NEAR-FIELD COUPLED ASYMMETRIC TERAHERTZ METASURFACES AND THEIR APPLICATIONS

SUKHVINDER KAUR

DEPARTMENT OF PHYSICS
INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI
NOVEMBER 2024

NEAR-FIELD COUPLED ASYMMETRIC TERAHERTZ METASURFACES AND THEIR APPLICATIONS

by

SUKHVINDER KAUR

Department of Physics, IIT Delhi

Submitted

in the fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

NOVEMBER 2024

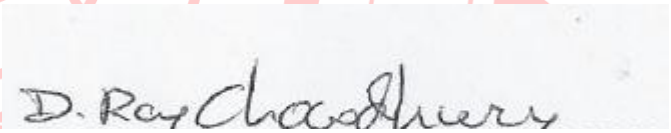
ੴ ਸਤਿ ਨਾਮੁ ਕਰਤਾ ਪੁਰਖੁ ਨਿਰਭਉ ਨਿਰਵੈਰੁ
ਅਕਾਲ ਮੂਰਤਿ ਅਜੂਨੀ ਸੈਭੰ ਗੁਰ ਪ੍ਰਸਾਦਿ ॥

There is one Supreme Being, the Eternal Reality, the Creator, without fear and devoid of enmity, immortal, never incarnated, self-existent, known by grace through the Guru.

Dedicated to my Family…..

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **"Near-Field Coupled Asymmetric Terahertz Metasurfaces and their Applications,"** submitted by **Ms. Sukhvinder Kaur** to the Indian Institute of Technology Delhi for the award of "Doctor of Philosophy" is a record of the original, bonafide research work carried out by her under my supervision and guidance. The thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations related to the award of the degree. The results contained in this thesis have not been submitted in part or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma to the best of my knowledge.



Dr. R. K. Varshney
Professor
Department of Physics
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi- 110016
India

Dr. Dibakar Roy Chowdhury
Professor
Department of Physics
Mahindra University
Telangana- 500043
India

ACKNOWLEDGEMENT

To begin with, I would like to extend my heartfelt gratitude to my supervisors, **Prof. R. K. Varshney and Prof. Dibakar Roy Chowdhury**, for granting me the invaluable opportunity to pursue my research under their guidance. Their profound inspiration, unwavering support, and insightful mentorship have been instrumental throughout my Ph.D. journey. Their extensive scientific expertise, intellectual rigor, and fervent dedication to research have significantly contributed to my development as an independent researcher, enabling me to tackle complex research problems from diverse perspectives. Working under their mentorship has been a privilege. Their ability to create a stimulating and rational scientific environment allowed me to delve deeply into my research area, thereby enhancing my analytical and scientific thinking skills.

I would also like to extend my gratitude to the SRC members, Prof. Joby Joseph, Prof. Kedar Khare, and Prof. Abhishek Dixit, for their continuous encouragement. Their insightful suggestions and feedback have assisted me in overcoming many challenges during my research work. I am also grateful to all the faculty members of the Physics Department at IIT Delhi for their invaluable advice and encouragement throughout my Ph.D. journey. Special thanks to the Dean of Academics (IIT Delhi) and the Head of the Physics Department (IIT Delhi). Moreover, I am deeply appreciative of the administration of Mahindra University (MU) for granting me permission to stay on campus and benefit from my supervisor's guidance. I am also highly thankful to the Department of Science and Technology (DST), Government of India, for providing the fellowship under the DST-INSPIRE scheme that enabled me to carry out my work during this tenure.

I cannot thank my colleagues and friends enough for their tireless and passionate support. Your daily contributions have been essential in completing this thesis and my Ph.D. I am especially grateful to Dr. Babita Bakshi, Dr. Sugeet Sunder, Dr. Nabarun Saha, Dr. Kalpak Gupta, Dr. Arnab Laha, Dr. Vikas Mishra, Dr. Subhajit Karmakar, Anjali, Geetanjali, Pratiksha, Ajay, Chandan, Parveen, Nikhil, Sayyam, Himanshu and my colleagues at Mahindra University: Arun, Soumyajyoti, Shreeya, Indu, Vaishnavi, Nityananda, Asit, Yogesh, Yogitha, Subhranshu, Chinmay, and Arpita. I also acknowledge my friends at IIT Delhi Jully, Surbhi, Swapnil, Parna di, Tina, Nikita, Shreshtha, Pialy, Rohit, Smita, Vikas, Abhishek, and Kuldeep for always being there through the highs and lows. Apart from this, I would like to thank my friends Simran, Arvinder, Jasmeet, Akanksha, Neelam, Manisha, and Diksha.

