



Doctoral Thesis

Photonic crystals with metallic inclusions

Author(s):

Cui, Xudong

Publication Date:

2006

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005318911> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS.ETH No. 16933

Photonic crystals with metallic inclusions

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

For the degree of
Doctor of Science

Presented by

Xudong Cui

M.S, Chinese Academy of Engineering Physics
B.S, Beijing Institute of Technology
Born 06, 03, 1973

Citizen of China

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ruediger Vahldieck, examiner
Prof. Dr. Christian Hafner, coexaminer
Prof. Dr. Hans-Peter Herzig, coexaminer

2006

Abstract

Photonic crystals are artificial materials that can be obtained from arranging at least two different materials with high index contrast on a regular lattice, i.e., two different dielectrics with a high index contrast or a dielectric and a metallic material. As electromagnetic waves are modulated periodically, there exist band gaps for such structures, in which propagating waves are not allowed to exist. Through introducing point or line defects in the photonic crystals, the light can be controlled, i.e., confined, guided, or localized. This opens a new door in photonics: technologies for directing light on a microscopic scale will have a major impact on telecommunication and related areas. In this thesis, photonic crystals were studied with numerical simulations and new components for optical communication were proposed.

For a better understanding of the fundamental effects of metallic photonic crystals, the scattering of electromagnetic waves at metallic wires both in the radio frequency and in the optical frequency range are outlined. This preparatory study includes plasmon resonances of a single wire and of a set of 9 wires. It is demonstrated that plasmon resonances cause flat band structures with many modes rather than photonic band gaps. At radio frequencies, the existence of a fundamental band gap for Ez waves is highly attractive for practical applications. It was demonstrated that a fundamental band gap also exists at optical frequencies (under certain conditions) although metals lose their conductivity almost entirely and must be described by a complex permittivity.

Filter characteristics of metallo-dielectric photonic crystal slabs are analyzed using the Multiple Multipole Program (MMP) combined with the Model-Based Parameter Estimation technique. This approach takes losses and material dispersion into account and provides highly accurate results at short computation time. Starting from this analysis, different ultra-compact band pass filters for telecommunication wavelengths are designed. The filters consist of only five silver wires embedded in a waveguide structure. By applying stochastic and deterministic techniques the filter structures are optimized to obtain the desired characteristics.

To realize Photonic Crystal slab based filters in integrated circuits, two methods: a) using conducting walls to replace periodic boundary conditions of the photonic crystal slab and b) embedding a photonic crystal filter in a conventional waveguide structure are presented. In the former case - as conductors at optical frequencies aren't Perfect Electric Conductors at all - a real metal (silver) was partially coated near the photonic crystal holes along the sides of the trench waveguide to realize a photonic crystal slab based filter. Although the coatings completely spoil the filter properties and the loss in the metal reduces the filter quality (transmission, bandwidth, etc.), it is possible to reestablish the desired filter characteristics by using an optimization procedure that also takes the coating into account.

In chapter 5, sharp trench waveguide bends in dual mode operation with small local photonic crystals for suppressing radiation are analyzed. Through optimization, different configurations with low reflection, low radiation, low mode conversion, and therefore high transmission for the dominant mode are obtained. Three different types of bends are analyzed and compared: mirror-based structures, resonator-based structures, and structures with small photonic crystals in the bend area. The local

photonic crystals help not only to suppress radiation but also to provide solutions with fewer fabrication tolerance problems.

In chapter 6, different definitions of the resolution of negative index material (NIM) slabs and classical optical lenses with magnification 1 are presented and evaluated for both cases. Several numerical codes – based on domain and boundary discretizations, working in the time- and frequency-domain – are applied and compared. It is shown that super resolution depends very much on the definition of the resolution and that it may be obtained not only for NIM slabs but also for highly refracting classical lenses when the distances of the image and source points from the surface of the lens or slab are shorter than the wavelength.

Zusammenfassung

Photonenkristalle sind künstliche Materialien, welche entstehen, wenn mindestens zwei unterschiedliche natürliche Materialien auf einem periodischen Gitter angeordnet werden. Dabei können entweder unterschiedliche Dielektrika (mit üblicherweise hohem Brechungsindexunterschied) oder Dielektrika mit Metallen kombiniert werden. Da damit die elektromagnetischen Wellen periodisch moduliert werden, entstehen Bandlücken in welchen keine ausbreitungsfähigen Wellen existieren. Durch gezielte Einführung von Punkt- oder Liniendefekten in Photonenkristallen kann die Lichtausbreitung kontrolliert, d.h. eingegrenzt oder geführt werden. Dadurch wird eine neue Tür der Lichttechnologie aufgestossen. Technologien, welche Licht in einem mikroskopischen Massstab manipulieren, werden einen grossen Einfluss auf die Telekommunikation und verwandte Gebiete haben. In der vorliegenden Dissertation werden Photonenkristalle mit numerischen Simulationen untersucht und neue Komponenten der optischen Kommunikation vorgeschlagen.

