

POLARISATIONS-UNSENSITIVE OPTISCHE METAMATERIALIEN

POLARIZATION-INSENSITIVE OPTICAL METAMATERIALS

Optische Metamaterialien sind künstlich nanostrukturierte Medien, in denen die Ausbreitungseigenschaften des Lichts maßgeblich von der ihnen zugrunde liegenden Struktur bestimmt werden. Durch nano-skaliert präzise Umsetzung neuer Designs kann somit das bestehende Spektrum optischer Elemente umfassend erweitert werden /1,2/. Besondere Aufmerksamkeit erfuhren dabei die so genannten Negativ-Index-Materialien /3/. Eine wesentliche Einschränkung existierender Demonstratoren ist jedoch die starke Abhängigkeit vom Polarisationszustand der wechselwirkenden Strahlung. Nur für feste lineare Polarisation und eine diesbezügliche Ausrichtung des Metamaterials konnten die mit einem negativen Index korrelierten Eigenschaften nachgewiesen werden /4/. Dies ist insbesondere der Implementierung von Metamaterialien in Abbildungssysteme abträglich /5/. Für zukünftige Applikationen wird eine polarisations-unsensitive spektrale Antwort gefordert.

Mittels Elektronenstrahl-Lithographie wurde das neue Metamaterial-Design »Schweizer Kreuz« realisiert (Abb. 1a und 1b), welches bei senkrechtem Lichteinfall für alle Polarisierungen die gleiche optische Antwort aufweist.

Optical metamaterials are artificially nanostructured media in which the propagation properties of light are decisively dominated by the structures that comprise them. Hence the existing spectrum of optical elements can be considerably enlarged by precise implementation of novel designs on the nano-scale /1,2/. A particular focus was put on the so-called negative-index materials. However, though there are demonstrators presently existent, one intrinsic constraint was the strong dependence on the state of polarization of the interacting irradiation. The properties that are commonly correlated to a negative refractive index could only be verified for one fixed linear polarization state and an alignment of the metamaterial referring to it /4/. This is particularly detrimental for a potential implementation of metamaterials in imaging systems /5/. Accordingly, a polarization-insensitive spectral response is urgently required for future applications.

By means of electron-beam lithography, the novel metamaterial design termed "Swiss cross" was realized (Fig. 1a and 1b). It features the same spectral response for any polarization state at normal incidence.

1a Einheitszelle des »Schweizer Kreuzes«.

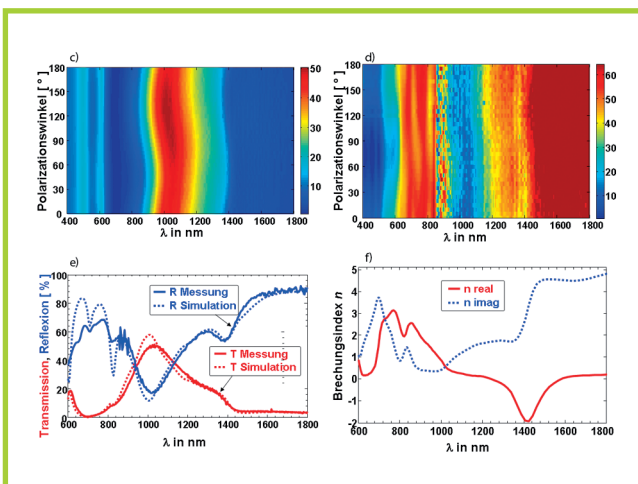
1b REM-Bild des hergestellten Metamaterials, die Vergrößerung zeigt eine Einheitszelle.

1a Unit cell of the "Swiss cross".

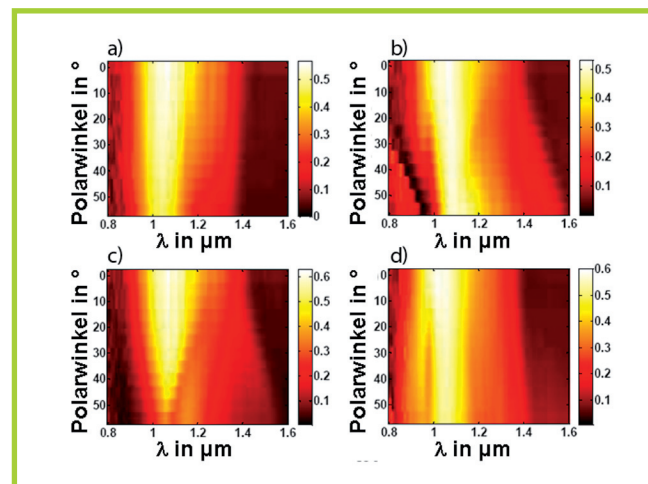
1b SEM micrograph of the fabricated metamaterial, Inset: magnification of a unit cell.

Die Polarisationsunabhängigkeit basiert auf der Symmetrie der Einheitszelle und wurde experimentell bis auf geringfügige herstellungsbedingte Abweichungen durch spektroskopische Messungen bestätigt (Abb. 1c und 1d). Dabei konnte eine exzellente Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie nachgewiesen werden (Abb. 1e). Insbesondere weist das »Schweizer Kreuz« einen effektiven negativen Brechungsindex von $n = -1,9$ bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1400$ nm auf (Abb. 1f). Die Universalität dieser Eigenschaft für alle Polarisationszustände bei senkrechtem Einfall ist ein Novum für Metamaterialien im optischen Spektralbereich [6].

