵浦光电导 THz 源和电子学 THz 辐射源相比, THz QCL 具有更高的工作频率, 根据这一特征, 由瑞利极限可得 THz QCL 辐射光腰的最小特征尺寸可以小于 250 μ m。例如, 对于波长为 100 μ m (频率约 3 THz) 的电磁波, 通过焦距比数为 $f/1$ 透镜聚焦, 根据瑞利判据公式可计算出光腰的衍射极限尺寸约为 $\omega_0 = 2\lambda f/\pi = 64\mu\text{m}$ 。由于 THz QCL 出射激光光束截面轮廓不规则, 因此现有实验系统很少能实现衍射极限分辨率的情况。QCL 表面可以采用双面金属波导结构来提供高的模式限制能力, 使得器件更容易实现高的工作温度和低的阈值增益^[43]。然而, 这种波导结构 (通常约 10 μ m 厚) 会导致亚波长光圈的情况, 光束发散角大, 光功率低, 相应的光束图形也会非常差, 从而限制了这种波导类型的器件在大多数 THz QCL 潜在应用中的用途。另一种替代和更为常用的方法是采用半绝缘等离子体波导结构^[44]。半绝缘等离子体波导通常具有比双面金属波导具有更低的波导损耗, 更为显著的差异是, 后者比前者具有更好的光束质量, 并且可以减小光束散射。因此, 截至目前文献报道的基于 THz QCL 的成像系统都使用的半绝缘等离子体波导结构的器件。尽管如此, 这种器件的激光束截面轮廓仍然不理想。远场光束轮廓测量显示出双瓣激射的现象, 这主要是由衬底和脊型波导两部分的光束衍射^[45]。

为了解决这个问题实现更优化的成像分辨率，可以采用空间滤波的方法滤除杂散光，只留下比较好的光束，具体方法如图2.3所示，首先将从 QCL 辐射出的太赫兹波通过一组匹配的透镜（L1，L2），在透镜组的焦平面处放置一直径为 200 μm 的金属光阑进行滤波，然后再通过一组透镜进行会聚，最后使光斑聚焦在待扫描样品上。

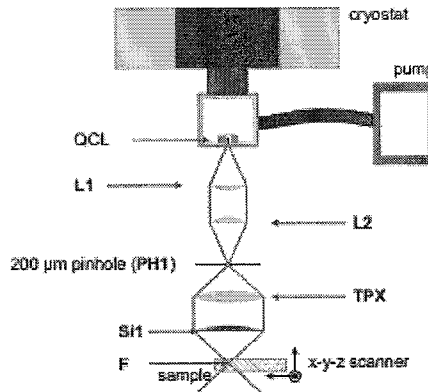


图 2.3 空间滤波获得高质量的 THz 光斑^[45]

图2.4(a) 和 (b) 分别展示了滤波前后的光斑轮廓对比，分别是在光阑处和样品处的光斑测试结果，在滤波前可以看到光斑周围有不均匀的杂散光，滤波之后提高了光斑质量，有助于提高扫描成像结果的分辨率。

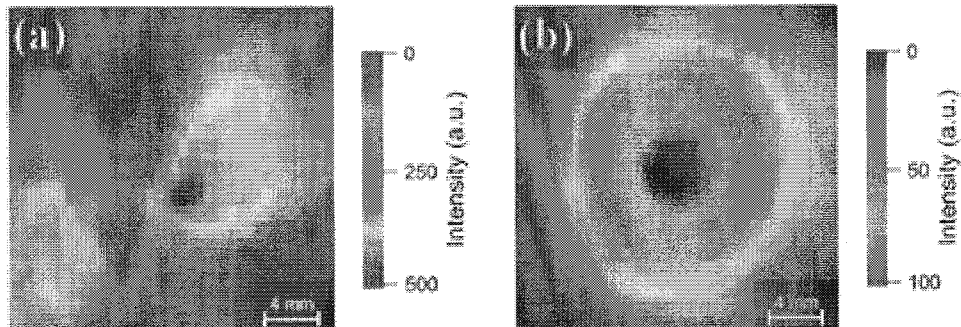


图 2.4 远场光束轮廓 (a) 无滤波前光斑；(b) 滤波后光斑^[45]

2.2.2.3 快速采集成像

大部分的 THz QCL 的成像方法都是通过 THz 波的会聚焦点对样品进行逐点扫描，同时利用探测器获取响应信息，最后将采集强度信息和位置信息还原获得成像结果。

这种方法虽然简单，但并不适用许多实际情况，最主要的是采集速度慢。影响成像速度的主要因素有辐射源功率、探测器的信噪比以及探测过程的响应时间。对于探测器方面，例如通常使用的高利池（Golay Cell）、热释电（如 Bolometer）以及焦热电传感器（如 Pyroelectric Detector）等热探测器，它们的探测过程需要相对较长的时间，响应时间大约为 1-100 ms。因此，在这些系统中，成像采集速率从每秒每像素到几十个像素每秒（pps）的范围不等，对于采集数目较多的对象，总的采集时间可能会从几分钟到几个小时。除了探测器响应时间方面的影响，成像时间主要还受限于软件或硬件数据处理速度以及样品的机械扫描方式所产生的延时。根据 THz QCL 功率高且输出稳定的特性，可以用于研究快速扫描成像，这也是本论文工作选择 THz QCL 的主要原因，具体的实现过程将在第四章中详细介绍。

除此之外，还能将 QCL 用于实时成像，这需要成像速率达到每秒约 25 帧的速率。实现实时成像用的最多的方法是采用多像元素的二维探测器阵列。在过去的报道中，通过将 THz 频段上转换到可见/近红外频段，并通过传统的 CCD 技术来实现阵列探测，但这一方法采集速率较慢而且图像清晰度不高^[46]。另一种实现实时成像的方法是利用焦热电阵列来实现。对于上述方法来说至关重要的是要求辐射源具有足够功率去辐射 2D 探测阵列，以使得每个像元内达到一个合适的响应值。在这一方面，具有高平均功率的 THz QCL 比其他太赫兹辐射源具有更显著的优势。2006 年，Williams 等人利用一个 320×240 的氧化钽热辐射焦平面阵列实现了此类成像。这种探测阵列在 7.5-14 μm 波长响应最大，但其像元在 THz 范围仍然存在吸收。不过就成像本身而言，THz 图像会受红外背景的影响，这一点可以采用帧相减 (frame subtraction) 技术来消除^[47]。成像所用的 QCL 为 4.3 THz，基于共振声子有源区结构，输出峰值功率达 50 mW @ 33 K。焦平面探测阵列工作帧率为 60 fps，QCL 被调制为与它相匹配的脉冲频率下工作，使得图像的采集包括有 THz 信号和无 THz 信号两部分，接着通过从前者中将后者减去，即可实现对红外背景的抑制，同时也减少了其他背景噪声。通过这种采集方式，虽然成像帧率被将至 20 fps，但仍然适合于实时视频成像。

2.2.2.4 远距离成像

由于大气中的水汽对 THz 辐射有很强的吸收作用，所以在 THz 频段进行远距离成像是一个公认具有挑战性的问题，远距离信号的传输功率衰减的范围在 0.5 dB/m 到 10 dB/m，有时甚至会超过 10 dB/m。因此选择合适的辐射频率比单纯提高激光源的输出功率更为重要。

考虑到大气损耗这一因素，远距离的信息传输，除了需要一定的功率外，辐射频率还必须适用于大气吸收谱中的透射窗。在过去的文献中，以 QCL 为成像光源，报道过利用辐射频率在 2.6 THz 和 4.9 THz 两个大气窗口的远距离成像实验，分别实现了往返距离大于 20 m 的相干成像^[48]和距离大于 25 m 的非相干实时成像^[47]。在后一个成像试验中，THz QCL 采用共振声子耗尽结构，其峰值功率约 17 mW (平均功率约 4.6 mW) @ 30 K。不过该实验并不是真正意义上的远距离成像，因为成像中的探测阵列放置于距离目标物表面不到 3.25 m 的位置，仅仅实现了太赫兹波的远距离传输。但该实验仍对大于 25 m 的远距离太赫兹成像奠定了基础，未来可以通过选取更长焦距的光学元件，来增加探测物体与探测器之间的距离，并提高成像的分辨率。

2.3 热辐射探测器系统

2.3.1 Bolometer 简介

热辐射探测器 (Bolometer) 是一种被广泛使用的热感应探测器，一般是用于测量红外辐射的探测器。Bolometer 具有非常小的热容量，但温度变化系数又很高的电阻特性，第一个 Bolometer 是 1880 年由美国天文学家 S.P. Langley 设计制作的^[49]，用涂黑的铂金来吸收热量，并用惠斯通电桥作读出电路，发现这种探测器的探测性能要比热电偶探测器更灵敏。现代 Bolometer 技术的发展主要起始于 20 世纪 80 年代，主要包括金属氧化钒和非晶硅两种。如图 2.5 展示了薄膜硅材料 Bolometer 的工作原理，并对读出电路作了简要图解。通过利用其对热辐射的灵敏性，表现出电阻值的差异，采用读取电压的方式，来判断外界热辐射强度的变化。

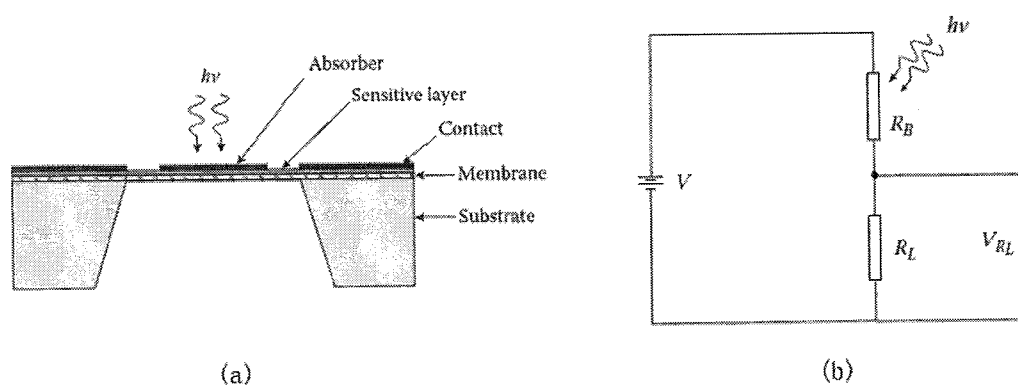


图 2.5 (a) Bolometer 工作原理图; (b) Bolometer 电路图

2.3.2 4.2 K 硅材料 Bolometer 探测系统

在论文中我们使用 Bolometer 探测系统对 THz QCL 激光的电磁波进行探测。探测系统中采用的是硅材料的 Bolometer，器件实物图及电路图如图2.6所示。该器件对热辐射具有很好的灵敏性，大约可以探测频率范围在 0.15 THz - 20 THz 范围的电磁波，频率覆盖范围从中红外到毫米波，因此也可以实现对 THz 波的探测。这种探测器的一大特性就是对热辐射极为灵敏，为了降低热辐射的背景噪声需要利用液氮制冷，温度大约在 4.2 K。任何热辐射脉冲都会引起探测器表面温度的变化，从而导致器件电阻改变，最后利用滤波放大电路对信号放大，通过电压值来读取探测强度信息。

