



Vrije Universiteit Brussel

Metamaterials for Advanced Photonic Applications

Reconsidering the Classical Laws of Optics

PhD Thesis — Philippe Tassin — 29 May 2009
Promotors: Prof. Dr. Irina Veretennicoff & Prof. Dr. Jan Danckaert

ABSTRACT (NEDERLANDSE SAMENVATTING HIERONDER)

In this thesis, the author explores potential applications of metamaterials in photonics. Such materials are man-made materials with extraordinary properties that are not available in nature. One of the most fascinating properties that can be achieved with metamaterials is magnetism at microwave, terahertz and optical frequencies. The author identifies several photonic components where metamaterials could provide enhanced efficiency, new functionality, or go beyond traditional limitations of optics related to the wavelike nature of light.

Photonics—the science and technology of generating, manipulating and detecting light—has had a significant impact on our society during the last decades. From a fundamental viewpoint, photonics has allowed for a variety of breakthroughs in physics, such as femtosecond time metrology, laser-driven particle accelerators, laser fusion, and even the discovery of several elementary particles that are ultimately measured by the detection of photons. On the other hand, researchers have also exploited the huge potential of photonics for numerous industrial, medical and consumer applications, including optical fibre communications for the internet backbone, laser printers, laser-based processing of metals, LCD display technology, optical data storage on DVDs, etc.

These accomplishments of photonics are based on the ability to control the propagation and other properties of light to an incredible degree. This precise control of light is possible through the interaction of photons with a variety of optical materials. Natural materials have, nevertheless, an important shortcoming: at optical frequencies, we can influence only the electric component of electromagnetic waves, whereas the magnetic component is out of reach.

In order to control the magnetic component of light, researchers have recently succeeded to create metamaterials, which are artificial materials that contain small resonant electromagnetic elements. These electromagnetic elements replace the atoms as the basic units for the interaction with light and determine as such the electromagnetic properties of the material. The constituents will often be designed such that the metamaterial has electromagnetic properties that are not observed for natural materials. The design of suitable electrical and magnetic response allows for the existence of materials with, for example, negative index of refraction (left-handed materials).

The thesis starts with a brief review of the history of optical metamaterials and of the basic theory of light propagation in left-handed materials. Plane waves in left-handed materials, negative refraction, total internal reflection at the interface between a right-handed and a left-handed medium, and the inverse Doppler effect are reviewed. Subsequently, the author discusses the propagation of electromagnetic waves in a graded index structure with a gradual transition from positive to negative index of refraction.

The following chapters each describe a different optical component that makes use of a metamaterial. Two chapters are devoted to the miniaturisation of photonic components. A design of an optical waveguide with subwavelength thickness is proposed; this waveguide contains a left-handed material in the cladding in order to engineer the phase shifts associated with total internal reflection of light at the edges of the waveguide. Subsequently, dielectric cavities with subwavelength dimensions are designed by use of transformation optics, a method that is based on techniques borrowed from general relativity.

Two more chapters are devoted to the application of left-handed materials in two different nonlinear optical resonators: a dispersive Kerr resonator and an optical parametric oscillator. It is shown that the left-handed material can be used for the purpose of diffraction management, i.e., it is possible to alter the strength and the sign of the diffraction coefficient. Reduced diffraction may be useful for the downscaling of optical dissipative structures and, hence, for the generation of light beams with sub-diffraction-limited beam diameter.

Finally, a novel metamaterial is designed to exhibit an electromagnetic response similar to electromagnetically induced transparency; for this purpose, two coupled quasi-static electric circuits are designed as a metamaterial constituent. This metamaterial has a narrow transparency window in its spectral response in which low group velocity and small absorption are observed simultaneously. It may therefore be useful for slow light applications.

Reference

Philippe Tassin, *Metamaterials for Advanced Photonic Applications: Reconsidering the Classical Laws of Optics*, PhD Thesis (VUBPRESS, Brussels, 2009). ISBN: 978 90 5487 583 3.

Metamaterialen voor geavanceerde fotonische toepassingen

De klassieke wetten van de optica herbekeken

Doctoraatsthesis — Philippe Tassin — 29 mei 2009
Promotoren: Prof. Dr. Irina Veretennicoff & Prof. Dr. Jan Danckaert

SAMENVATTING (ENGLISH ABSTRACT ABOVE)

In dit proefschrift onderzoekt de auteur mogelijke toepassingen van metamaterialen in fotonica. Dergelijke materialen zijn kunstmatige materialen met buitengewone eigenschappen die niet beschikbaar zijn in de natuur. Een van de meest fascinerende eigenschappen die met metamaterialen verwezenlijkt kunnen worden is magnetisme bij microgolf-, terahertz- en optische frequenties. De auteur identificeert verscheidene fotonische componenten waar metamaterialen tot een betere efficiëntie of nieuwe functionaliteit kunnen leiden of waar metamaterialen aan de traditionele beperkingen van optica veroorzaakt door het golfkarakter van licht voorbij kunnen gaan.

