MICROSTRUCTURED FIBERS AND NONLINEAR CRYSTALS BASED TERAHERTZ SOURCES AND DEVICES

VIKAS KUMAR

\

DEPARTMENT OF PHYSICS

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

SEPTEMBER 2022

Microstructured Fibers and Nonlinear Crystals based Terahertz Sources and Devices

by

Vikas Kumar

Department of Physics

Submitted

in fulfillment of the requirement of the degree of Doctor of Philosophy

to the

\

Indian Institute of Technology Delhi

September 2022

Dedicated To

Lord Shiva, Goddess Saraswati

My Parents

Shri Devender Kumar & Smt. Rukmani Devi,

My Sister Priyanka,

My Ph.D. Supervisors

Certificate

This is to certify that the proposed thesis entitled ***Microstructured Fibers and Nonlinear Crystals based Terahertz Sources and Devices*** being submitted by **Mr. Vikas Kumar** 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 by him. He has worked under our guidance and supervision and has fulfilled the requirements which to our knowledge and has reached the requisite standard for the submission of the thesis. The results contained in the thesis have not been submitted in part or full to any University or Institute for the award of any degree or diploma.

Prof. R. K. Varshney
Department of Physics
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi-110016, India

Prof. Sunil Kumar
Department of Physics
Indian Institute of Technology Delhi
Hauz Khas, New Delhi-110016, India

Acknowledgements

First and foremost, I wish to express my deepest and sincere gratitude towards my supervisors, **Prof R. K. Varshney and Prof. Sunil Kumar**, for their immeasurable amount of guidance, continuous support, motivation, and encouragement throughout my Ph.D. tenure. Their dedication to the work, vision, and dynamism inspired me a lot. They always listened to me with great patience, provided me with their insightful suggestions/comments, and stimulated critical thinking. They have helped and guided me in every possible way in my research work. Without their support and guidance, this thesis certainly would not have been possible. I am very much thankful to both of them for the freedom and flexibility they gave me to perform my research work.

I am incredibly grateful to my Student Research Committee Members, Prof. Joby Joseph and Prof. Anurag Sharma from the Center of Optics and Photonics, and Prof. Anuj Dhawan from the Department of Electrical Engineering, IIT Delhi, for their valuable assessment and feedbacks on my research work.I also want to express my sincere gratitude to former Prof. Arun Kumar and Prof. M. R. Shenoy from Department of Physics, IIT Delhi for always welcoming me for discussions and clearing my doubts at different stages of my Ph.D.

I would like to thank Prof. Somnath Ghosh from Department of Physics, IIT Jodhpur who has inspired me for a lot. I would also like to thank my seniors, lab members and colleagues Dr. Dinesh, Dr. Ajanta Barh, Dr. Rana Tabassum, Dr. Divya Bhardwaj, Dr. Jitendra, Dr. Ranjeet Dwivedi, Dr. Nabarun Saha, Dr. Pragati Aashna, Dr. Parvinder Kaur, Dr. Deepa Chaturvedi Pandey, Dr. Anand Mohan, Dr. Ravi Kant, Dr. Sruthi Prasood Usha , Dr. Babita Bakshi, Dr. Anisha Pathak, Dr. Vivek Semwal, Dr. Ramesh, Dr. Sugeet Sunder, Dr. Arnab Laha, Dr. Kalpak Gupta, Nithin, Dr. Subhajit Karmakar, Anjali Kashyap, Ajay, Priyadarshini, Pratiksha, Jyoti Saxena, Sukhvinder Kaur, Anjali Choudhary, Varun Arora, Nitika, Shivani, Zaheer, Chandan, Dr. Harsh Gupta, Yasir, Vikki, Preetam, Gulshan, and Vipul by always supporting me for throughout my Ph. D. Journey.

I would like to thank the Department of Physics, Indian Institute of Technology, its accounts section, and PG section for providing valuable resources. I also acknowledge University Grant Commission, India, for providing research scholarship during my tenure.