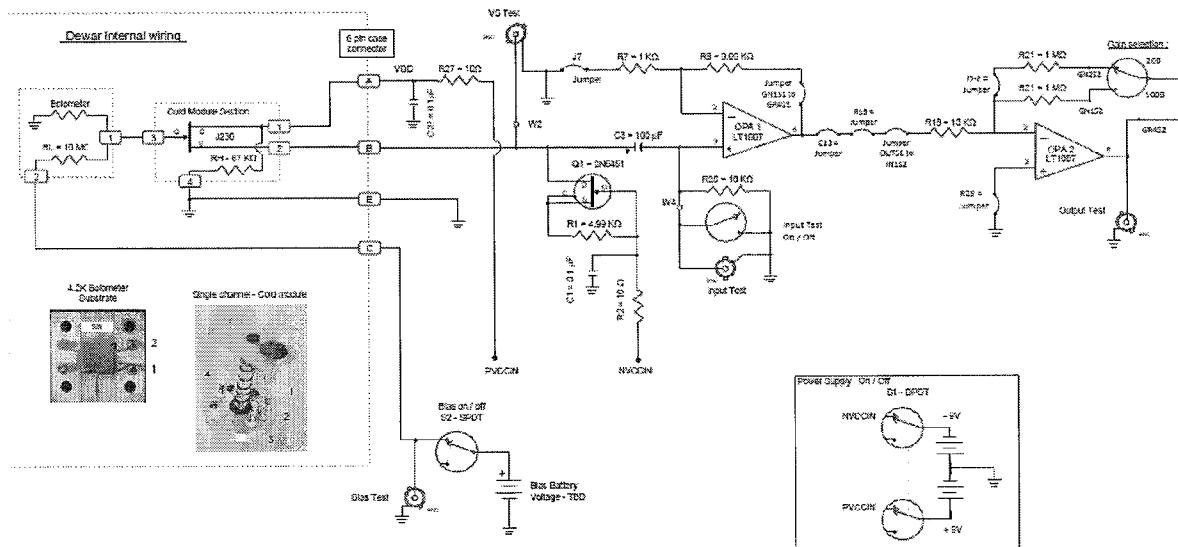


图 2.6 4.2 K 硅材料 Bolometer 实物图及读出电路

因为 Bolometer 的测量方式主要是感受周围温度的变化，需要对入射的光辐射进行调制，Bolometer 也需要能迅速达到稳定，因此这就对 Bolometer 的工作系统有较高的要求，如图2.7为论文中所使用的探测系统。图2.7 (a) 为双层制冷杜瓦瓶，共有三个腔体，从上到下依次为液氮腔体、液氦腔体和器件腔体。

接下来将对整个系统的使用进行简单介绍：

- (1) 安装器件。如图 2.7 (c) 所示，为杜瓦系统倒置后，器件腔体的内部结构图。Bolometer 固定在器件腔体的热沉上，热沉固定在液氦腔体底部。锥形腔用来收集

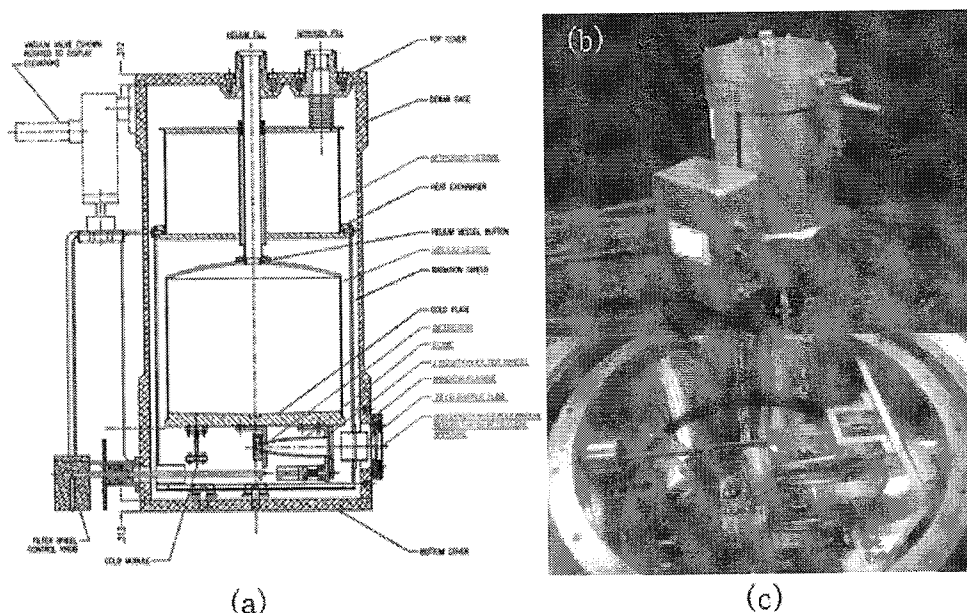


图 2.7 Bolometer 杜瓦瓶探测系统 (a) 双层制冷杜瓦瓶结构图; (b) 双层制冷杜瓦瓶外观实物图; (c) 器件安装部位的腔体内部图

外界的热辐射信号，尖端要紧贴器件，滤波窗片可以滤掉 90% 的 300 K 的背景噪声。

- (2) 抽真空。在对整个系统降温之前需要要对最底部的器件腔体抽真空处理，真空度可以达到 10^{-5} Pa 量级，这样做的目的是避免与外界产生热交换。
- (3) 液氮降温。因为液氮比较昂贵，而且空气中大部分的气体在液氮中均会凝固为固体，所以先用液氮对中间的液氮腔体降温，并在上部的液氮腔体中灌入液氮对中间的液氮腔体进行低温保护。
- (4) 排液氮。在灌满液氮后静置 10 分钟，将中间腔体的液氮利用如图 2.8 所示的方法排出，右侧通入高纯氦气，左侧会有液氮排出，在没有液体排出后再继续通大约 30 s，注意不能通太久否则腔体温度会再次升高。
- (5) 液氮降温。通过中间的注入口缓慢注入液氮，当观察到注入口的外壁有液体析出即表示罐体已经灌满。实验过程中需要注意探测窗口的窗片上是否有凝结水产生，凝结水会吸收太赫兹辐射影响信号探测。

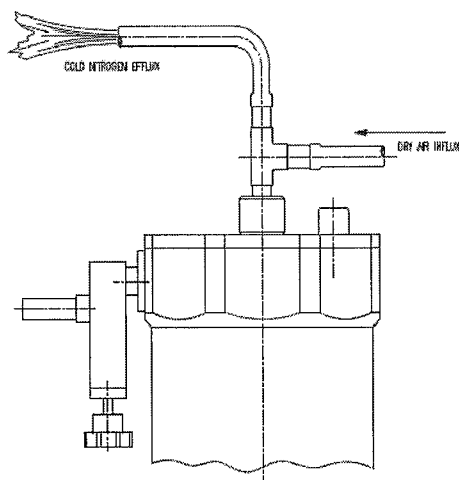


图 2.8 液氮腔体排出液氮方法图

Bolometer 探测系统的整体外观如图 2.7 (b) 所示，杜瓦瓶在加满液氮和液氮降温的情况下可以连续工作至少 20 个小时，每隔6小时左右液氮腔体需要添加一次液氮。该探测系统适合用于长时间的实验，实验时间越长越省液氮，而且没有机械装置，不会带来震动影响，输出信号稳定，如图2.9所示，先利用信号发生器产生为 10 kHz，占空比为 1.5% 的脉冲信号，在通过锁放 80 Hz 的方波信号，脉冲调制为图中绿色所示的信号，作为 THz QCL 的激励信号，通过 Bolometer 探测，发现幅值大约在 10.21 V，信号稳定的上升沿时间大约为 20 ms。

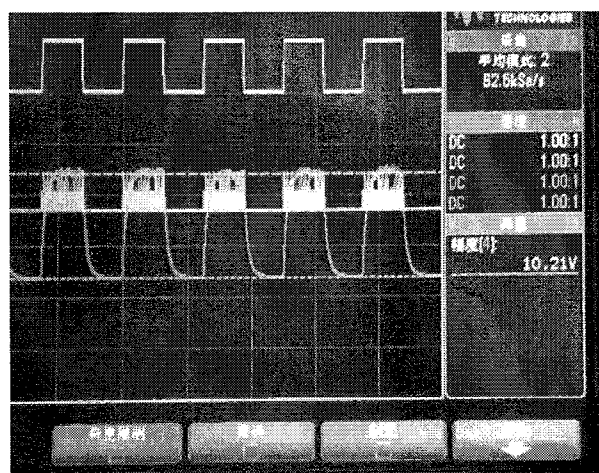


图 2.9 Bolometer 在 THz 脉冲信号下的探测信号

2.4 本章小结

本章主要介绍太赫兹辐射源和探测器，并对新型的太赫兹辐射源器件 THz QCL 的原理与器件结构进行了详细介绍，并根据 THz QCL 在太赫兹辐射源中具有能量转换率高、体积小、易集成和辐射功率高等优点，介绍了 THz QCL 在成像方面的诸多优势。然后介绍了成像所用的 Bolometer 探测系统及注意事项。

第三章 基于 LabVIEW 的数据采集、机械控制和软件交互

美国国家仪器 (NI) 公司是一家实验仪器硬件公司, 为了使用户更方便快捷地使用仪器以及实现仪器的自动化工作而开发了 LabVIEW。它与其他类型的计算机编程语言有着很大的不同之处, 其他计算机语言一般都是通过文字类型的语言产生代码, LabVIEW 则是使用图形和连线的编辑语言, 所以也被称为 G 语言^[50]。LabVIEW 有很多用途, 主要用于测试测量、控制、数据采集等诸多领域。论文中通过 LabVIEW 实现了对电机的控制, 多软件协同工作, 以及数据采集等任务。

3.1 数据采集基础

为了实现对自然界中物理量的测量, 通常需要通过各种传感器将这些连续变化的物理量转化为数字信息, 再传递给计算机进行处理, 处理得到的结果在转化为所对应的模拟量来体现外界的物理系统。这种解决数字量和模拟量相互转化的问题, 也就是采样与重构的问题, 这也是数据采集所要解决的主要问题。

3.1.1 采样原理

为了减少后期数字处理的难度, 数据采集需要先经过信号调理电路进行提前处理, 将模拟信号变成适于数字处理的形式。然后将处理过的被测模拟信号送入采样/保持电路, 接下来需要量化处理, 在采样/保持电路中对模拟信号按照设定好的采样间隔进行离散化处理, 变成等间隔的脉冲序列。为了变成数字信号, 还需要模数转换器对离散脉冲序列进行量化和编码, 最后再由计算机对接收到的数字信号进行数字处理。处理结果再由数模转换电路转换成模拟量, 经过低通滤波器作平滑处理后送到执行元件。如图 3.1 所述, 模拟信号到数字信号转换的过程可以分为 3 步: 采样/保持、量化和编码。

图中, $X(t)$ 表示输入的模拟信号量, T_s 表示采样周期, 其倒数即为采样频率, $X_s(nT_s)$ 表示输入信号离散化后的结果。

根据奈奎斯特采样定理可知, 采样过程需要选择合适的采样率。如果采样频率过高, 虽然还原度更好, 但会造成数据量过大不利于后期的数据处理。采样频率过低会造成不能对信号真实还原, 例如产生混叠干扰。为了避免这种现象发生, 在采样之前