Most importantly, I would like to express my deepest gratitude to my parents, grandparents, siblings, sister-in-law, and nephew for their unwavering support, love, and gracious blessings throughout this journey. Your constant encouragement has been my motivation to move forward every day.

Finally, I would like to express my gratitude to the divine powers that have guided me through this journey.

Sukhvinder Kaur

ABSTRACT

Metamaterials, defined as artificially engineered structures with subwavelength dimensions, exhibit unique properties not observed in natural materials. These properties arise from the precise design and arrangement of their subwavelength-scale resonators. Metasurfaces, the two-dimensional counterparts of metamaterials, are composed of planar, subwavelength patterns that enable control over radiations across the electromagnetic spectrum. This unique characteristic allows metasurfaces to replace bulky optical components with thin, flat alternatives. The versatility of metamaterials has led to their application in a wide range of fields, including acoustics, mechanics, optics, and photonics. A key property of metamaterials is their scalability and the way their response is influenced by the shapes and geometry of the resonators. These features enable their utilization across the entire electromagnetic spectrum, from radio waves to visible light. The ability to tune the response of metasurfaces by manipulating their geometric configurations offers significant flexibility in their design and application, with potential implications in various industries and technologies. However, metamaterials face a notable challenge: radiative losses. These losses lead to broad line-shaped bright resonances with low Q-factors, limiting their efficiency and performance. To address this issue, researchers have utilized dark resonances, which occur through indirect excitation and are characterized by narrow line shapes with high Q-factors. Dark resonances can be excited by near-field coupling with a bright resonator or by introducing asymmetry into the structure. The introduction of asymmetry into metastructures results in properties that are not accessible in symmetric configurations, making the study of asymmetry in metasurfaces critically important. This

thesis investigates the influence of asymmetry and near-field coupling on the transmission and reflection characteristics of metasurfaces, specifically focusing on the role of behavioural, geometrical, and optical asymmetry in shaping resonances in plasmonic terahertz (THz) metamaterials.

Our study begins by demonstrating that introducing behavioural asymmetry into metasurfaces significantly enhances their sensitivity. This sensitivity enhancement results from an increased interaction volume facilitated by behavioural asymmetry, rendering these metasurfaces highly promising for applications in biosensing and material characterization, where high sensitivity is crucial for accurate detection and analysis. The investigation then extends to the effects of geometrical asymmetry on resonance characteristics, such as frequency, intensity, and Q-factor, as well as on the manipulation of electromagnetic fields at subwavelength scales. It is shown that incorporating asymmetry into the structure leads to the excitation of Fano (dark) resonances. Further coupling of these asymmetric structures results in the excitation of hybridized dark resonance states and toroidal resonances, contingent on the polarization of incident light. Additional studies on geometrical asymmetry focus on the near-field coupling between symmetric (dipole cavities) and asymmetric (split-ring resonators) structures, leading to strong coupling and enhanced transmission capabilities at new resonance frequencies. Additional investigations revealed that the position of the split ring resonator within the dipole cavity significantly affects the transmission characteristics of the structures. This positional adjustment leads to the manifestation of multi-mode surface plasmons. It is noted that geometrical asymmetry substantially influences the transmission properties of designed metasurfaces, leading to the excitation of various dark resonances such as Fano,

toroidal, multi-mode surface plasmon resonances, and hybridized dark states. These resonances have applications in biomedical sensing, filtering, and optical switching, among others.

Finally, this thesis explores optical asymmetry in metasurfaces by investigating non-Hermitian metasurface configurations, a promising approach to achieve exceptional points (EPs) and unidirectional reflectionlessness (UR). The role of near-field coupling in achieving UR is explored, highlighting the potential of this research on non-Hermitian plasmonic metasurfaces to implement futuristic THz technologies, including unidirectional cloaking and unidirectional perfect absorbers. The findings of the present thesis suggest that asymmetry and near-field coupling can significantly enhance the performance of metamaterial structures tailored specifically for THz photonics.