Für ein besseres Verständnis der grundlegenden Effekte in metallischen Photonenkristallen wird die Streuung elektromagnetischer Wellen an metallischen Drähten, sowohl für Radiofrequenzen als auch für optische Frequenzen vorgestellt. Diese vorbereitende Studie schliesst Plasmon Resonanzen an einzelnen Drähten und an einer Anordnung von neun Drähten ein. Es wird gezeigt, dass Plasmonresonanzen zu flachen Bandstrukturen mit vielen Moden führen, welche jedoch verschwinden, sobald realistische Verluste in den Metallen berücksichtigt werden. Bei Radiofrequenzen existiert eine fundamentale Bandlücke für Ez Wellen, welche für praktische Anwendungen sehr attraktiv ist. Es wird gezeigt, dass eine solche fundamentale Bandlücke - unter bestimmten Bedingungen - auch bei optischen Frequenzen vorkommt obwohl dann Metalle ihre Leitfähigkeit nahezu vollständig verlieren und durch eine komplexe Dielektrizitätskonstante beschrieben werden müssen.

Filtercharakteristiken von metallo-dielektrischen Photonenkristallstrukturen wurden mit Hilfe des Mehrfach Multipol Programms in Kombination mit modell-basierter Parameterabschätzung analysiert. Bei diesem Ansatz werden Verluste und Materialdispersion einbezogen und trotz relativ kurzer Rechenzeit sehr genaue Resultate erzielt. Ausgehend von diesen Untersuchungen wurden unterschiedliche, ultra-kompakte Bandpassfilter für den Telekommunikationsbereich entwickelt. Derartige Filter bestehen aus lediglich fünf Silberdrähten in einem optischen Wellenleiter. Sowohl stochastische als auch deterministische Optimierungsstrategien wurden eingesetzt um die gewünschten Filtercharakteristiken zu erhalten.

Um auf Photonenkristallen basierende Filter in integrierten optischen Schaltkreisen zu realisieren, wurden zwei Methoden vorgeschlagen: a) leitfähige Wände, welche die periodischen Randbedingungen einer Photonenkristallschicht ersetzen und b) Einbettung eines Photonenkristallfilters in einem konventionellen optischen Wellenleiter. Obwohl die metallischen Wände die Filtercharakteristik zerstören und die Verluste im Metall die Filterqualität reduzieren, ist es möglich, die ursprüngliche Filtercharakteristik wieder herzustellen, indem eine geeignete Optimierung durchgeführt wird, welche auch die Wandeffekte berücksichtigt.

Im Kapitel 5 werden scharfe Biegungen in Trenchwellenleitern (tiefgeätzte Rippen) analysiert, in welchen zwei Wellentypen ausbreitungsfähig sind. Dabei werden kleine,

lokale Photonenkristall eingebracht, um Abstrahlung zu unterdrücken. Mittels Optimierung wurden unterschiedliche Anordnungen mit niedriger Reflexion, geringer Abstrahlung und Modenumformung und demgemäss hoher Transmission gefunden. Drei unterschiedliche Typen von Biegungen wurden untersucht und verglichen: Strukturen basierend auf Spiegeln, Strukturen basierend auf Resonatoren und Strukturen mit kleinen lokalen Photonenkristallen. Letztere unterdrücken die unerwünschte Abstrahlung und reduzieren gleichzeitig die Probleme der Fabrikationstoleranzen.

Im Kapitel 6 werden unterschiedliche Definitionen der Auflösung von Schichten mit Metamaterialien mit negativem Brechungsindex („NIM Schicht“, sogenannte „Pendry Linse“) und von klassischen optischen Linsen vorgestellt und anschliessend benutzt um die maximale Auflösung derartiger Strukturen zu berechnen. Mehrere numerische Programme – basierend auf Gebiets- und Randdiskretisierungsmethoden, welche im Zeit- und Frequenzbereich arbeiten – werden angewendet und verglichen. Es wird gezeigt, dass „Superresolution“ sehr stark von der Definition der Auflösung abhängt und dass nicht nur NIM Schichten, sondern auch klassische Linsen (mit hohem Brechungsindex) Superresolution aufweisen können, aber nur wenn die Distanzen von Quell- und Bildpunkten von der Oberfläche der Schicht bzw. Linse kürzer als die Wellenlänge sind.