Vikas Kumar

Abstract

Terahertz (THz) waves spanning a frequency range of 0.1 to 10 THz, typically, lie midway between microwaves and infrared waves in the broad electromagnetic spectrum. Many scientific and technological applications like imaging, sensing, spectroscopy, communication, etc. have emerged in the THz regime by continuous research and development in last few decades. Researchers are trying to design high power THz sources, THz linear and nonlinear devices, THz beam modulators, etc. In this thesis, we have studied theoretically, various designs of photonic crystal fibers (PCFs) and microstructured fibers for applications as efficient sources, compact devices for polarization splitting, wave modulation, and sensors for THz radiation.

Varieties of linear characteristics like single-mode operation and near-zero dispersion guiding, large modal area, high birefringence, high numerical aperture, and low loss have been accomplished and demonstrated by designing suitable PCF structures. The microstructured configuration in a variant of teflon host possesses a combination of near core teflon inclusions and air holes in the first ring around the central core provides flexibility for acquiring desirable dispersion characteristics and suitability for high power propagation. Broadband THz propagation with nearly flat (near to zero) dispersion in the spectral range of ~153-221 µm (~1.35-1.96 THz) and bandwidth of ~78 µm (0.61 THz) is demonstrated using optimized photonic band gap (PBG) fiber. The designed polyethylene (PE) photonic crystal index guided fiber (PCIGF) offers the minimum dispersion values (~0.05 dB/m-µm) around 1 THz at which, flat mode and high power propagation due to large modal area of are also achieved. Further, we have designed alternatively air-holes and material-inclusions rings around the single core teflon PCIGF to achieve THz supercontinuum with spectral range of 160-270µm (~1.1-1.878 THz) and bandwidth of 110 µm (~0.8THz). Beyond the reported complicated and fragile structures in the literature, the polymer based PCFs are relatively simple and can be fabricated by using the standard stack and draw method.

Polarization selective applications, instruments, and measurements have recently attracted attention for development. We observed an excellent potential for efficient polarization splitting using dual-core PCIGF which can be used to realize compact, very efficient, and low loss polarization splitter. We implemented two configurations in the dual-core PCIGF to lower the splitting length of the fiber, have high extinction ratio and low propagation and bending losses. In the first scheme, we have proposed a suitable configuration of the gradient in various pitches for air holes lattice in the two cores of polyethylene PCIGF, to reduce the splitting

length of 60 cm compared to the previously reported design by two orders and high extinction ratios i.e. 18 dB for *y*-polarization and 23 dB for *x*-polarization. Selective inclusion of teflon rods in the air holes configuration of both the cores further reduces the splitting length i.e. ~2.1cm to 20cm at 0.4 to 1 THz frequencies, correspondingly. The extinction ratios for the *x*- and *y*-polarization have been found to be 70 dB and 40 dB, respectively which are very high. The confinement, propagation, and bending loss were found to be very low.

We have also ideated a conventional PCF to modify its basis and innermost ring unit cells. It can sense toxic CS_2 by using the supported two modes. The existing limitation of CS_2 sensing is the absence of fingerprint spectral features in the THz frequency range. It has been mitigated by utilizing the time delay difference and differential loss of second-order mode-based criteria on the addition of the CS_2 sensing material in the prescribed holes in the design. Thus, applying the Maxwell Garnett theory, we were able to monitor the concentration of CS_2 under ambient conditions by finding the complex effective permittivity of the second mode for each CS_2 concentration in the prescribed air holes and then analyzing either the time delay difference between the two supported modes as the pulse forms or the second order propagation loss. For a 10 cm long variant of the designed PCF operating at 0.75 THz frequency, we observe a linearly increasing TDD variation from ~2 to 13 ps due to change in CS_2 concentration from 17 to 50%. However, when the CS_2 concentration exceeds the 50% range, we observe decreasing TDD characteristics. In this high concentration regime (>50%), we monitor CS_2 by analyzing second mode loss (SML) variation due to concentration change (at 0.98 THz frequency), where SML increases upto ~30 dB for ~100% ambient CS_2 concentration. Here, we achieve a high concentration sensitivity where a variation of 1.6 dB SML is observed with unit concentration change of CS_2.