सारांश

मेटामटेरियल्स, जिन्हें कृत्रिम रूप से डिज़ाइन किए गए संरचनाओं के रूप में परिभाषित किया गया है एवं जिनके आयाम उप-तरंगदैर्ध्य होते हैं, प्राकृतिक सामग्रियों में न पाए जाने वाले अद्वितीय गुणधर्म प्रदर्शित करते हैं। ये गुणधर्म उनके उप-तरंगदैर्ध्य-स्तरीय अनुनादकों के सटीक डिज़ाइन और व्यवस्था से उत्पन्न होते हैं। मेटासर्फेस, मेटामटेरियल्स के द्वि-आयामी समकक्ष, समतल एवं उप-तरंगदैर्ध्य पैटर्न से बने होते हैं जो कि विद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम में विकिरणों पर नियंत्रण की क्षमता प्रदान करते हैं। यह अद्वितीय विशेषता मेटासर्फेस को बड़े ऑप्टिकल घटकों को पतले, सपाट विकल्पों से बदलने की अनुमति देती है। मेटामटेरियल्स की बहुपरकारीता ने इन्हें ध्वनि विज्ञान, यांत्रिकी, ऑप्टिक्स, और फोटोनिक्स जैसे विभिन्न क्षेत्रों में उपयोग की संभावना प्रदान की है। मेटामटेरियल्स की एक प्रमुख विशेषता उनकी वृद्धि क्षमता और उनके अनुनादकों के आकार और ज्यामिति द्वारा उनकी प्रतिक्रिया पर प्रभाव है। ये विशेषताएँ इन्हें पूरे विद्युतचुंबकीय स्पेक्ट्रम में, रेडियो तरंगों से लेकर दृश्य प्रकाश तक, उपयोग के योग्य बनाती हैं। मेटासर्फेस की प्रतिक्रिया को उनके ज्यामितीय संरचना को बदलकर सुधारने की क्षमता उनके डिज़ाइन और उपयोग में महत्वपूर्ण लचीलापन प्रदान करती है, जिसका विभिन्न उद्योगों और तकनीकों पर संभावित प्रभाव पड़ सकता है। हालांकि, मेटामटेरियल्स को एक महत्वपूर्ण चुनौती का सामना करना पड़ता है: विकिरणीय हानियाँ। ये हानियाँ चौड़ी रेखा-आकृतियों वाले ब्राइट अनुनादों को जन्म देती हैं जिनके Q-फैक्टर कम होते हैं, जिससे उनकी दक्षता और प्रदर्शन सीमित हो जाता है। इस समस्या को हल करने के लिए, शोधकर्ताओं ने डार्क अनुनादों का उपयोग किया है, जो अप्रत्यक्ष उत्तेजना के माध्यम से उत्पन्न होते हैं और संकीर्ण रेखा-आकृतियों के साथ उच्च Q-फैक्टर द्वारा विशेष होते हैं। डार्क अनुनादों को

एक ब्राइट अनुनादक के साथ निकट-क्षेत्र युग्मन द्वारा या संरचना में असममिति प्रस्तुत करके उत्तेजित किया जा सकता है। मेटास्ट्रक्चर्स में असममिति की प्रस्तुति ऐसे गुणधर्मों को जन्म देती है जो सममित संरचनाओं में सुलभ नहीं होतीं, जिससे मेटासर्फेस में असममिति का अध्ययन अत्यंत महत्वपूर्ण हो जाता है। यह शोध अपवर्तन और परावर्तन विशेषताओं पर असममिति और निकट-क्षेत्र युग्मन के प्रभाव की जांच करता है, विशेष रूप से प्लास्मोनिक टेराहर्ट्ज़ (THz) मेटामटेरियल्स में अनुनादों को आकार देने में व्यवहारिक, ज्यामितीय और ऑप्टिकल असममिति की भूमिका पर ध्यान केंद्रित करता है।