Fotonica – de wetenschap van de generatie, de controle en de detectie van licht – heeft tijdens de laatste decennia een belangrijke invloed op onze maatschappij gehad. Vanuit fundamenteel oogpunt kunnen we stellen dat fotonica heeft bijgedragen tot een aantal doorbraken in de fysica, zoals femtoseconde metrologie, lasergebaseerde deeltjesversnellers, laserfusie, en zelfs de ontdekking van verscheidene elementaire deeltjes die uiteindelijk via de detectie van fotonen worden gemeten. Anderzijds hebben onderzoekers ook het enorme potentieel van fotonica voor talrijke industriële, medische en consumententoepassingen geëxploiteerd, denk maar aan optische vezel communicatiesystemen voor het internet, laserprinters, de bewerking van metalen met lasers, lcd-schermen en optische gegevensopslag op dvd's.

Vele van deze verwezenlijkingen in de fotonica zijn gestoeld op de mogelijkheid om de voortplantings- en andere eigenschappen van licht met ongekende nauwkeurigheid te controleren. Deze zeer precieze beheersing van licht is mogelijk door de wisselwerking van fotonen met een breed spectrum aan optische materialen. Natuurlijke materialen kennen evenwel een belangrijke tekortkoming: bij optische frequenties kunnen we enkel de elektrische component van elektromagnetische golven beïnvloeden, terwijl de magnetische component buiten bereik blijft.

Om de magnetische component van licht te kunnen controleren zijn onderzoekers er onlangs in geslaagd om metamaterialen te creëren. Dit zijn kunstmatige materialen die zeer kleine resonerende elektromagnetische elementen bevatten. Deze elementen vervangen de atomen als

basiseenheden voor de interactie met licht en bepalen als dusdanig de elektromagnetische eigenschappen van het materiaal. De elementen zullen vaak ontworpen worden zodanig dat het metamateriaal elektromagnetische eigenschappen heeft die niet voor natuurlijke materialen worden waargenomen. Het ontwerp van een geschikte elektrische en magnetische respons laat bijvoorbeeld het bestaan van materialen met negatieve brekingsindex (linkshandige materialen) toe.

De thesis begint met een kort overzicht van de geschiedenis van optische metamaterialen en van de theorie van voortplanting van licht in linkshandige materialen. Vlakke golven in linkshandige materialen, negatieve breking en totale interne reflectie aan het oppervlak tussen een rechtshandig en linkshandig materiaal en het omgekeerde dopplereffect worden besproken. Daarna behandelt de auteur de voortplanting van elektromagnetische golven in een structuur met een geleidelijke overgang van een positieve naar een negatieve brekingsindex.

De daaropvolgende hoofdstukken beschrijven elk een verschillende optische component die van een metamateriaal gebruik maakt. Twee hoofdstukken zijn gewijd aan de miniaturisatie van fotonische componenten. Een ontwerp van een optische golfgeleider met dikte kleiner dan de golflengte wordt voorgesteld; deze golfgeleider bevat een linkshandig materiaal in de mantel om de faseverschuiving veroorzaakt door totale interne reflectie van licht aan de randen van de golfgeleider te kunnen beïnvloeden. Vervolgens worden diëlektrische caviteiten met afmetingen kleiner dan de golflengte ontworpen met behulp van transformatieoptica, een methode die gebaseerd is op technieken van de algemene relativiteit.

Twee andere hoofdstukken behandelen de toepassing van linkshandige materialen in twee verschillende niet-lineaire optische resonatoren: een niet-lineaire Kerr-resonator en een optische parametrische oscillator. Er wordt aangetoond dat het linkshandige materiaal voor diffractiebeheer kan worden gebruikt, d.w.z. dat het mogelijk is om de sterkte en het teken van de diffractiecoëfficiënt aan te passen. Zwakkere diffractie kan aangewend worden voor de verkleining van optische dissipatieve structuren en dus voor de generatie van lichtbundels met subdiffractie-gelimiteerde diameter.

Tenslotte wordt een nieuw metamateriaal ontworpen met een gedrag dat sterk gelijkend is aan dat van materialen met elektromagnetisch geïnduceerde transparantie. Hiervoor worden twee gekoppelde quasistatische elektrische circuits als metamateriaalelement ontworpen. Dit metamateriaal heeft een smal transparantievenster in zijn spectrale respons waarin lage groepssnelheid en geringe absorptie gelijktijdig kunnen worden waargenomen. Het kan daarom nuttig zijn voor toepassingen waar het nodig is om optische signalen sterk te vertragen.

Referentie

Philippe Tassin, *Metamaterials for Advanced Photonic Applications: Reconsidering the Classical Laws of Optics*, PhD Thesis (VUBPRESS, Brussels, 2009). ISBN: 978 90 5487 583 3.