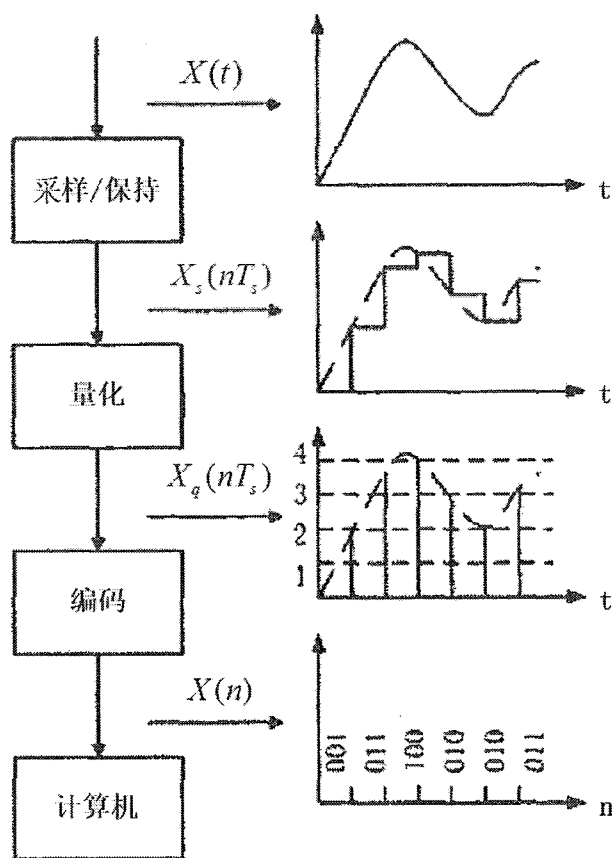


图 3.1 模拟信号的数字化过程

首先应通过模拟低通滤波器将没用的高频噪声滤除，其次采样频率应至少满足大于信号最高频率的 2 倍。在实际工作中，真实的模拟低通滤波器不可能有理想的截止特性，信号频率可能会比截止频率偏小，因此采样频率往往选为截止频率的 3-4 倍。采样周期的选择也需要认真考虑，由于被测对象多种多样，采样周期的选择又是一个比较困难的问题。在实验中我们往往采取如下经验结论，如果要获取采样信号的频率信息，则采样率应为最大信号频率的 2 倍以上；如果要获得采样信号的幅度信息，则采样频率一般选择最高信号频率的 10 倍以上。

3.1.2 数据采集卡

在介绍数据采集卡之前，首先应该对信号的类型有些了解，对于不同的信号要选择合适的采集方式和配套的采集卡。在数据采集领域需要清楚以下知识，了解信号的分类，如图 3.2 所示。

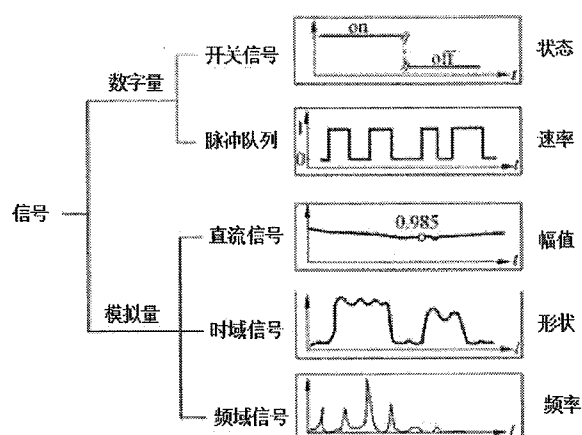


图 3.2 信号分类

论文中所需要采集的数据是电机位置和速度信号，以及探测器的探测强度（电平）信号。电机的信号是由安装在转轴上的光学编码器输出的，属于数字信号中的脉冲信号。探测器的探测强度信号是变化比较缓慢的模拟信号，属于模拟直流信号，是太赫兹成像中最主要的采集信号。信息的幅度通常是直流信号中最重要的信息，因为一般直流信号变化缓慢，数据采集可以不需要很高的采样速率。

本套成像系统在数据采集模块主要使用的是数据采集卡来实现，采用 NI-STC3 定时和同步技术（可以实现高级定时和触发）、基于 USB 的高性能 NI 信号读写、完全重新设计的机械外壳以及多核优化的驱动与应用软件，在性能上达到了一个新的高度。能够实现模拟输入、模拟输出、数字 I/O、计数器/计时器操作等功能。数据采集卡可以达到 16 位的空间分辨率，最大电压范围为 $\pm 10\text{ V}$ ，每通道的最高采样速率为 2 MS/s。

一般来说，数据采集设备都有自己的驱动程序，驱动程序控制数据采集设备的硬件操作。NI 公司的驱动软件是以 LabVIEW 为运行环境的 NI-DAQmx 驱动软件，用户可以通过该软件提供的各种 DAQmx 函数节点方便地对硬件进行访问。在下一节中我们将具体介绍如何用 DAQmx 进行数据采集。此外，为了对外界硬件设备进行管理和配置，我们可以使用 NI 公司提供的工具软件 MAX (Measurement & Automation Explorer)。我们主要利用 MAX 的快速性能测试功能对硬件测试，这也是最常用、最实用的功能，但 MAX 并不能识别其他厂商提供的硬件设备。

3.1.3 数据采集驱动软件 (NI-DAQmx)

原始信号、信号调理设备、数据采集设备和计算机可以构成一个完整的数据采集系统。通常情况下，自然界中的原始物理信号并不能直接测量并转化为电信号，所以，我们针对不同的物理量设计了各种传感器，并将这些物理信号转换为可以被数据采集设备识别的电信号。由于某些电信号不便于直接进行测量，因此需要加入信号处理硬件模块，通过信号处理模块对探测信号进行像放大、滤波、隔离等处理。将处理后的模拟电信号通过量化转换为数字信号，最后发送给计算机进行处理，反过来，计算机也可以将编辑好的数字信号转换为模拟值再向外输出。为了方便用户与硬件交互，并且完成采集任务，通过计算机上安装的相应软件完成数据采集的相关工作。接下来将主要讲解数据采集设备的驱动软件 DAQmx。

NI-DAQmx 软件节省了用户的开发时间，并提高了数据采集应用程序的性能。NI-DAQmx 拥有程序编程的接口，利用它可以直接使用 LabVIEW 的所有功能集（比如模拟输入输出、还有数字 I/O 和计数器功能），并可以对其进行编程。而且，数字 I/O 设备和模拟输出设备也可由同一个功能集进行编程。在 LabVIEW 中，通过使用多态机制来实现这些目的。通过编写一个多态 VI 就可以对不同数据类型进行处理，用于一个或多个输入输出终端。对于所有 LabVIEW 可支持的编程环境 NI-DAQmx API 都是一样的。通过学习运用一个功能集，就可以实现大部分的 NI 数据采集相关硬件进行编程工作。另外，我们还可以通过 DAQ 助手来提升开发体验，如图 3.3。这个开发工具不需要用户拥有太多的编程经验，仅通过图形化界面就可以实现各种所需要的数据采集任务。但是，因为触发时钟的信号必须通过我们设定，因此通常很难实现同步性。

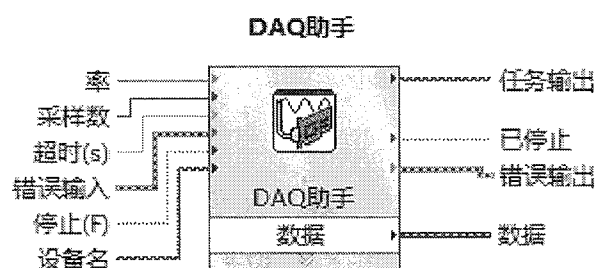


图 3.3 DAQ 助手控件

我们通过 DAQ 助手方便地实现了对信号采集的配置工作，如图 3.4 显示了如何配

置 DAQ 助手来实现探测器的输出电压的采集。采样模式为连续采样，采样数为 5000 个电压值，采样率为 1 kHz，采用开始触发采集模式。

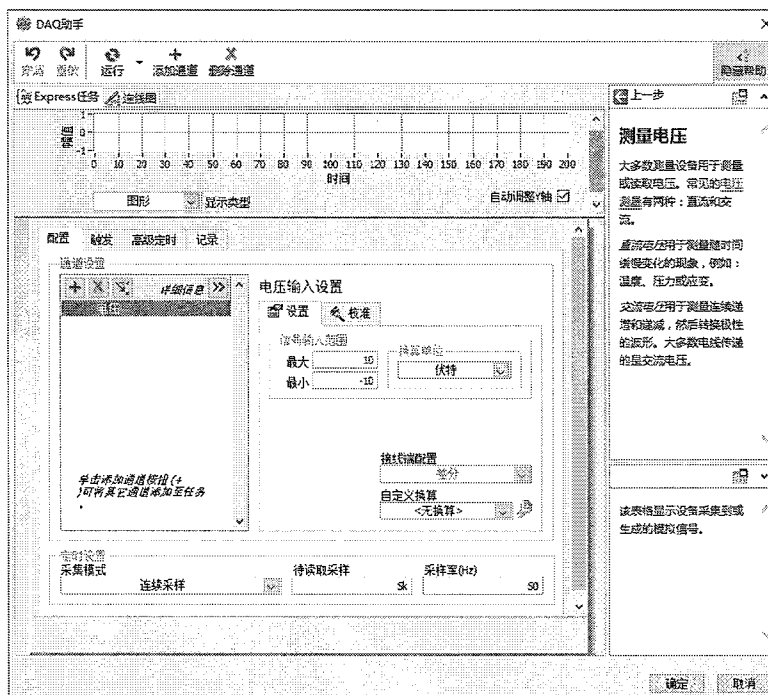


图 3.4 通过DAQ助手实现对探测器的电压采集

触发是数据采集中必不可少的功能，通过触发可以实现启动、停止或同步 DAQ 事件。触发信号通常是一个数字或模拟信号，通过分析其状态来决定下一个动作。常用的操作是开始触发 (Start Trigger) 和参考触发 (Reference Trigger)。LabVIEW 中通过“NI-DAQmx 函数”来对触发进行配置并执行指定操作。

开始触发是指只有在收到触发信号后才开始采集数据，采样连续信号时一般采用这种方法，如论文中采用 Bolometer 作为探测器的数据采集模式。

参考触发是一种比较复杂的触发方式，主要用于需要采集触发信号到来之前的数据。当软件收到开始命令时，首先会提前采集设定数量的扫描点进入一个循环的缓冲中去，然后参考信号到来时，数据会被继续采集到另一个缓存中去，当所有需要的扫描点采集完毕后，返回的缓冲数据将包括按照采集顺序合并的前触发扫描数据和后触发扫描数据，其中后触发扫描点数等于要求扫描的总点数减去前触发扫描点数。该种触发模式常用来采集带有参考信号的数据，在论文中，THz QCL 工作在脉冲模式下，为了采集到探测器在 QCL 的激励脉冲的下降沿到来前的电压值，采用了参考触发模

