NEAR FIELD TERAHERTZ IMAGING

AND SPECTROSCOPY

Uzair Aalam

Department of Physics

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

July 2025

NEAR FIELD TERAHERTZ IMAGING AND SPECTROSCOPY

by

Uzair Aalam

Department of Physics

Submitted in fulfillment of requirements of the degree of

Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

NEW DELHI 110016, INDIA

July 2025

Dedicated to my parents…

Certificate

This is to certify that the dissertation titled **"Near Field Terahertz Imaging and Spectroscopy"**, being submitted by **Uzair Aalam** to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of bonafide research work carried out by him. He has worked under my guidance and supervision and has fulfilled the requirements, which to my knowledge, have reached the requisite standard for the submission of this dissertation. The results contained in this dissertation have not been submitted in part or full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

Date:

Place: New Delhi

Prof. Amartya Sengupta

Department of Physics

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi, India

Acknowledgements

First and foremost, I would like to thank my supervisor, Prof. Amartya Sengupta, for providing me with an opportunity to work in the interesting field of optics, imaging, and spectroscopy. I am appreciative of his academic supervision, patience, and support, which facilitated my exploration of various aspects of my research subject and motivated me to undertake rigorous and passionate research endeavors. I would like to express my gratitude to Dr. Aparajita Bandyopadhyay for her priceless time in extensive scientific conversations and for imparting her experience in the realm of terahertz technology, without which this work would have been much more difficult.

In addition to my supervisor, I extend my gratitude to my research committee members, Prof. Kedar B. Khare, Prof. Aloka Sinha, Prof. V. Ravishankar, and Prof. Sitikantha Roy, for their perceptive remarks, feedback, and recommendations that enhanced my research.

My sincere gratitude goes out to my colleagues, particularly Khushboo Singh for her guidance, Diksha Garg, Mayuri Kashyap, Urbi Kundu, and Puspita Chanda for their generous assistance, as well as to my friends Mohsin Ansari, Harish Khan, and Amir Khan for their constant encouragement and help throughout this arduous road.

I am incredibly grateful to my mother, father, and brother for their unwavering love, support, and patience, which have allowed me to persevere not only through my PhD but also through all of the challenging times in my life.

I cannot forget to mention the mentorship I received from my school teachers, especially Dr. Mohammad Tahir, and Mr. Vijay Pal Singh, without which I would never be where I am today.

Uzair Aalam

Abstract

The electromagnetic waves at terahertz (THz) frequencies exhibit unique properties due to peculiar radiation-matter interaction in this frequency range. These properties of THz waves have enabled a large number of important applications both in fundamental research and industry, such as spectroscopy, the study of ultrafast phenomenon, terabit communication, non-destructive testing, biomedical diagnosis, quality control in the agri-food industry, and many more.

The applicability of THz waves has been demonstrated mostly in laboratory environments where an active control of temperature, humidity, and acoustic vibration isolation is implemented. The material to be studied is brought to the lab for analysis, which restricts the usability of THz-based studies outside such a controlled environment. Furthermore, many of the applications of THz waves involve imaging modalities for analysis. The imaging resolution, however, is inferior owing to the large wavelengths of THz range of frequencies (λ=300 μm at 1 THz). This thesis attempts to address these challenges by rigorously studying THz free-space optics and developing various optomechanical designs for THz optical devices and imaging techniques.

The thesis reports the design and development of different portable devices for THz measurements that are capable of being used for handheld operation. The presented devices have been shown to exhibit a long working distance (50 cm) for standoff sensing, wide bandwidth (up to 3.5 THz) for proximal spectroscopic sensing, along with a low weight profile and smaller footprints. Crucial applications of these devices are demonstrated in exemplary studies of hydration sensing, surface roughness measurement, interface detection in multilayered materials, and spectroscopic identification of hidden materials.

Further, the thesis also presents a THz-based imaging setup. The setup aims to utilize field confinement from a waveguide structure to construct a THz imaging system. The imaging configuration employs the near field at the output end of a hollow-core metal waveguide (HCMWG) for imaging purposes. The configuration demonstrates the ability to attain sub-wavelength resolution (0.8λ) in a transmission imaging scheme. Moreover, the high-resolution capability attained by waveguide-based configuration is integrated with handheld functionality.

