NOVEL NANOPHOTONIC DEVICES FOR OPTICAL SWITCHING AND MODULATION

PRIYANKA BHARDWAJ

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2020

NOVEL NANOPHOTONIC DEVICES FOR OPTICAL SWITCHING AND MODULATION

by

PRIYANKA BHARDWAJ

Department of Electrical Engineering

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2020

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled "**Novel Nanophotonic Devices for Optical Switching and Modulation**" being submitted by Ms. Priyanka Bhardwaj to the Department of Electrical Engineering, Indian Institute ofTechnology, Delhi, for the award of the degree of ***Doctor of Philosophy*** in Electrical Engineering, is a record of bonafide research work carried out by her. She has worked under my guidance and supervision and has fulfilled the requirements for the submission of this thesis, which to my knowledge has reached the requisite standard. 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.

(Anuj Dhawan)
Associate Professor
Department of Electrical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi

ACKNOWLEDGMENTS

With the grace of Almighty, one gets the opportunity to write this page in his/her lifetime. Acknowledging the people who have been there for you during the period of research work is a difficult yet pleasant task. Here I would like to take this opportunity to thank all the people who have offered me help, advice and support during my time as a Ph.D student. Firstly I would like to express my gratitude and appreciation to my supervisor Dr. Anuj Dhawan, without whom I would never have been doing a PhD. His invaluable support and guidance made my thesis work possible. He has always been actively interested in my work and has always been available to advise me. I am very grateful for his patience, motivation and immense knowledge that taken together make him a great supervisor.

Also many thanks to my Student Research Committee members Dr. Manan Suri, Prof. Swades De and Dr. Kedar Khare who kept an eye on the progress of my work and provided their valuable comments and suggestions. I would like to acknowledge the academic and technical support of Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, Delhi to provide facilities for completing this research work.

Next I want to thank all of the members of the group specially Kamal Kumar, who helped me throughout the last seven years. I am happy that I have come to know them. I would like to thank them for contributing to such an inspiring and pleasant atmosphere. I would like to thank my family members for their cooperation and motivation during the period of research.

I would also like to recall the constant source of encouragement received from my mother Ms. Neera Bhardwaj, who provided the continuous motivation and support to complete this research work. My husband Mr. Nipunn Sharma, who always encouraged and supported me in every situation. My son Shresth Sharma, who has also sacrificed a lot even at the tender age of six and was always my source of motivation and my best companion, who provided an additional and joyful dimension to my life mission.

Last but not the least, I would like to thank Almighty God for giving me the strength, knowledge, ability and opportunity to undertake this research study and to persevere and complete it satisfactorily. Without his blessings, this achievement would not have been possible.

Priyanka Bhardwaj

ABSTRACT

Nanophotonics is an emerging area of research that deals with interaction between light and matter, particularly nanostructures. The work presented in this thesis mainly focuses on nanophotonic devices (such as switches, modulators and power splitters etc.) and their modeling. This thesis is a summary of detailed theoretical studies of several nanophotonic devices having applications in optical switching and optical modulation. We firstly present a numerical study (using 3 D FDTD and MODE solver) of a broadband optical modulator based on phase change material embedded in photonic crystal (PhC) slab waveguidewhich operates at telecom wavelength 1550 nm, showing a broadband switching capability and ON/OFF extinction ratio of >37 dB. This device is based on the shifting of the mode-gap in photonic bandgap of the PhC slab waveguide when the refractive index of the Phase Change Material layer i.e. Germanium Selenide (GeSe) changes on application of electric field. Further, we investigated an electro-optic switch based on microdisk resonator having Phase Change Material (GeSe) embedded in microdisc resonator, which is based on resonant frequency shift with change in refractive index on applying voltage. We employed Numerical FDTD for optical modeling and Numerical DEVICE for electrical modeling of the same. The third device proposed in this thesis a high-speed novel electro-optic tunable power splitter that is based on depletion-mode interleaved p-n junction in silicon-based microring resonator. The interleaved p-n junction configuration provides higher interaction between propagating mode and depletion region with moderate optical loss compared to other p-n junction configurations.The ring resonator operates between on-resonance and off-resonance states for a specific resonance wavelength on applying externally applied voltage, which enables it as an optical power splitter. and we have obtained a split ratio tuning range of 0.15 to 7.82, which is a very wide range of tunability with very low

power consumption (35 mW) and low external voltage (0-3.5 V).We have used a commercially available solver (Lumerical DEVICE) to calculate the carrier configuration by applying a reverse bias voltage and the calculated carrier information was imported in the FDTD solver (Lumerical FDTD solutions) to calculate the transmission and optical loss. In addition, we have proposed an optical switch based on 1D and 2D plasmonic nanogratings. This plasmonic switch is based on vanadium dioxide (VO_2) which is a smart material that changes its phase upon exposure to IR radiation or on application of voltage or temperature. VO_2 changes its phase from semiconductor to metallic which in turn changes its optical properties. Thus, the optical behavior of the proposed nanogratings changes upon the change of phase of VO_2, leading to optical switching. The design of the 1D and 2D gratings can be varied to tunably vary the switching wavelength. Hence, we have designed efficient optical switches that can be employed for ultrafast switching.