Specialty microstructured fibers with customized transverse cross-section help realize an efficient source of THz radiation at ~9THz, which is highly suitable to fingerprint detection of neurotransmitters. We have considered three varieties of Teflon as either host material or rod-like inclusions together with TiO_2 doped polyethylene inclusions in the Teflon host for such fiber designs in our next study presented in the thesis. Teflon has a very high nonlinear coefficient (third-order nonlinearity) that helps to achieve efficient four-wave mixing inside the fiber. We have considered a fiber framework with teflon-1 as the cladding and teflon-2 as the core, within which a hexagonal lattice is embedded in the form of five alternate rings made of teflon-3 and TiO_2 doped polyethylene as inclusions for high power THz generation by four-wave mixing. The pump at 10.56 μm can be taken from a CO_2 laser, while input idler at variable wavelength (~6.2-6.5 μm) can be taken from a CO laser. THz frequency tunable output in the range of ~9.1-9.33 THz has been achieved by varying the pump power from 1 kW to 9 kW. We have observed large mode area and high modal overlap among the infrared input pump, infrared seed idler, and output THz waves. THz generation efficiency up to 13% at the optimized coherence length of ~6.7 m was possible.

Nonlinear crystals such as ZnTe and $LiNbO_3$ are among the most popular materials considered for generation of THz radiation by optical rectification of ultrashort NIR pulses in them. In the last study for the present thesis work, we have demonstrated broadband (~0.1-4THz) beam shaping and steering during THz generation by optical rectification of NIR pulses in an electrically controlled $\chi^{(2)}$-modulated nonlinear crystal. We have considered different duty cycles of the periodic $\chi^{(2)}$-modulations in the crystal transverse to the direction of excitation beam propagation to achieve control on the beam shaping and steering. A maximum angular steering of about 7.43° relative to the undeflected THz beam from otherwise a uniform $\chi^{(2)}$ nonlinear crystal has been demonstrated in a 1 mm thick ZnTe crystal having modulation period of 0.1 cm such that 2 or more periods are present within the width of the crystal.

The aforementioned studies have the potential to boost the contemporary THz photonics domain where the proposed linear and nonlinear configurations can facilitate a range of fascinating device applications viz. high power THz generation, broadband beam shaping and steering, polarization splitting, and chemical sensing.

सार

टेराहर्ट्ज़ (THz) तरंगें 0.1 से 10 THz की आवृत्ति रेंज में फैली हुई हैं, आमतौर पर, व्यापक विद्युत चुम्बकीय स्पेक्ट्रम में माइक्रोवेव और अवरक्त तरंगों के बीच में होती हैं। पिछले कुछ दशकों में निरंतर टेराहर्ट्ज़ अनुसंधान और विकास द्वारा कई वैज्ञानिक और तकनीकी अनुप्रयोग जैसे इमेजिंग, सेंसिंग, स्पेक्ट्रोस्कोपी, संचार, आदि उभरे हैं। शोधकर्ता उच्च शक्ति वाले टेराहर्ट्ज़ स्रोतों, टेराहर्ट्ज़ रैखिक और गैर-रेखीय उपकरणों, टेराहर्ट्ज़ बीम मॉड्यूलेटर आदि को डिजाइन करने का प्रयास कर रहे हैं। इस थीसिस में, हमने सैद्धांतिक रूप से, कुशल स्रोतों ध्रुवीकरण विभाजन के लिए उपकरण, तरंग मॉडुलन, विकिरण के लिए टेराहर्ट्ज़ सेंसर के रूप में अनुप्रयोगों के लिए फोटोनिक क्रिस्टल फाइबर (PCFs) और माइक्रोस्ट्रक्चर फाइबर के विभिन्न डिजाइनों का अध्ययन किया है।