सार

टेराहर्ट्ज़ आवृत्तियों पर विद्युत चुम्बकीय तरंगें इस आवृत्ति श्रेणी में विशिष्ट विकिरण-पदार्थ संपर्क के कारण अद्वितीय गुण प्रदर्शित करती हैं। टेराहर्ट्ज़ तरंगों के इन गुणों ने मौलिक अनुसंधान और उद्योग दोनों में बड़ी संख्या में महत्वपूर्ण अनुप्रयोगों को सक्षम किया है, जैसे स्पेक्ट्रोस्कोपी, अल्ट्राफास्ट घटना का अध्ययन, टेराबिट संचार, गैर-विनाशकारी परीक्षण, जैव चिकित्सा निदान, कृषि-खाद्य उद्योग में गुणवत्ता नियंत्रण, और कई अन्य। टेराहर्ट्ज़ तरंगों की प्रयोज्यता ज्यादातर प्रयोगशाला वातावरण में प्रदर्शित की गई है जहां तापमान, आर्द्रता और ध्वनिक कंपन अलगाव का सक्रिय नियंत्रण लागू किया जाता है। अध्ययन की जाने वाली सामग्री को विश्लेषण के लिए प्रयोगशाला में लाने की आवश्यकता होती है, जो ऐसे नियंत्रित वातावरण के बाहर टेराहर्ट्ज़-आधारित अध्ययनों की उपयोगिता को प्रतिबंधित करता है। इसके अलावा, टेराहर्ट्ज़ तरंगों के कई अनुप्रयोगों में विश्लेषण के लिए इमेजिंग तौर-तरीके शामिल हैं। किन्तु, इमेजिंग रिज़ॉल्यूशन टेराहर्ट्ज़ श्रेणी की आवृत्तियों की बड़ी तरंग दैर्ध्य (1 THz पर λ = 300 μm) के कारण निम्नतर है। यह शोध प्रबंध टेराहर्ट्ज़ मुक्त-स्थान प्रकाशिकी का गहन अध्ययन करके तथा टेराहर्ट्ज़ प्रकाशिये उपकरणों और इमेजिंग तकनीकों के लिए विभिन्न प्रकाशिये-मैकेनिकल संरचना विकसित करके इन चुनौतियों का समाधान करने का प्रयास करता है।

शोध प्रबंध टेराहर्ट्ज़ माप के लिए विभिन्न चल उपकरणों की संरचना और विकास की रिपोर्ट करता है जो हाथ में पकड़कर संचालन के लिए उपयोग किए जा सकते हैं। प्रस्तुत उपकरणों में दूरस्थ-सेंसिंग के लिए लंबी कार्य दूरी (50 सेमी), समीपस्थ स्पेक्ट्रोस्कोपिक सेंसिंग के लिए विस्तृत बैंडविड्थ (3.5 THz तक), साथ ही कम वज़न प्रोफ़ाइल और छोटे फ़ुटप्रिंट वाले उपकरण प्रदर्शित किए गए हैं। इन उपकरणों के महत्वपूर्ण अनुप्रयोगों को

हाइड्रेशन सेंसिंग, सतह खुरदरापन माप, बहुपरत सामग्री में इंटरफ़ेस का पता लगाने और छिपी हुई सामग्रियों की स्पेक्ट्रोस्कोपिक पहचान के अनुकरणीय अध्ययनों में प्रदर्शित किया गया है।

इसके अलावा, यह शोध प्रबंध एक टेराहर्ट्ज़-आधारित इमेजिंग सेटअप भी प्रस्तुत करता है। सेटअप का उद्देश्य टेराहर्ट्ज़ इमेजिंग सिस्टम का निर्माण करने के लिए वेवगाइड संरचना से फ़ील्ड कारावास का उपयोग करना है। इमेजिंग कॉन्फ़िगरेशन इमेजिंग उद्देश्यों के लिए एक खोखले-कोर धातु वेवगाइड के आउटपुट छोर पर निकट क्षेत्र को नियोजित करता है। यह विन्यास संचरण इमेजिंग स्कीम में तरंग दैर्ध्य से नीचे के रिज़ॉल्यूशन (0.8λ) प्राप्त करने की क्षमता प्रदर्शित करता है। इसके अलावा, वेवगाइड-आधारित विन्यास द्वारा प्राप्त उच्च-रिज़ॉल्यूशन क्षमताओं को हस्तचालित कार्यक्षमता के साथ एकीकृत किया गया है।

Table of contents

List of figures

List of tables

List of abbreviations

1.	THz	Terahertz
2.	FTIR	Fourier transform infrared
3.	VISS	Visible spectroscopy
4.	STM	Scanning tunneling microscopy
5.	CW	Continuous Wave
6.	HEM	High electron mobility
7.	QCL	Quantum cascade laser
8.	UTC PD	Uni-Traveling-Carrier Photodiode
9.	PCA	Photoconductive antenna
10.	DC	Direct current
11.	TDS	Time domain spectroscopy
12.	Tx	Emitter
13.	Rx	Receiver
14.	fs	Femtosecond
15.	FFT	Fast Fourier transform
16.	IR	Infrared
17.	ToF	Time-of-flight
18.	OAPM	Off-axis parabolic mirror
19.	3D	Three dimensional
20.	SOTA	State-of-the-art
21.	PLA	Poly lactic acid
22.	ps	Picosecond
23.	EFL	Effective focal length

24.	RMS	Root-mean-squared
25.	V2X	Vehicle-to-everything
26.	CAD	Computer-aided design
27.	RFL	Reflective focal length
28.	WG	Waveguide
29.	HCMWG	Hollow-core metal waveguide
30.	s-SNOM	scattering-type scanning near-field optical microscopy
31.	FWHM	Full-width at half maximum
32.	SNR	Signal-to-noise ratio
33.	HRFZ-Si	High resistivity float zone silicon
34.	HDPE	High density polyethylene
35.	FZP	Fresnel zone plate
36.	FDM	Fused deposition modeling