式。如图 3.5 和图 3.6 分别是参考触发采集模式的程序前面板和程序框图，实现了对参考信号下降沿到来前的 3 次电压值的采集。

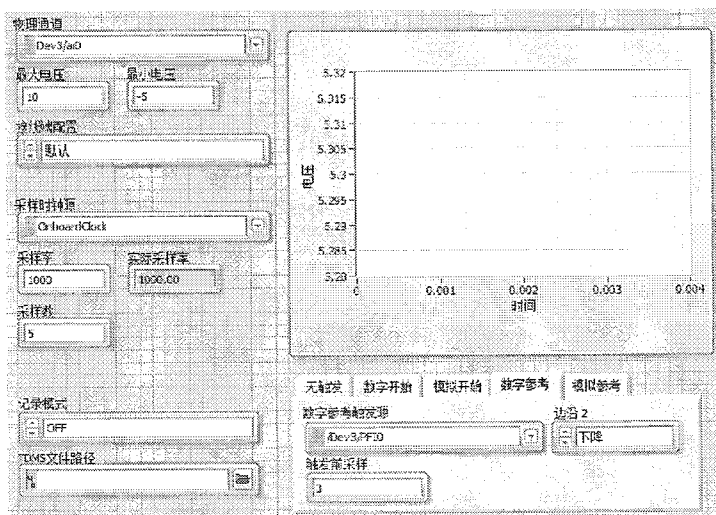


图 3.5 参考采集模式程序前面板

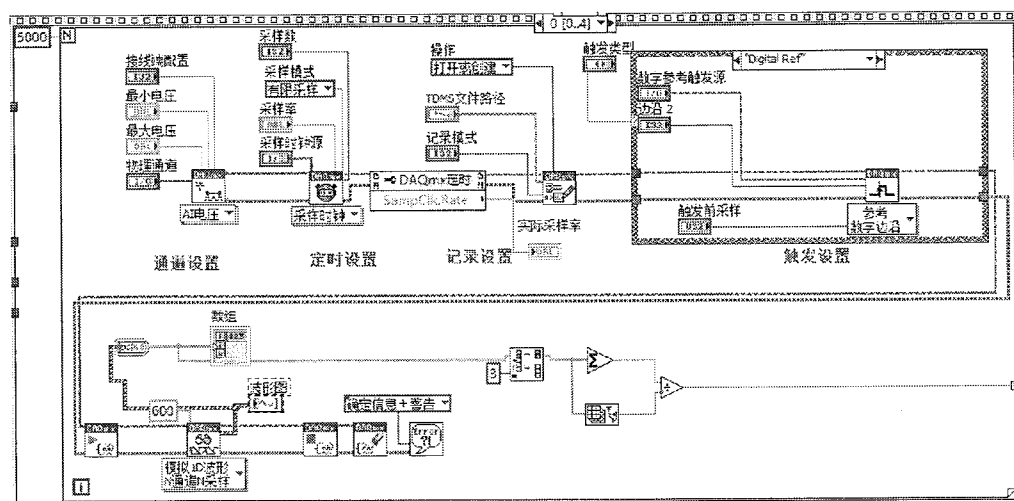


图 3.6 参考采集模式程序框图

3.2 机械控制

这一节讲述如何用 LabVIEW 实现对二维旋转扫描机械的控制。机械控制硬件部分主要包括步进电机和伺服驱动器，驱动器与计算机之间的通信采用以太网模式的高

速通信。

3.2.1 LabVIEW 编程实现电机控制

LabVIEW提供了丰富的外部程序接口，它与其他应用程序的链接，主要是通过.NET 技术应用、ActiveX 技术应用、动态数据交换、外部代码调用、库函数调用、运行外部程序等实现的。本套成像系统中实现电机自动化控制采用的方式是，通过LabVIEW 中的 ActiveX 控件来实现 ABB 调试软件中的 mint 控制函数的调用。ActiveX 是一个技术集统称，由微软公司提出，这项技术可以实现代码复用，为了实现一些复杂的计算需求可以将多个程序连接在一起使用。一般的，各种应用程序都会有一套自己开发的公共对象，如控件、函数等，通过对这些对象进行存取方法的定义，就可以在一个软件中实现对多个应用软件函数的相互调用，而且我们并不需要看到对象的代码。ActiveX 正是采用这种客户机/服务器模式来实现对不同应用程序的连接，客户端是指调用程序的一方；服务器是指被被调用程序中的对象。

实现电机的控制使用的是 ActiveX 自动化技术，它是 ActiveX 的重要技术之一。LabVIEW 通过调用 Mint WorkBench 程序的方法和属性，实现对驱动器的控制。图3.7表示的是，在程序框图中配置好的 mint 控制器，包括旋转电机控制和平动电机控制，通过它实现了两个简单的功能，“SetUSBControllerLink”实现通过 USB 建立与计算机的通信连接，“DoCancelAll”用于重启复位，可以停止电机运动，并清除电机在工作中出现的错误。

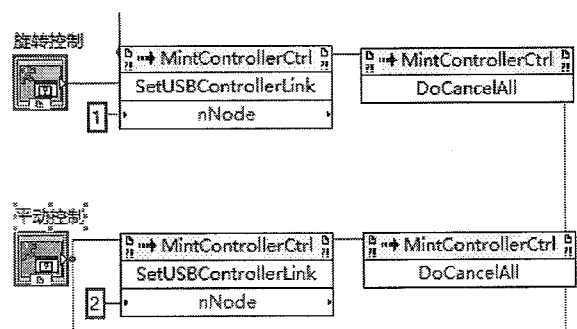


图 3.7 ActiveX 实现电机控制程序框图

3.3 软件交互

数据采集完成后，要对采集到的数据进行处理最后成像，但图像处理并不是 LabVIEW 所擅长实现的，作为工程师和科研工作者常用的数据分析和图像处理工具是 MATLAB，其具有强大的计算、绘图、仿真等功能，但是 MATLAB 并不擅长界面开发，在仪器连接控制和网络通信等方面更是和 LabVIEW 相差甚远。因此论文中考虑将两者结合起来编程，在 LabVIEW 中实现调用 MATLAB 函数，这样可以充分利用两者的优点，从而轻松地在 LabVIEW 中实现数学分析。

除了可以用 MATLAB ActiveX 对象的方法来实现 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程外，本节将提供一种更简单直接的方法——MATLAB Script 节点。在 LabVIEW 程序面板中搜索“MATLAB Script”即可找见该函数。注意与“MathScript”节点相区分，“MathScript”节点是 LabVIEW 自带的，其脚本仍在 LabVIEW 中执行，“MATLAB Script”节点中的脚本相当于是 MATLAB 中的 M 文件，运行它时会启动 MATLAB，并在 MATLAB 中执行，因此 MATLAB 中自带的原函数均可在“MATLAB Script”节点中运行。如图 3.8 (a) 所示，为成像系统中将采集到的数据输入给“MATLAB Script”节点中的脚本执行，最后得到图 3.8 (b) 所示的结果。

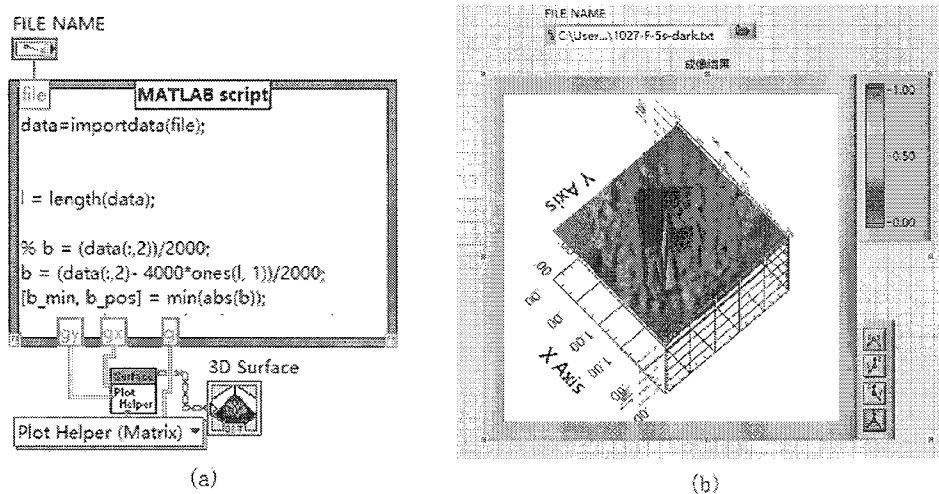


图 3.8 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程 (a) 程序框图；(b) 前面板及成像结果

3.4 本章小结

LabVIEW 由于其本身的直观性和易学性，越来越多得被用于实验室和科研工作中去。本章主要结合太赫兹扫描成像实验当中所要用到的技术，对 LabVIEW 及其相关技术做了详细介绍，其中包括数据采集、机械控制以及与其他软件混合编程的技巧。通过以上内容的介绍，可以更方便得理解下一章中扫描成像系统中的数据采集处理模块、同步控制模块及图像显示模块的功能实现。此外，LabVIEW 还有很多方便且强大的功能，比如对实验室各种仪器的控制，实现对实验数据的自动化测试等等。

第四章 太赫兹快速扫描成像

正如第一章中所说，在过去的太赫兹扫描成像系统中通常采用的都是逐行二维机械扫描的成像方式，它存在着扫描速度慢，以及由于机械磨损会产生齿距误差等问题。对于实时成像，虽然解决了成像速度慢的问题，但由于电光晶体本身光学性质不均匀以及太赫兹光波散射会造成图像畸变，很难获得高质量的成像效果^[51]。因此，如何获得高速高分辨率的 THz 成像效果，仍是未来研究的重点。本章将具体介绍通过旋转扫描的成像方式来提高 THz 成像扫描速度的方法。

4.1 成像系统

实验主要采用可旋转和平移的二维平移台作为机械扫描装置，成像方式为反射式成像，太赫兹波快速旋转扫描成像系统包括：THz 辐射源、THz 探测器、机械扫描装置、传输会聚光路系统、信号采集处理模块、同步控制模块及图像显示模块。整个系统处于开放的实验环境，环境温度为 25 °C，相对湿度约为 40%。

实验中 THz 发射源采用太赫兹量子级联激光器 (THz QCL)，所用的 THz QCL 是基于 GaAs/AlGaAs 材料体系，有源区采用分子束外延技术 (MBE) 在半绝缘 GaAs/AlGaAs 衬底上生长，为四阱共振声子结构^[52]，波导结构为单面金属波导，发射 THz 波频点为 4.3 THz，采用液氮压缩式制冷机制冷，工作温度为 10 K，输出平均功率为 0.8 mW，器件采用脉冲工作模式，脉冲频率为 10 kHz，电源驱动占空比为 1.5%。THz 探测器采用热辐射探测器 (Bolometer)^[53,54]，这种探测器对红外光更敏感，响应速度不如 THz QWP，响应时间大约为 0.025 s，探测频率范围从 0.15 THz 到 20 THz，属于宽谱探测器。这种热探测器适合于对连续输出的 THz 辐射进行有效探测，而对 THz QCL 输出的脉冲辐射，只能获得其平均功率，要获得器件的脉冲峰值功率需通过占空比进行计算。对于本套成像系统，实验中只需获得探测强度的平均功率即可，不必求器件的脉冲功率。

机械扫描装置包括作为载物台的电机部分和伺服驱动器部分，在第三章中已经对伺服驱动器做了详细介绍，电机部分如图 4.1 所示，由上到下依次为，作为载物台的平面镜，旋转台和平移台。工作时，载物台在旋转台的带动下以某一固定角速度匀速旋转，于此同时平移台以固定速度匀速平移运动。