सिंगल-मोड ऑपरेशन और लगभग-शून्य परिक्षेपण तरंग परिवहन, बड़े मोडल क्षेत्र, उच्च द्विअपवर्तन, उच्च संख्यात्मक एपर्चर, और कम नुकसान जैसी रैखिक विशेषताओं की किस्मों को पूरा किया गया है और उपयुक्त पीसीएफ संरचनाओं को डिजाइन करके प्रदर्शित किया गया है। टेफ्लॉन होस्ट के एक प्रकार में माइक्रोस्ट्रक्चर्ड कॉन्फ़िगरेशन में केंद्रीय कोर के चारों ओर पहली रिंग में निकट कोर टेफ्लॉन समावेशन और वायु छिद्रों का संयोजन होता है, जो वांछनीय फैलाव विशेषताओं और उच्च शक्ति प्रसार के लिए उपयुक्तता प्राप्त करने के लिए लचीलापन प्रदान करता है। ~ 153-221 μm (~1.35-1.96 THz) की स्पेक्ट्रल रेंज में लगभग फ्लैट (शून्य के करीब परिक्षेपण के साथ ब्रॉडबैंड टेराहर्ट्ज़ प्रसार ~ 78 μm (0.61 THz) की बैंडविड्थ को अनुकूलित फोटोनिक बैंड गैप (PBG) फाइबर का उपयोग करके प्रदर्शित किया जाता है। डिज़ाइन किया गया पॉलीइथाइलीन (पीई) फोटोनिक क्रिस्टल इंडेक्स गाइडेड फाइबर (PCIGF) 1 THz आवृत्ति के पास न्यूनतम परिक्षेपण मान (~ 0.05 dB/m-μm) प्रदान करता है, जिस पर, बड़े मोडल क्षेत्र के कारण फ्लैट मोड और उच्च शक्ति प्रसार भी हासिल किया जाता है। इसके अलावा, हमने 160-270μm (~ 1.1-1.878 THz) की स्पेक्ट्रल रेंज और 110 माइक्रोन (~ 0.8THz) की बैंडविड्थ के साथ THz सुपरकॉन्टिनम प्राप्त करने के लिए सिंगल कोर टेफ्लॉन पीसीआईजीएफ के चारों ओर वैकल्पिक रूप से एयर-होल और सामग्री-समावेश के छल्ले डिज़ाइन किए हैं । साहित्य में रिपोर्ट की गई जटिल और नाजुक संरचनाओं से परे, बहुलक आधारित पीसीएफ अपेक्षाकृत सरल हैं और मानक स्टैक और ड्रा विधि का उपयोग करके गढ़े जा सकते हैं।

ध्रुवीकरण चयनात्मक अनुप्रयोगों, उपकरणों और मापों ने हाल ही में विकास के लिए ध्यान आकर्षित किया है। हमने दोहरे कोर PCIGF का उपयोग करके कुशल ध्रुवीकरण विभाजन के लिए एक उत्कृष्ट क्षमता देखी, जिसका उपयोग कॉम्पैक्ट, बहुत कुशल और कम नुकसान वाले ध्रुवीकरण स्प्लिटर को

महसूस करने के लिए किया जा सकता है। हमने फाइबर की विभाजन लंबाई को कम करने के लिए दोहरे कोर पीसीआईजीएफ में दो कॉन्फ़िगरेशन लागू किए, उच्च विलुप्त होने का अनुपात और कम प्रसार और झुकने वाले नुकसान हैं। पहली योजना में, हमने पॉलीइथाइलीन पीसीआईजीएफ के दो कोर में एयर होल जाली के लिए विभिन्न पिचों में ढाल के उपयुक्त विन्यास का प्रस्ताव दिया है, ताकि दो ऑर्डर द्वारा पहले की रिपोर्ट की गई डिजाइन की तुलना में 60 सेमी की विभाजन लंबाई को कम किया जा सके और उच्च विलुप्त होने के अनुपात यानी *y*- ध्रुवीकरण के लिए 18 डीबी और *x*- ध्रुवीकरण के लिए 23 डीबी प्राप्त किया जा सके। दोनों कोर के एयर होल कॉन्फिगरेशन में टेफ्लॉन रॉड्स के चुनिंदा समावेश से विभाजन की लंबाई कम हो जाती है यानी ~ 0.4 से 1 THz आवृत्तियों पर 2.1 सेमी से 20 सेमी, तदनुसार। *x*- और *y*- ध्रुवीकरण के लिए विलुप्त होने का अनुपात क्रमशः 70 dB और 40 dB पाया गया है, जो बहुत अधिक है। कारावास, प्रसार और झुकने की हानि बहुत कम पाई गई।