हमारा अध्ययन यह दर्शाता है कि मेटासर्फेस में व्यवहारिक असममिति को पेश करने से उनकी संवेदनशीलता में महत्वपूर्ण वृद्धि होती है। यह संवेदनशीलता वृद्धि व्यवहारिक असममिति द्वारा बढ़ाए गए इंटरैक्शन आयतन के कारण होती है, जिससे ये मेटासर्फेस बायोसेंसिंग और सामग्री विश्लेषण जैसे अनुप्रयोगों के लिए अत्यधिक आशाजनक हो जाते हैं, जहां उच्च संवेदनशीलता सटीक पहचान और विश्लेषण के लिए महत्वपूर्ण होती है। इसके बाद, यह अनुसंधान ज्यामितीय असममिति के अनुनाद गुणधर्मों, जैसे कि आवृत्ति, तीव्रता, और Q-फैक्टर, पर प्रभावों के साथ-साथ उप-तरंगदैर्ध्य पैमाने पर विद्युतचुंबकीय क्षेत्रों के संचालन पर प्रभावों का अध्ययन करता है। यह दिखाया गया है कि संरचना में असममिति को शामिल करने से फैनो (डार्क) अनुनादों का उत्तेजन होता है। इन असममिति संरचनाओं के पुनः युग्मन से हाइब्रिड डार्क अनुनाद अवस्थाएँ और टोरॉइडल अनुनाद उत्पन्न होते हैं, जो प्रक्षिप्त प्रकाश के ध्रुवीकरण पर निर्भर होते हैं। ज्यामितीय असममिति पर किए गए अन्य अध्ययन सममित (डायपोल कैविटीज) और असममिति (स्प्लिट-रिंग अनुनादक) संरचनाओं के बीच निकट-क्षेत्र युग्मन पर ध्यान केंद्रित करते हैं, जिससे नए अनुनाद आवृत्तियों पर मजबूत युग्मन और संवर्धित अपवर्तन जैसी क्षमताएँ प्राप्त होती हैं। विस्तृत अनुसंधान से पता चला कि डायपोल

कैविटी के भीतर स्प्लिट रिंग अनुनादक की स्थिति संरचनाओं की अपवर्तन विशेषताओं को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करती है। इस स्थिति के समायोजन से मल्टी-मोड सर्फेस प्लास्मोन अनुनाद प्रकट होते हैं। यह देखा गया है कि ज्यामितीय असममिति डिज़ाइन किए गए मेटासर्फेस के अपवर्तन गुणधर्मों को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करती है, जिससे विभिन्न डार्क अनुनादों जैसे कि फैनो, टोरॉइडल, मल्टी-मोड सर्फेस प्लास्मोन अनुनाद, और हाइब्रिड डार्क अवस्थाओं की उत्तेजना होती है। ये अनुनाद बायोमेडिकल सेंसिंग, फ़िल्टरिंग, और ऑप्टिकल स्विचिंग जैसे अनुप्रयोगों में उपयोगी हैं।

अंत में, इस शोध में मेटासर्फेस में ऑप्टिकल असममिति की जांच की गई है, जिसमें नॉन- हर्मिशियन मेटासर्फेस संरचना की समीक्षा की गई है, जो असाधारण बिंदुओं (EPs) और एक-तरफ़ा परावर्तनविहीनता (UR) प्राप्त करने के लिए एक आशाजनक दृष्टिकोण है। UR प्राप्त करने में निकट-क्षेत्र युग्मन की भूमिका की जांच की गई है, जिसमें एक-तरफ़ा अदृश्यता और एक-तरफ़ा परिपूर्ण अवशोषक सहित भविष्य की THz प्रौद्योगिकियों को लागू करने के लिए नॉन- हर्मिशियन प्लास्मोनिक मेटासर्फेस पर इस शोध की क्षमता पर प्रकाश डाला गया है। वर्तमान शोध के निष्कर्ष सुझाव देते हैं कि असममिति और निकट-क्षेत्र युग्मन THz फोटोनिक्स के लिए विशेष रूप से तैयार की गई मेटामटेरियल संरचनाओं की प्रदर्शन क्षमता को महत्वपूर्ण रूप से बढ़ा सकते हैं।

Table of Contents

List of Figures

List of Tables

List of Abbreviations

ASRR	Asymmetric Split Ring Resonator
AI	Avian Influenza
BR	Bottom Resonator
CRI	Complex Refractive Index
CST	Computer Simulation Technology
DI	Deionized
EIT	Electromagnetically Induced Transparency
EP	Exceptional Points
FFT	Fast Fourier Transformation
FEM	Finite Element Method
FIT	Finite Integration Technique
IR	Infrared
LHM	Left-handed Materials
LSPR	Localized Surface Plasmon Resonances
MoM	Method of Moments
PT	Parity-Time
PCA	Photoconductive Antenna
PR	Photoresist
RF	Radio Frequency
RIU	Refractive Index Unit
rpm	Rotations per minute

SRR	Split Ring Resonator
SP	Surface Plasmon
SPR	Surface Plasmon Resonance
THz	Terahertz
THz-TDS	Terahertz Time Domain Spectroscopy
TW	Thin Wire
TR	Top Resonator
UV	Ultraviolet
UR	Unidirectional Reflectionlessness
WA	Wood’s Anomaly