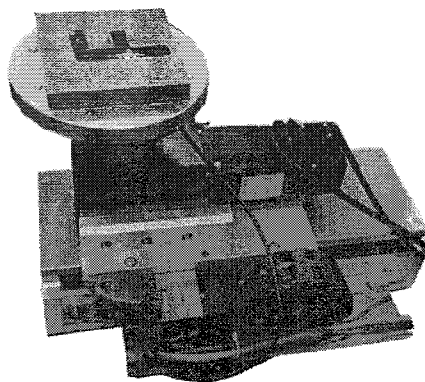


图 4.1 机械扫描电机

传输会聚光路系统中所用的抛物面镜直径为 76 mm，焦距为 127 mm。作为载物台的平面镜尺寸为 100 mm × 100 mm。抛物面镜与平面镜的表面均是镀金膜，对 THz 能量的损失不到 10%。分束镜是直径为 76 mm 的高阻硅，太赫兹每通过一次分束镜将损失大约 60% 的能量。成像系统的实物图如图 4.2 所示。



图 4.2 THz 快速扫描成像系统实物图

信号采集处理模块、同步控制模块及图像显示模块均由 LabVIEW 编程实现，已在第三章中作了详细说明。如图 4.3 所示，具体实验过程为：THz QCL 向外辐射太赫兹波，首先经光路系统中抛物镜 1 会聚，然后透过分束镜，接着平行传输至抛物镜 2，

抛物镜2 将太赫兹波会聚为点光源打在载物台的待测物体上, 根据光路可逆的原理, 太赫兹波反射并按原路再次会聚、传输, 到达分束镜时一部分太赫兹波透射回到激光器, 另一部分反射到达探测器表面, 被探测器记录激光强度信息。因为待测物体不同位置对激光的反射和吸收强度信息不同, 记录的强度信息也就不同。探测器接收到激光强度信息将其转换为电信号并发送至信号采集处理模块中的数据采集卡。数据采集卡的采集频率设为 1 kHz, 即 1 ms 采集一次强度信息, 由于采集速度较高, 探测信号会先缓存在数据采集卡的内存中, 采集结束后再发送给计算机处理。

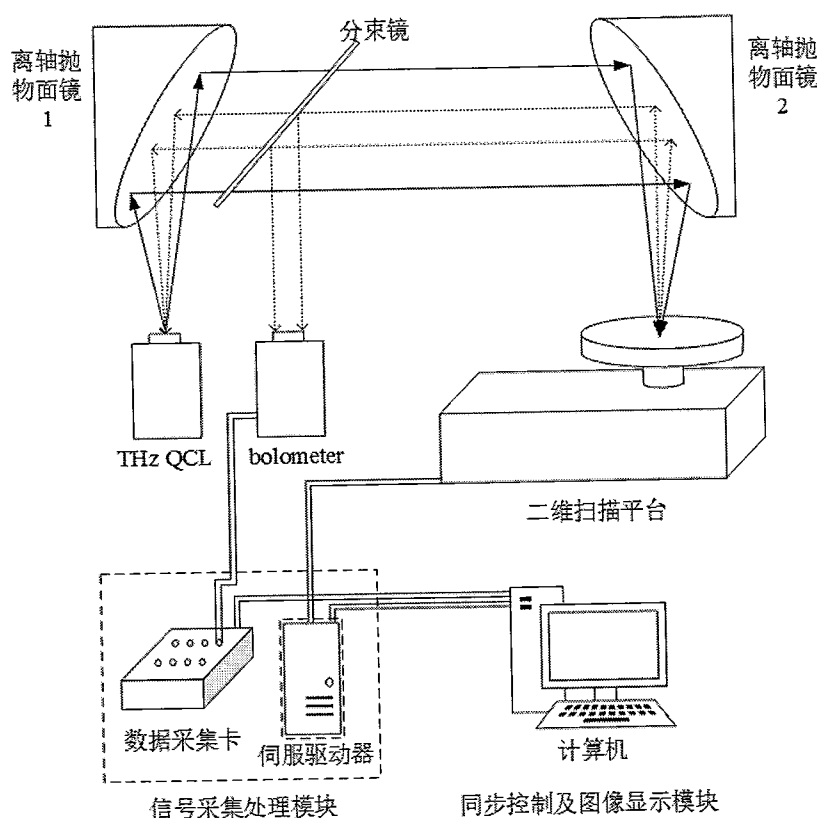


图 4.3 THz 快速扫描成像系统结构示意图

4.2 成像过程及成像原理

旋转台和平移台的工作原理图如图 4.4 (a) 所示, 太赫兹波的会聚光斑位置始终保持不变, 通过旋转台和平移台的运动使光斑可以扫描到载物台上待成像区域。具体扫描过程如下: 扫描的起始点为旋转台的中心, 首先以 8 转每秒的速度旋转, 同时平移台以 8 mm/s 的速度匀速平移。为保证开始扫描时旋转台和平移台均达到匀速运动,

在旋转台平移至距离起始点 20 mm 处开始扫描, 此时太赫兹会聚光斑恰好打在旋转台中心。采集卡开始以 1 kHz 的采集速率采集探测强度, 同时驱动器 1 ms 采集一次旋转台和平移台的位置信息, 即位置采集频率也为 1 kHz, 扫描时长为 5 s, 共记录 5000 个点。伺服驱动器控制二维机械扫描平台的所有运动, 并且记录它们的位置信息, 位置信息首先缓存在伺服驱动器中, 全部采集完后一起发送给计算机。最后, 在计算机上仅还原位置信息可得到如图 4.4 (b) 所示的二维螺旋线扫描散点图, 成像范围是直径 80 mm 的圆形区域。将探测器探测到的所有强度信息通过同步控制模块加在每个像素扫描点上, 通过图像处理即可得到最终的成像结果。直线电机最小分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 旋转台最高转速为 1000 r/min, 通过对系统的安全性进行分析, 并且考虑到样品固定的稳定性, 建议旋转台的转速不超过 10 r/s, 论文中旋转台的转速均为 8 r/s。

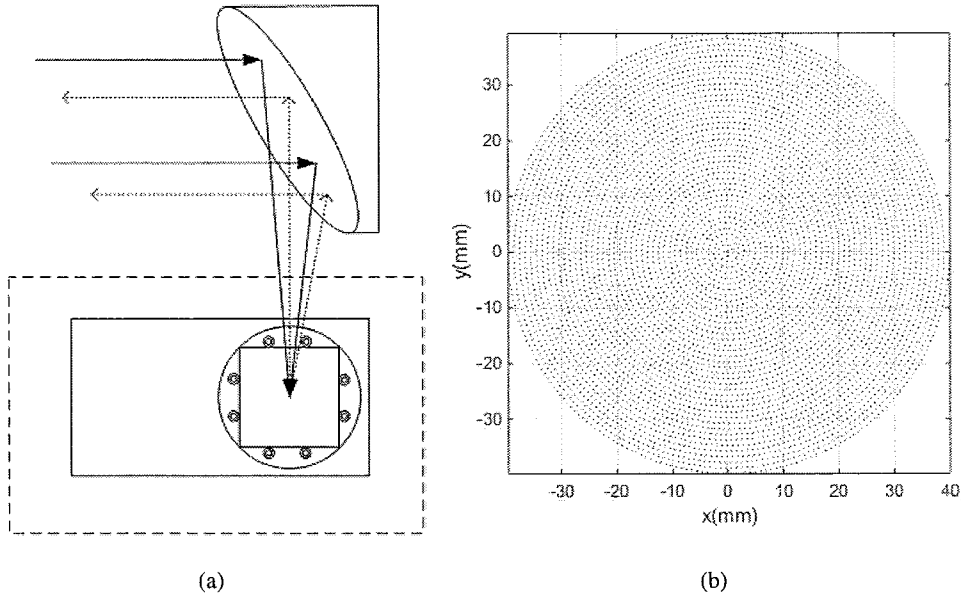


图 4.4 二维扫描平台工作原理图 (a) 旋转台和平移台的俯视图; (b) 旋转扫描区域的二维散点图

计算机通过 MATLAB 软件对采集到的数据进行处理。首先将采集到的 5000 个点的旋转角度信息记为 a , 平移位置信息记为 b , 探测强度信息为电压值, 范围在 $\pm 10\text{ V}$ 的范围内, 我们将其归一化到区间 $[0,1]$ 内, 并记为 z 。根据阿基米德螺旋线公式将采集数据由极坐标系的位置信息变换为平面直角坐标系的位置信息, 如公式 4.1 所示, 得到采集点的二维位置坐标记为 (x,y) 。对于探测强度信息可记为形如 $z = f(x,y)$ 的离散函数。

$$x = b \times \cos(a), \quad y = b \times \sin(a) \quad (4.1)$$

在图像处理中，对坐标值进行数字化的过程称为取样，对幅值数字化的过程称为量化。如果将探测强度信息用不同颜色或灰度值表示，在直角坐标系中可获得如图 4.5 所示的结果，图 4.5 (a) 为二维显示结果，图 4.5 (b) 为三维显示结果。这样的结果只是对离散坐标的函数图，为了要获得数字图像的结果则需要对 $z = f(x, y)$ 网格化，即先将离散数据转化为一个二维阵列 $F(X, Y)$ ，该阵列包含有 M 行和 N 列，其中 (X, Y) 是离散坐标， $M \times N$ 即为所成图像的分辨率。为便于表达，我们对这些离散坐标使用整数值： $X = 0, 1, 2, \dots, M-1$ 和 $Y = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。这样，数字图像在原点的值就是 $F(0, 0)$ ，图像在任何坐标 (X, Y) 处的值记为 $F(X, Y)$ ，用坐标值决定空间位置，通过对原函数 $z = f(x, y)$ 插值获得 $Z = F(X, Y)$ ，具体的插值算法将在后面介绍。最后将其表示为一个 $M \times N$ 的数值阵列，用公式可以表示为

$$F(X, Y) = \begin{bmatrix} F(0, 0) & F(0, 1) & \dots & F(0, N-1) \\ F(1, 0) & F(1, 1) & \dots & F(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ F(M-1, 0) & F(M-1, 1) & \dots & F(M-1, N-1) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