हमने इसके आधार और अंतरतम रिंग यूनिट कक्ष को संशोधित करने के लिए एक पारंपरिक पीसीएफ की भी कल्पना की है। यह समर्थित दो मोड का उपयोग करके विषाक्त CS_2 को महसूस कर सकता है। CS_2 सेंसिंग की मौजूदा सीमा टेराहर्ट्ज़ आवृत्ति रेंज में फ़िंगरप्रिंट वर्णक्रमीय विशेषताओं का अभाव है। डिजाइन में निर्धारित छिद्रों में CS_2 सेंसिंग सामग्री को जोड़ने पर समय विलंब अंतर और दूसरे क्रम मोड-आधारित मानदंड के अंतर हानि का उपयोग करके इसे खत्म किया गया है। इस प्रकार, मैक्सवेल गार्नेट सिद्धांत को लागू करते हुए, हम निर्धारित हवा के छिद्रों में प्रत्येक CS_2 एकाग्रता के लिए जटिल प्रभावी पारगम्यता का पता लगाकर परिवेशी परिस्थितियों में की CS_2 एकाग्रता की निगरानी करने में सक्षम थे क्योंकि या तो समय की देरी के अंतर का विश्लेषण कर रहे थे या स्पंद रूपों के हानि के रूप में दो समर्थित मोड का विश्लेषण। 0.75 THz आवृत्ति पर संचालित डिज़ाइन किए गए PCF के 10 सेमी लंबे संस्करण के लिए, हम CS_2 एकाग्रता में 17 से 50% तक परिवर्तन के कारण ~ 2 से 13 ps तक रैखिक रूप से बढ़ते TDD भिन्नता का निरीक्षण करते हैं। हालाँकि, जब CS_2 की सांद्रता 50% सीमा से अधिक हो जाती है, तो हम TDD विशेषताओं को कम करते हुए देखते हैं। इस उच्च सांद्रता शासन (> 50%) में, हम CS_2 एकाग्रता परिवर्तन (0.98 THz आवृत्ति पर) के कारण दूसरे मोड हानि (LMS) भिन्नता का विश्लेषण करके की निगरानी करते हैं, जहां LMS ~ 100% परिवेश CS_2 एकाग्रता के लिए ~ 30 डीबी तक बढ़ जाता है। यहां, हम एक उच्च सांद्रता संवेदनशीलता प्राप्त करते हैं जहां CS_2 की इकाई एकाग्रता परिवर्तन के साथ 1.6 डीबी MLS की भिन्नता देखी जाती है।

अनुकूलित अनुप्रस्थ क्रॉस-सेक्शन के साथ विशेष सूक्ष्म संरचित फाइबर ~ 9THz विकिरण के एक कुशल स्रोत का एहसास करने में मदद करते हैं, जो यूरोट्रांसमीटर के फिंगरप्रिंट का पता लगाने के लिए अत्यधिक उपयुक्त है। थीसिस में प्रस्तुत हमारे अगले अध्ययन में हमने टेफ्लॉन की तीन किस्मों को या तो

मेजबान सामग्री या रॉड-जैसे समावेशन के साथ-साथ टेफ्लॉन होस्ट में टीआईओ 2 डोपेड पॉलीइथाइलीन समावेशन के रूप में माना है| टेफ्लॉन में एक बहुत ही उच्च गैर-रेखीय गुणांक (तीसरे क्रम की गैर-रेखीयता) है जो फाइबर के अंदर कुशल चार-लहर मिश्रण प्राप्त करने में मदद करता है। हमने टेफ्लॉन -1 के साथ एक फाइबर फ्रेमवर्क को क्लैडिंग और टेफ्लॉन -2 को कोर के रूप में माना है, जिसके भीतर एक हेक्सागोनल जाली टेफ्लॉन -3 और टीआईओ 2 डोपेड पॉलीइथाइलीन से बने पांच वैकल्पिक रिंगों के रूप में चार-लहर मिश्रण द्वारा उच्च शक्ति के लिए समावेशन के रूप में एम्बेडेड है। 10.56 μm पर पंप को CO_2 लेजर से लिया जा सकता है , जबकि परिवर्तनीय तरंगदैर्ध्य (~ 6.2–6.5 μm) इनपुट CO लेजर से लिया जा सकता है। ~9.1-9.33 THz की रेंज में THz फ्रीक्वेंसी ट्यून करने योग्य आउटपुट के लिए पंप की शक्ति को 1 kW से 9 kW तक बदलकर प्राप्त किया गया है । हमने इन्फ्रारेड इनपुट पंप, इंफ्रारेड सीड आइडलर और आउटपुट THz तरंगों के बीच बड़े मोड क्षेत्र और उच्च मोडल ओवरलैप को देखा है। ~ 6.7 मीटर की अनुकूलित सुसंगतता लंबाई से 13% THz स्रोत की दक्षता संभव थी।