सार

नैनोपोटोनिक्स अनुसंधान का एक दिलचस्प और उभरता हुआ क्षेत्र है जो प्रकाश और पदार्थ, विशेष रूप से नैनोस्ट्रक्चर के बीच बातचीत से संबंधित है। नैनोफोटोनिक्स का क्षेत्र फोटोनिक्स और नैनोटेक्नोलॉजी के क्षेत्र को मिला देता है। इस थीसिस में प्रस्तुत कार्य मुख्य रूप से नैनोफोटोनिक उपकरणों (जैसे स्विच, मॉड्यूलेटर और पावर स्प्लिटर्स आदि) और उनके मॉडलिंग पर केंद्रित है। यह थीसिस ऑप्टिकल स्विचिंग और ऑप्टिकल मॉड्यूलेशन में अनुप्रयोगों वाले कई नैनोफोटोनिक उपकरणों के विस्तृत सैद्धांतिक अध्ययन का सारांश है। हम सबसे पहले एक ऑप्टिकल ऑप्टिकल न्यूनाधिक के 3 डी FDTD और MODE सॉल्वर का उपयोग करते हुए एक संख्यात्मक अध्ययन (फोटोनिक क्रिस्टल में एम्बेडेड चरण परिवर्तन सामग्री के आधार पर) प्रस्तुत करते हैं (PhC) स्लैब वेवगाइड दूरसंचार तरंग दैर्ध्य 1550 एनएम पर चल रही है, एक ब्रॉडबैंड स्विचिंग क्षमता और ON / OFF दिखा रहा है विलोपन अनुपात> 37 डीबी। यह डिवाइस पीएचसी स्लैब वेवगाइड के फोटोनिक बैंडगैप में मोड-गैप की शिफ्टिंग पर आधारित है, जब फेज चेंज मैटीरियल लेयर के अपवर्तक सूचकांक यानी जर्मेनियम सेलेनाइड (GeSe) विद्युत क्षेत्र के अनुप्रयोग के लिए बदल जाता है। इसके अलावा, हमने माइक्रोडिस्क गुंजयमान यंत्र पर आधारित एक इलेक्ट्रो-ऑप्टिक स्विच की जांच की जिसमें फेज़ चेंज मटेरियल (GeSe) था, जो माइक्रोडिस्क रेज़ोनेटर में सन्निहित था, जो वोल्टेज लगाने पर अपवर्तक सूचकांक में परिवर्तन के साथ गुंजयमान आवृत्ति शिफ्ट पर आधारित है। हमने ऑप्टिकल मॉडलिंग के लिए न्यूमेरिकल FDTD और उसी के इलेक्ट्रिकल मॉडलिंग के लिए न्यूमेरिकल डेविस को नियोजित किया। इस थीसिस में प्रस्तावित तीसरा उपकरण एक उच्च गति वाला उपन्यास इलेक्ट्रो-ऑप्टिक ट्यून करने योग्य पावर स्प्लिटर है जो सिलिकॉन-आधारित माइक्रोनिंग रेज़ोनेटर में कमी-मोड इंटरलेव्ड पी-एन जंक्शन पर आधारित है। इंटरलीव्ड पी.एन. जंक्शन कॉन्फ़िगरेशन अन्य पी.एन. जंक्शन विन्यासों की तुलना में

मध्यम ऑप्टिकल हानि के साथ प्रचार मोड और घटने वाले क्षेत्र के बीच उच्च अंतःक्रिया प्रदान करता है। रिंग गुंजयमान यंत्र अनुनाद और ऑफ-रेजोनेंस राज्यों के बीच बाहरी अनुलंब वोल्टेज लगाने पर एक विशिष्ट अनुनाद तरंगदैर्ध्य के बीच संचालित होता है, इसे एक ऑप्टिकल पावर स्प्लिटर के रूप में सक्षम बनाता है। और हमने प्राप्त कर लिया है 0.15 से 7.82 के विभाजन अनुपात ट्यूनिंग रेंज, जो बहुत कम बिजली की खपत (35 mW) और कम बाहरी वोल्टेज (0-3.5 V) के साथ ट्यूनीबिलिटी की एक विस्तृत श्रृंखला है। हमने गणना करने के लिए एक व्यावसायिक रूप से उपलब्ध सॉल्वर (लूमेरिकल डिवाइस) का उपयोग किया है। पारेषण और ऑप्टिकल नुकसान की गणना करने के लिए एफडीईए सॉल्वर (ल्यूमेरिकल एफडीडीटी सॉल्यूशंस) में एक रिवर्स बायस वोल्टेज और परिकलित वाहक जानकारी को लागू करके वाहक विन्यास को आयात किया गया था। इसके अलावा हमने एक प्लास्मोनिक नैनोग्रैटिंग (दोनों 1 डी और 2 डी) आधारित ऑप्टिकल स्विच का प्रस्ताव किया है। यह प्लास्मोनिक स्विच वैनेडियम डाइऑक्साइड (VO_2) पर आधारित है जो एक स्मार्ट सामग्री है जो आईआर विकिरण के संपर्क में या वोल्टेज या तापमान के आवेदन पर बहुत तेजी से अपना चरण बदलती है। VO_2 सेमीकंडक्टर से धातु तक के अपने चरण को बदलता है जो बदले में इसके ऑप्टिकल गुणों को बदलता है। इस प्रकार स्विचिंग में ट्यूनबिलिटी प्राप्त करने के लिए प्रस्तावित नैनोग्रेट्स के ऑप्टिकल व्यवहार में बदलाव किया जा सकता है। इसलिए प्रस्तावित 1 डी और 2 डी प्लास्मोनिक नैनोग्रैटिंग को अल्ट्राफास्ट स्विचिंग के साथ ट्यून करने योग्य स्विच के रूप में उपयोग किया जा सकता है।

Table of Contents

List of Figures

CHAPTER 2

List of Tables