该式的两边以等效的形式定量表达了数字图像。右边是一个实数矩阵，该矩阵中的每个元素即为该点的像素。本实验成像结果中相邻像素间距为 0.2 mm。

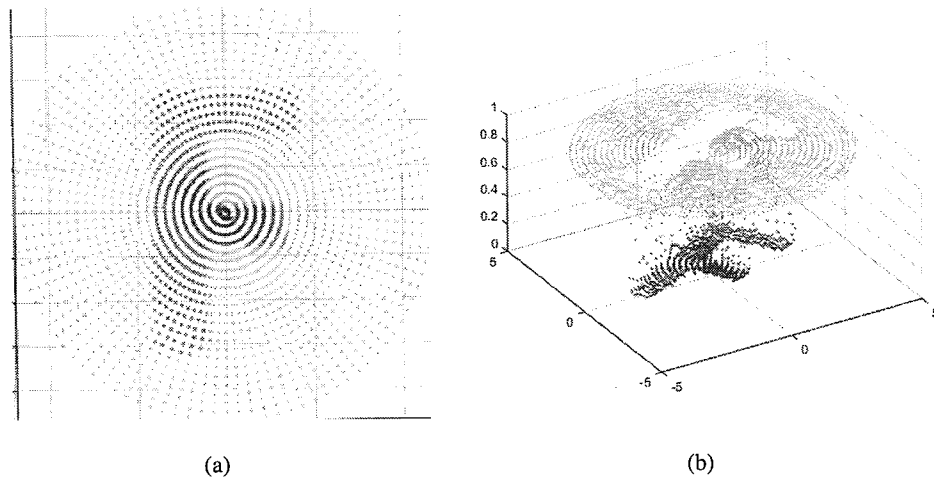


图 4.5 样品取样和量化后的离散图 (a) 二维离散图；(b) 三维离散图

实验中通过 MATLAB 对 $z = f(x, y)$ 进行了离散点网格化处理, 使用了 MATLAB 中的 `griddata` 函数^[55], `griddata` 函数可以实现将离散的数据通过插值的方法转化为规则的格点矩阵, 在原函数中, `griddata` 提供了4种插值方法: 最近点插值 (nearest)、线性插值 (linear)、三次多项式插值 (cubic)、四格点样条插值 (v4), 可以方便地实现对将离散的邻近点均匀分布在光滑曲面上^[56]。4 种插值方法的成像结果如图4.6 所示。通过图像可以看出, 最近点插值和线性插值结果构成的曲面不光滑而且不连续, 三次多项式插值和四格点样条插值结果可以获得较为光滑的曲面。在计算时间方面最近点插值耗时 1.44 s, 线性插值耗时 0.85 s, 三次多项式插值耗时 0.61 s, 四格点样条插值耗时 74.21 s。通过实际的实验结果可知, 最近点插值和线性插值方法速度快, 但拟合后的曲面不光滑, 如图 4.6 (a) 所示, 所成图像的边缘带有明显的螺旋线轨迹; 四格点插值虽然可以获得较为平滑的重构图像, 但由于在圆形区域外部也进行了大量无用计算, 在成像耗时方面远远超过其他三种计算方法, 综合成像效果与成像时间等多种因素考虑, 在实验中选择三次多项式插值方法。

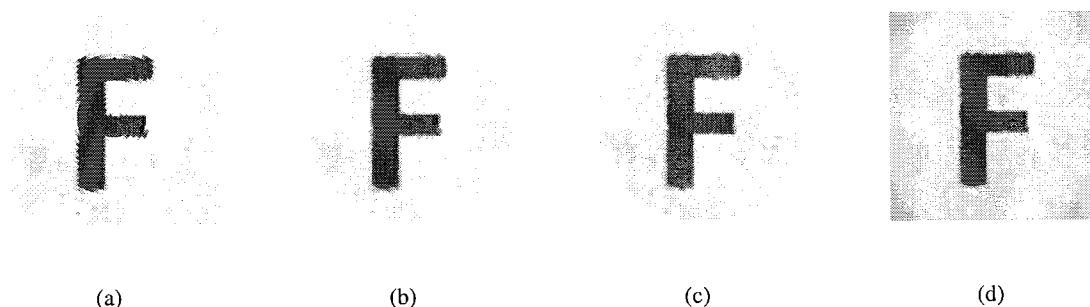


图 4.6 `griddata` 函数的四种插值方法对应的成像结果。(a) 最近点插值; (b) 线性插值; (c) 三次多项式插值; (d) 四格点样条插值

此套成像系统的优势在于, 除了可以提高扫描速度, 降低成像时间外, 在光路系统方面也有很大改进。不过成像系统对光路的要求比较高, 在旋转扫描的成像系统中, 非常关键的一点就是开始采集数据的起始位置必须在旋转台的中心位置处, 如果出现偏移就会出现成像结果失真扭曲的现象。对于可见光可以通过将平移台先平移到 2 cm 的起始位置处, 直接使扫描光斑打在旋转台中心即可, 但对于不可见光的太赫兹波则需要一定的技巧才能实现调零。如图4.7 所示, 为光斑在4个方向上偏移 5 mm 出现的图像失真现象。当光斑向上偏时, 图像会向上扭曲, 并且越靠近上部的地方越变得越窄, 如图4.7 (a) 所示; 当光斑向下偏时, 图像会向下扭曲, 并且越靠近下部的地

方变得越窄，如图4.7 (b) 所示；当光斑向左偏时，相当于扫描采集延迟了，因此会造成图像中间部分的点欠采集，图像会出现整体向内收缩的现象，如图4.7 (c) 所示；当光斑向右偏时，相当于扫描采集提前了，会造成图像中间部分重复采集了两次，但在数据还原为图像时仍按照一次去进行处理，因此会出现如图4.7 (d) 所示的图像膨胀现象。

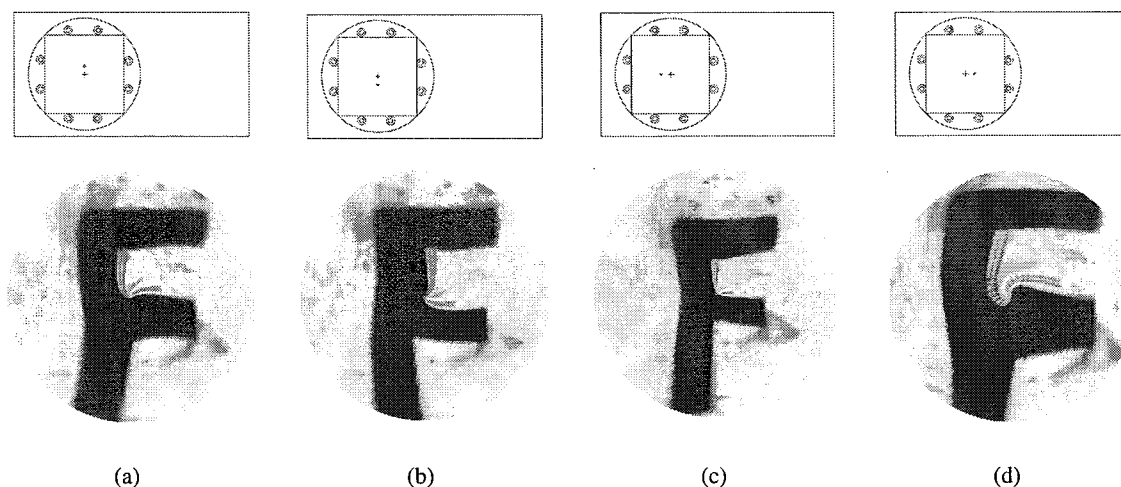


图 4.7 光斑偏离旋转台中心的成像结果。(a) 光斑起始点在十字中心上方 5 mm；(b) 光斑起始点在十字中心下方 5 mm；(c) 光斑起始点在十字中心左方 5 mm；(d) 光斑起始点在十字中心右方 5 mm

综上所述，快速旋转扫描成像系统可以大幅度提升单源单探测器的成像速度，与以往的反射透射成像光路不同，在本实验中只使用了一组离轴抛物面镜，有效减少了光路元件数量，另一方面太赫兹的激光器和探测器放在同一侧，未来考虑将太赫兹激光器与太赫兹探测器封装在同一个热沉上，这样可以将激光器和探测器集成在一个杜瓦瓶中，进一步减少系统中实验装置的使用成本和空间成本。但该套系统还不够成熟，对光路的准直性要求比较高，另外机械的振动也可能影响到成像的结果，对振动的解决可以通过加固平移台解决。通过上述对一些已知的失真情形的分析，可以在以后实验中出现失真时，及时发现失真原因并通过带有小孔的光阑快速校准光路。

4.3 成像结果与分析

成像系统的空间分辨率主要取决于会聚焦点的大小，如图 4.8 所示。焦点的尺寸是利用非制冷测微辐射热 THz CCD 相机测量的。该相机的探测器镜头为非晶硅材料，

视场范围为 320×240 的阵列，像素尺寸为 $23.5 \mu\text{m}$ ，探测频率范围在 $1\text{--}7 \text{ THz}$ 。由图 4.8 可知，载物台表面上的聚焦光斑的直径大约为 0.4 mm 。

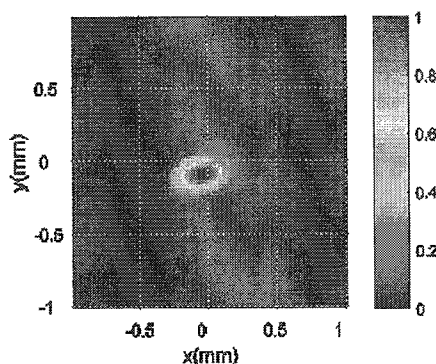


图 4.8 THz CCD 测得的聚焦后光斑

根据近几年的文献调研发现，扫描成像速度的最大限制取决于扫描机械的移动速度。往常采用的二维直线扫描的成像方式，在每条线扫描结束时会产生非常大的速度变化，所以会影响扫描速度。对于单探测器成像，利用阿基米德螺旋线的扫描成像方式，在扫描过程中不会因方向改变，而降低扫描速度，因此可以大幅度缩短扫描成像时间。本实验中的焦点尺寸大约为 0.4 mm ，成像范围的直径大约为 80 mm ，共采集 5000 个像素点。由于中心部分和边缘部分的采集点的密集程度是不同的，所以在这种数据采集机制下，成像物体的中间部位的分辨率会高于边缘的分辨率。

实验中首先对一个无遮挡的塑料牙签进行扫描成像，牙签长度约为 75 mm ，牙线部分的宽度大约为 1.8 mm ，如图 4.9 (a) 所示。图 4.9 (c) 是所对应的太赫兹成像结果，成像结果中牙签中间部分的方块是用来固定牙签的透明胶带。成像结果中的明暗相间的圆环是由于 Bolometer 在探测时响应速率跟不上采集速率所造成的，需要通过后期的图像处理解决，或者降低采样速率，但这样会影响到成像扫描时间，在未来的改进中将会使用响应时间更快的探测器来做实验，比如太赫兹量子阱探测器 (THz QWP)，它的响应速率在纳秒量级^[57]。在图 4.9 (b) 中展示的是一个被遮挡的牙签，遮挡物是两层黑色的聚乙烯塑料袋，如图所示，在可见光频段已经完全看不见塑料袋下所藏匿的物体。图 4.9 (d) 是所对应的太赫兹成像结果，通过太赫兹的成像结果可以发现，聚乙烯的黑色塑料袋对于太赫兹波来说几乎是完全透明的，太赫兹透过聚乙烯塑料袋的衰减非常小。

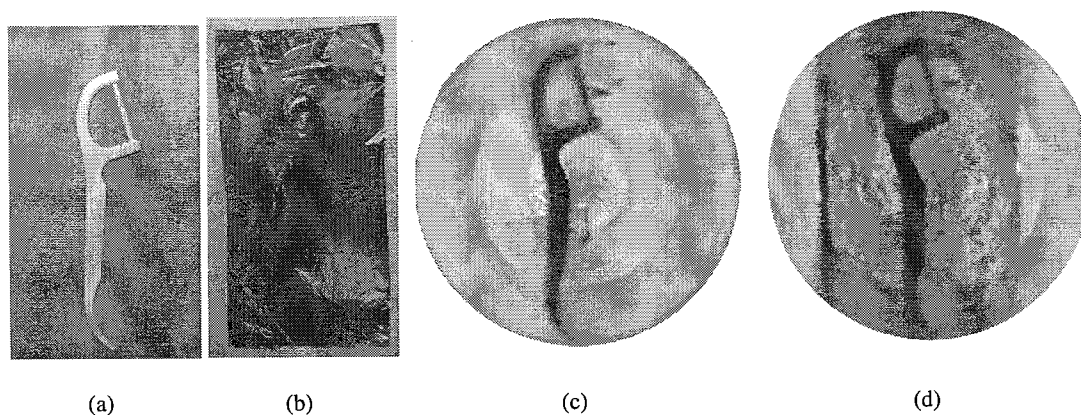


图 4.9 牙签在有无遮挡物下的成像结果。(a) 牙签实物图；(b) 藏匿在聚乙烯黑色塑料袋下的牙签实物图；(c) 无遮挡物时的成像结果；(d) 有遮挡物时的成像结果