ZnTe और $LiNbO_3$ जैसे गैर-रेखीय क्रिस्टल सबसे लोकप्रिय पदार्थों में से हैं, जिन्हें अल्ट्राशॉर्ट NIR स्पंदन के ऑप्टिकल सुधार द्वारा THz विकिरण उत्पन्न करने के लिए माना जाता है । वर्तमान थीसिस कार्य के लिए पिछले अध्ययन में, हमने विद्युत नियंत्रित $\chi^{(2)}$–मॉड्यूलेटेड नॉनलाइनियर क्रिस्टल में NIR स्पंदन के ऑप्टिकल सुधार द्वारा THz स्रोत के दौरान ब्रॉडबैंड (~ 0.1-4THz) बीम को आकार देने और स्टीयरिंग का प्रदर्शन किया है । हमने बीम आकार देने और स्टीयरिंग पर नियंत्रण प्राप्त करने के लिए उत्तेजना बीम प्रसार की दिशा में क्रिस्टल अनुप्रस्थ में आवधिक $\chi^{(2)}$ -मॉड्यूलेशन के विभिन्न कर्तव्य चक्रों पर विचार किया है। अन्यथा एक समान $\chi^{(2)}$ नॉनलाइनियर क्रिस्टल से अपरिवर्तित THz बीम के सापेक्ष लगभग 7.43° की अधिकतम कोणीय स्टीयरिंग को 1 मिमी मोटी ZnTe क्रिस्टल में 0.1 सेमी की मॉड्यूलेशन अवधि के साथ प्रदर्शित किया गया है, जैसे कि 2 या अधिक अवधि मौजूद हैं।

उपरोक्त अध्ययनों में समकालीन THz फोटोनिक्स डोमेन को बढ़ावा देने की क्षमता है जहां प्रस्तावित रैखिक और गैर-रेखीय विन्यास आकर्षक डिवाइस अनुप्रयोगों की एक श्रृंखला की सुविधा प्रदान कर सकते हैं जैसे कि, उच्च शक्ति THz स्रोत, ब्रॉडबैंड बीम आकार देने और स्टीयरिंग, ध्रुवीकरण विभाजन, और रासायनिक संवेदन।

Contents

Graphics

(A) List of figures

(B) List of Boxes

List of tables

List of Abbreviations

ARROW	**A**nti-**R**esonance **R**eflecting **O**ptical **W**aveguides
CS_2	**C**arbon **D**isulfide
FFET	**F**ast **F**ield-**E**ffect **T**ransistor
FMI	**F**ractional **M**odal **I**ntensity
FSM	**F**undamental **S**pace **F**illing **M**ode
GaP	**G**allium **P**hosphide
GNLSE	**G**eneralized **N**onlinear **S**chroedinger **E**quation
ITO	**I**ndium **T**in **O**xide
$LiNbO_3$	**L**ithium **N**iobate
NA	**N**umerical Aperture
PCF	**P**hotonic **C**rystal **F**ibers
PCIGF	**P**hotonic **C**rystal **I**ndex **G**uided **F**ibers
PBG	**P**hotonic **B**andgap **G**uidance
PMD	**P**olarization **M**ode **D**ispersion
THz	**T**erahertz
TiO_2	**T**itanium **D**ioxide
TDD	**T**ime **D**elay **D**ifference
TDS	**T**ime-**D**omain **S**pectroscopy
SPAF	**S**ource **P**ower **A**mplification **F**actor
SML	**S**econd **M**ode **L**oss
ZnTe	**Z**inc **T**elluride