为了对图像质量分析，选择图像信噪比较高的中心附近，并将牙线竖直放置。如图 4.10 (a) 所示，选取图中带有牙线的虚线位置。图 4.10 (b) 为 4.10 (a) 所对应虚线位置处的 THz 信号强度分布图，信号强度分别表示太赫兹波通过平面镜、黑色聚乙烯塑料袋、牙签塑料部分和牙线部分的探测强度信息。由于聚乙烯塑料袋表面并不是十分平整，并且材料不均匀，造成探测信号波动比较大。太赫兹波扫描这 4 种表面时，探测的平均强度分别为 0.8, 0.6, 0.18, 0.2。强度值越高代表太赫兹信号的反射率越高，反之则低。通过图 4.10 (b) 也可以大致得到牙线的尺寸信息，选取探测强度的半高宽位置作为实际物体的尺寸信息，大约为 2 mm，与实际的宽度非常接近。

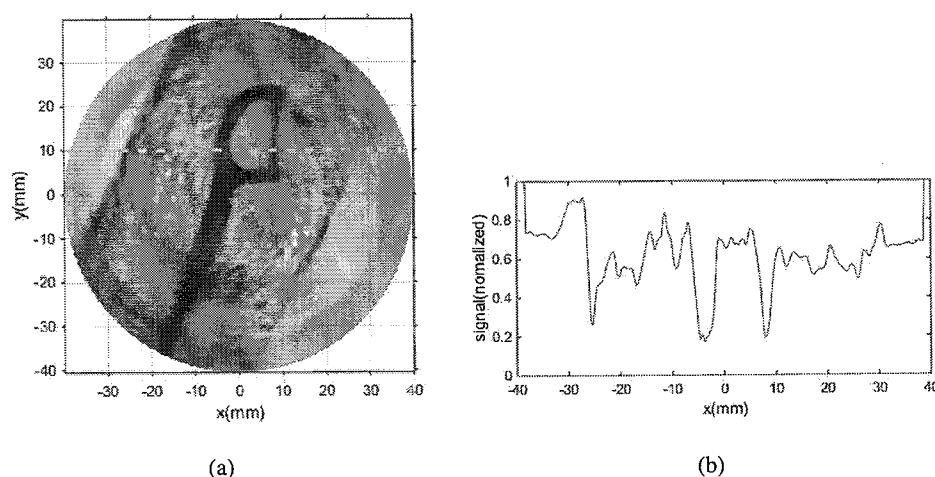


图 4.10 (a) 牙签在靠近中心位置的成像结果；(b) 在虚线位置处的 THz 强度变化曲线

4.4 其它样品成像结果

如图4.11是对干燥的枫叶的成像结果，太赫兹理论上是可以透过干燥枫叶的，但由于反射成像本身对太赫兹辐射损失会比较多，而且 4.3 THz 的太赫兹的透射能力有限，所以只能对枫叶的轮廓大致成像，对于叶脉的细节成像还有些能力不足。

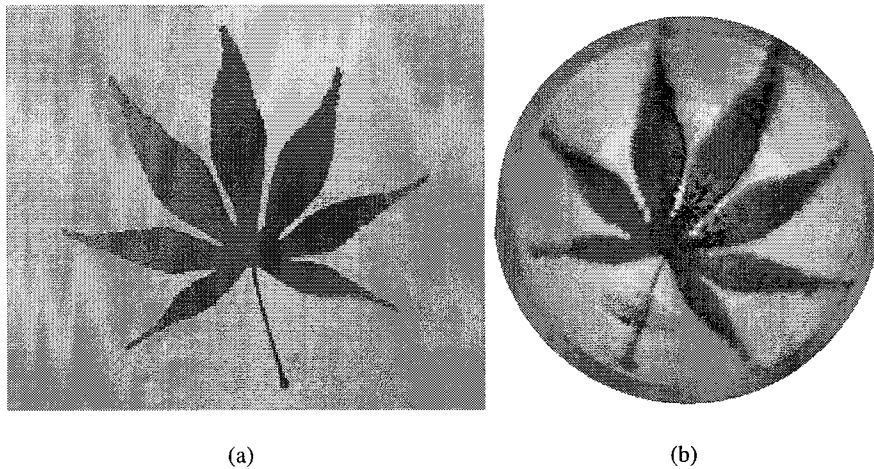


图 4.11 (a)干燥枫叶实物图；(b) 干燥枫叶太赫兹成像结果

如图4.12是对刀片的反射成像结果，因为刀片是金属且表面光滑，所以对太赫兹几乎可以完全反射，为了和载物台上的平面镜形成对比，将刀片垫在了一张白纸上。其次，由于机械在旋转时采集的均匀性问题，使得在靠近旋转台中心位置处出现了形状的失真，这是在未来工作中需要改进的一点。

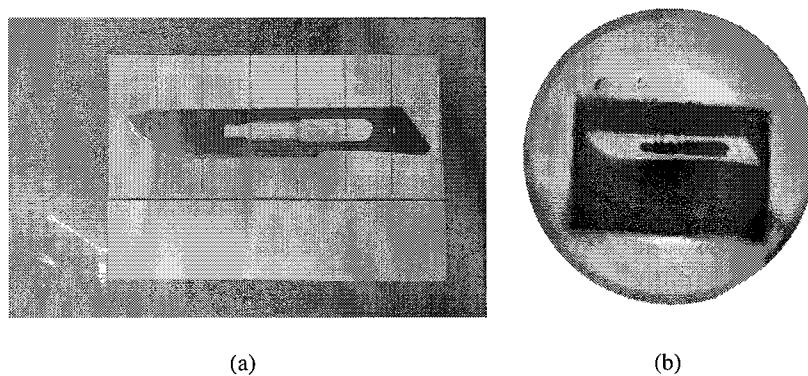


图 4.12 (a)刀片实物图；(b) 刀片太赫兹反射成像结果

4.5 图像处理

数字图像处理技术在成像领域应用非常广泛，在扫描成像中，由于激光器、探测器、传输光路以及机械本身等方面的问题，会给成像结果带来缺陷，比如电噪声或锯齿条纹等，当不能通过硬件手段解决这些问题时，就需要通过数字图像处理技术来对图像进行改善，主要包括滤波、图像增强、图像复原与重建等方面内容。接下来利用图像滤波和直方图等方法将对实验中的成像结果进行图像处理。

4.5.1 均值滤波和中值滤波

均值滤波也被称为线性滤波，实现方法方法是邻域平均法。对于待处理的目标像素，设坐标为 (x, y) ，首先选择一个模板 S_{xy} ，该模板为以目标像素为中心，大小为 $m \times n$ 的矩形图像窗口，故 m 和 n 必须为奇整数。均值滤波器就是在 S_{xy} 定义的区域中计算出处理原图像 $f(x, y)$ 的平均值，作为复原图像在点 (x, y) 处的新像素 $\hat{f}$ 的值^[58]，即

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{(s, t) \in S_{xy}} f(s, t) \quad (4.3)$$

该操作可使用大小为 $m \times n$ 的一个空间滤波器来实现，其所有的系数均为其值的 $1/mn$ 。如图 4.13 所示，随着模板规模的扩大，滤波的效果也越明显，但均值滤波在降低噪声的同时也使得图像变得模糊了，尤其是物体的边缘和细节部分。

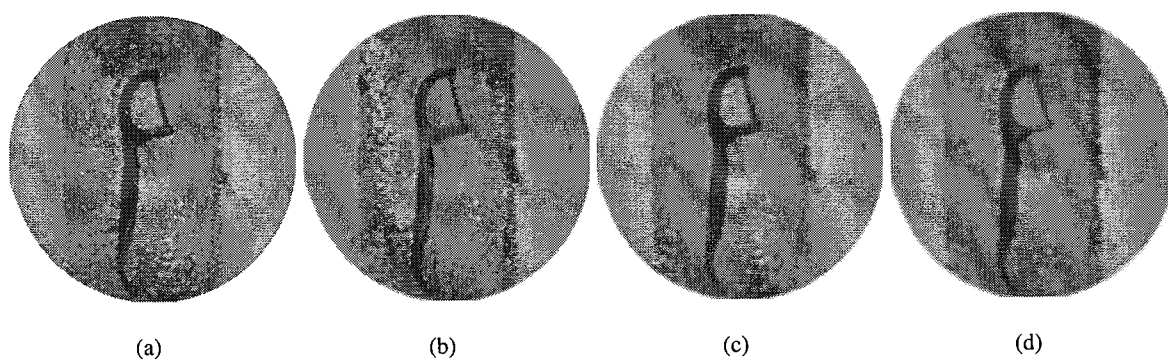


图 4.13 均值滤波前后对比图。(a) 原图；(b) 5×5 模板均值滤波；(c) 7×7 模板均值滤波；(d) 9×9 模板均值滤波

中值滤波器是一种非线性信号处理技术，通常用于抑制图像噪声。操作过程在图像的像素矩阵中选择一个奇数维度的模板，将模板的中心点的像素值用该模板中像素

值的中值来替代，即

$$\hat{f}(x, y) = \underset{(s, t) \in S_{xy}}{\text{mediang}}(s, t) \quad (4.4)$$

在 (x, y) 处的像素值是计算模板 S_{xy} 的中值。对于一些随机类型的噪声，比如椒盐噪声，中值滤波器可以提供良好的去噪能力，它比相同模板的均值滤波器引起的边缘模糊要小得多。具体成像结果如图 4.14 所示，可以发现中值滤波的效果要比均值滤波效果好，而且物体分界过渡区域的锯齿状条纹也基本变平滑了。

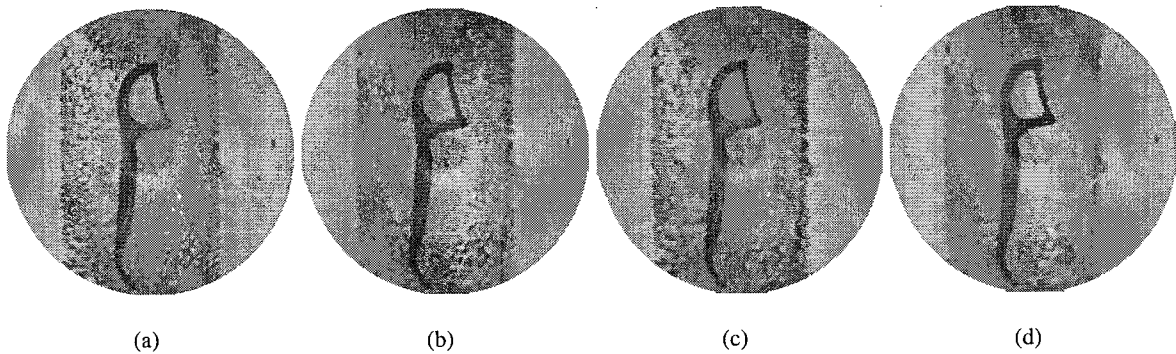


图 4.14 中值滤波前后对比图。(a) 原图；(b) 5×5 模板中值滤波；(c) 7×7 模板中值滤波；(d) 9×9 模板中值滤波

4.5.2 直方图处理

实验中采用的是反射成像方式，当太赫兹波透过遮挡物照射到目标及反射平面镜时，反射回的太赫兹波需要二次透过遮挡物，这样在相同条件下反射成像的透射效果就要弱于透射成像，如图 4.15 所示是对带有包装纸袋的牙签的成像，因为太赫兹波的激励功率的限制，包装袋内的牙签几乎看不见，因为探测强度值太低，造成图像对比度不够高；牙签旁边的金属刀片对太赫兹波的反射能力和反射镜近似相同，所以也只有大致的轮廓。接下来将尝试用直方图的操作对图像进行增强。

直方图是数字图像灰度级的函数图，以图像的灰度级为横轴，以在每个灰度级间隔中像素的个数作为纵轴，所以直方图用来描述对各个灰度级像素个数的统计情况^[59]。对于一些图像存在着有用细节的像素灰度值的个数，低于了各个灰度级的平均值。这样图像的细节就很难在图像中察觉到，因此需要通过直方图操作来对图像中不易被察觉的细节信息进行加强，也就是通过直方图中对原图中希望加强的信息进行增强。

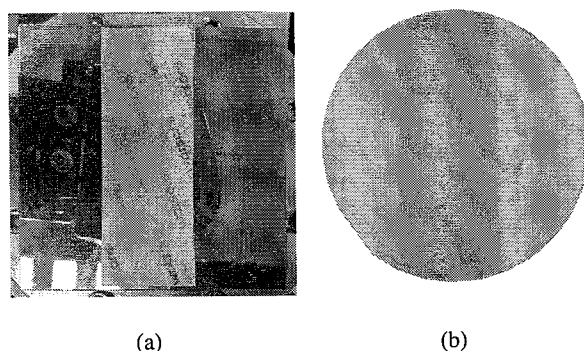


图 4.15 (a) 带有纸质包装的牙签实物图；(b) 图 (a) 的太赫兹成像结果

直方图均衡化是直方图处理的一种常用方法，通常被用来增强原始图像的对比度。对于像素比较集中的图像，有很好的处理效果。主要实现方法是根据图像的概率密度方程 (PDF，公式见4.5) 对灰度直方图进行重新排列，对于归一化的灰度图像，它的灰度级为区间 $[0, 1]$ 内的随机变量，处理后的灰度值将均匀分布于 $[0, 1]$ 的灰度级区间。灰度级均衡化处理后可以提高图像的动态范围，图像的细节得到加强。

$$s = T(r) = \int_0^r P_r(t) dt \quad (4.5)$$

其中， t 是积分的假变量， $P_r(t)$ 表示灰度级连续区间的概率密度函数， s 即为所对应的灰度变换结果。

如图 4.16 是对图 4.15 中包装袋内的牙签经过直方图均衡化处理的对比结果，(a) 是原图像中的一部分，(b) 为 (a) 所对应的灰度直方图，(c) 和 (d) 为处理之后的图像和灰度直方图。通过直方图发现图像的灰度分布更加均匀，新图像的对比度增加，但由于对数据处理不加选择，对无用信号的对比度也增加了，使图像灰度级减少，某些细节消失；以及对原图像直方图的高峰处理后出现对比度不自然的过分增强。

接下来我们采用对图像进行局部直方图处理的方法，使图像的对比度过渡更均匀。对比度自适应直方图均衡化 (Contrast-limited adaptive histogram equalization, CLAHE) 是一种将基于全局的直方图均衡化操作变成了局部操作的过程^[60]。原理是将图片先分成若干区域块，然后在每个区域中根据一定的输出直方图分布单独进行均衡化的处理，最后相邻的区域通过线性差值进行拼接，有效降低边界伪影。这样一来，该方法有效地降低了噪声，也使得局部对比度得到了有效的增强。图 4.17 是使用 CLAHE 方法处理后的效果，我们看到，在局部区域的对比度明显增加，牙签的轮廓

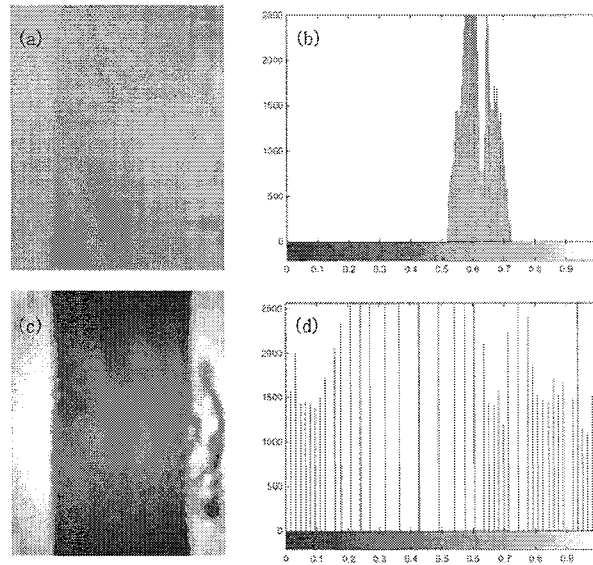


图 4.16 对牙签和刀片进行直方图均衡化处理的对比结果图。(a) 和 (b)为原图及其灰度直方图；(c) 和 (d) 为处理之后的图像及其灰度直方图

已经可以看清，该方法有效的抑制了噪声的产生。再观察对应的直方图，我们看到原图中大部分像素仅占据了灰度值范围很少的一部分，处理后整体的灰度值分布有了一定的扩展。

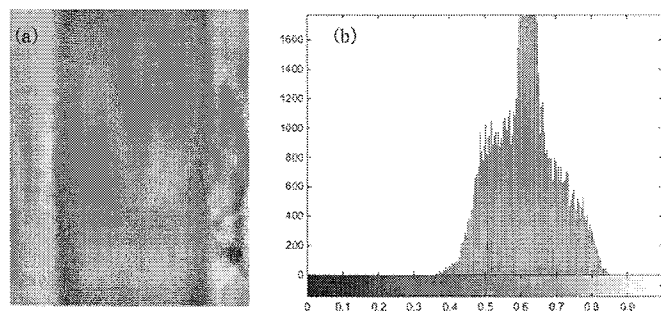


图 4.17 采用自适应直方图均衡化算法的处理结果，(a) 对牙签成像的处理结果图；(b) 图(a)对应的直方图

4.6 本章小结

本章讲述了利用 THz QCL 和旋转平移二维扫描机械装置搭建了反射式太赫兹单点探测扫描成像系统。通过这一系统，可以在 5 s 的时间内获得 0.4 mm 的空间分辨率的反射图像，实现了高质量、快速连续的扫描成像。文中对牙签、刀片和树叶等样品进行了太赫兹快速扫描成像实验的验证，并通过黑色聚乙烯塑料袋作为遮挡物进行了成像对比分析，并且通过数字图像处理技术对所获得的成像结果进行了数字滤波和图像增强的处理。目前成像速度的限制因素已经不再是以往的机械扫描速度，而变成探测器的响应速度。在未来工作中，Bolometer 探测器可以用 THz QWP 取代，THz QWP 探测响应速率可达到纳秒量级，图像质量的进一步提升关键在于相关器件性能的完善。此外，未来计划将激光器和探测器集成在同一个杜瓦瓶中，通过这种方式可以减少实验装置的使用成本。此类成像体制有望应用到安检等与成像相关的各种领域中去。

第五章 总结与展望

现代成像技术与我们的生活息息相关。手机电脑电视播放的各种视频，雷达成像用于军事安全，X 射线成像、磁共振成像和彩超成像是现代医疗诊断必不可少的工具。太赫兹辐射相比于其他电磁辐射有着很多特有的属性，比如太赫兹波可穿透非极性物质；光子能量低，不会对生物组织产生电离伤害；水对太赫兹的高吸收性，以及其他许多物质在太赫兹波段有特征光谱。目前在医疗应用方面太赫兹成像技术已经应用于皮肤癌、乳腺癌的定位，烧伤等级测定，以及蛀牙检测等^[61]。随着科技的不断进步，太赫兹成像技术将对人们的生活出行带来极大的方便。

本论文详细介绍了太赫兹成像技术的发展与研究，并对作为发射源的 THz QCL 作了详细调研，充分利用了其在成像方面的优势。最后以 THz QCL 作为发射源，Bolometer 作为探测器，搭建了太赫兹快速扫描成像系统，在保证成像质量的前提下，通过旋转扫描的成像方式实现了对物体的快速成像。同时设计了数据还原为二值矩阵的方法，成功获得数字图像，并对所得图像进行了数字图像处理，获得了图像特征更明显的结果。论文主要完成了以下几部分工作。

1. 设计了太赫兹反射扫描成像光路。通过使用 THz 分束镜的半反半透的特性，有效减少了系统中光路元件的数目，省去了传输反射信号的一组抛物面镜，同时激光器和探测器在同一侧工作，有利于将它们集成在同一个低温杜瓦瓶中。
2. 利用 LabVIEW 实现多软件之间的交互编程。通过 LabVIEW 提供的多个接口实现不同软件的功能，论文中利用 ActiveX 技术实现了对伺服驱动器的控制，以及利用 MATLAB script 实现了后台调用 MATLAB 实现数据处理和图像处理的功能。
3. 分析了扫描成像时间长的原因。对于二维逐行扫描机械，在扫描过程中因为换行会产生速度变化，从而影响扫描速度，同时由于机械本身原因在反方向扫描过程中，由于存在齿间误差的影响会对成像结果产生锯齿状失真。为了解决这些问题，设计了旋转二维扫描成像系统，通过 LabVIEW 对机械装置进行软件编程，控制旋转台和平移台的运动，整个扫描过程匀速且连续。最后实现了对

80 mm 的圆形区域快速扫描成像，扫描时间 5 s，探测强度信号的采集速率为 1 kHz，图像的平均分辨率大约为 1 mm。

4. 数据处理和图像处理。数据处理和图像处理的过程均是利用 MATLAB 的强大计算能力实现的，对于螺旋线的离散数据，首先利用三次多项式插值算法，将其转换为二维灰度格点矩阵，这是对成像结果进行数字图像处理的前提；其次为了获得更清晰、效果更好的图像需要对结果进行图像处理，文章中主要采用均值滤波、中值滤波和直方图操作等算法，中值滤波的处理的图像效果更好，能够更好的保留物体边界，直方图均衡化可以提高图像的动态特性。

本文通过对太赫兹扫描系统的改进，成功缩短了太赫兹扫描成像的时间。然而，系统还有一些值得改进的地方，包括：

1. 本文中目前实现了太赫兹快速扫描成像，但由于 Bolometer 的积分时间较长，信号从探测到稳定的时间过长，大约为 20 ms 左右，因此会对成像效果造成影响，这就是成像结果中波纹产生的主要原因，由于相邻两个探测点的时间间隔较短，只有 1 ms，Bolometer 在两个探测过程中不能快速达到稳定状态造成的。可以通过采用探测速率更高的探测器进行解决，如太赫兹量子阱探测器。
2. 对于图像处理这一块可以采用更高级的算法来提高成像效果，对图像特征进行增强。
3. 对于反射式成像，通过载物台上平面镜的反射会再次透过样品，造成能量就损失两次，这是影响成像质量的很重要的一个因素，未来可以设计新的扫描系统，实现旋转透射式扫描成像。