The independency of polarization is based on symmetry considerations of the unit cell and was experimentally proved by spectroscopic measurements within the limits of minor manufacturing deviations from an ideal sample (Fig. 1c and 1d). Excellent agreement between experiments and theory was found (Fig. 1e). In particular, the 'Swiss cross' shows a negative index of refraction of $n = -1.9$ at a wavelength of $\lambda = 1400$ nm (Fig. 1f). The universality of this property for all states of polarization at normal incidence constitutes a novelty in the optical spectral domain [6].



1 c) Transmission und d) Reflexion in Abhängigkeit der Wellenlänge λ und dem Polarisationswinkel. e) Vergleich von gemessenen und simulierten Transmissions- und Reflexionsspektren für senkrechten Einfall. f) Aus den numerischen Daten errechneter Real- und Imaginärteil des Brechungsindexes. / c) Transmission and d) reflection in dependence of wavelength λ and polarization angle. e) Comparison of measured and simulated transmission spectra for normal incidence. f) Real and imaginary part of the refractive index retrieved from the calculated data.



2 Gemessene Transmissionspektren des »Schweizer Kreuzes« in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ und dem Polarisationswinkel θ . Bezüglich Polarisation und Azimutwinkel ϕ werden vier Fälle unterschieden: a) TE-Polarisation und $\phi = 0^\circ$; b) TM-Polarisation und $\phi = 0^\circ$; c) TE-Polarisation und $\phi = 45^\circ$; d) TM-Polarisation und $\phi = 45^\circ$. / Measured transmission spectra of the "Swiss cross" in dependency of wavelength λ and polar angle θ . 4 cases concerning polarization and azimuth angle ϕ have to be distinguished: a) TE-polarization and $\phi = 0^\circ$; b) TM-polarization and $\phi = 0^\circ$; c) TE-polarization and $\phi = 45^\circ$; d) TM-polarization and $\phi = 45^\circ$.

An diesem Metamaterial wurde erstmalig die Abhängigkeit eines negativen Brechungsindex vom Einfallswinkel des Lichts experimentell und theoretisch untersucht /7/. Das Winkelspektrum ist für Abbildungssysteme auf der Basis optischer Metamaterialien von hoher Relevanz. Im vorliegenden Fall wurden der Azimutwinkel ϕ und die Polarisation des einfallenden Lichts festgehalten und der Polarwinkel θ und die Wellenlänge λ als freie Parameter variiert. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Transmissionsmessungen für vier Winkel- und Polarisationskonfigurationen des »Schweizer Kreuzes«.

Aus diesen Ergebnissen können am Beispiel dieses optischen Metamaterials erstmalig Schlüsse über die Winkelabhängigkeit der zugewiesenen effektiven Materialeigenschaften gezogen werden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch den Realteil des effektiven Brechungsindex in Abhängigkeit von Polarwinkel θ und Wellenlänge λ für einige ausgewählte Konfigurationen /8/. Diese Abhängigkeiten des Index suggerieren dessen Verständnis als einen »Wellen-Parameter«, der die Lichtpropagation in Metamaterialien modellhaft beschreibt /9/. Er kann somit nicht als eine explizit dem Metamaterial zugeordnete Eigenschaft verstanden werden, im Gegensatz zu seiner Interpretation für klassische optische Medien. Die Erforschung der Grundlagen optischer Metamaterialien wird daher auch in den kommenden Jahren noch spannende Fragestellungen aufwerfen.

For the first time, the dependence of a negative index on the angle of incidence of the incoming light could be examined both experimentally and theoretically on the example of this metamaterial /7/. Generally, the angular spectral response is highly relevant for imaging systems on the basis of optical metamaterials. In the case under consideration, the azimuth angle ϕ and the polarization of the incoming light were fixed while the polar angle θ and the wavelength λ were varied as free parameters. Figure 2 exemplarily shows the transmission measurements of the "Swiss cross" for four configurations of angles and polarization states.

Basing on these results and for the first time, it was possible to draw conclusions concerning the angular dependency of the effective properties that are commonly ascribed to optical metamaterials. Figure 3 depicts exemplarily the real part of the effective index of refraction in dependency on the polar angle θ and the wavelength λ for chosen configurations /8/. This dependency of the index suggests that it should be considered a "wave-parameter" which may model the light propagation in optical metamaterials. Contrary to its interpretation for classical optical media, it may not be understood as a property explicitly linked to the metamaterial itself. In light of these findings, it becomes clear that the exploration of the fundamentals of optical metamaterials will give rise to further exciting questions in the years to come.

Literatur/References

/1/ Pendry, J.; et al.: Controlling Electromagnetic Fields, Science 312, 1780 (2006).

/2/ Leonhardt, U.: Optical Conformal Mapping, Science 312, 1777 (2006).

/3/ Shalaev, V.: Optical negative-index metamaterials, Nat. Phot. 1, 41 (2007).

/4/ Dolling, G.; et al.: Simultaneous Negative Phase and Group Velocity of Light in a Metamaterial, Science 312, 892 (2006).

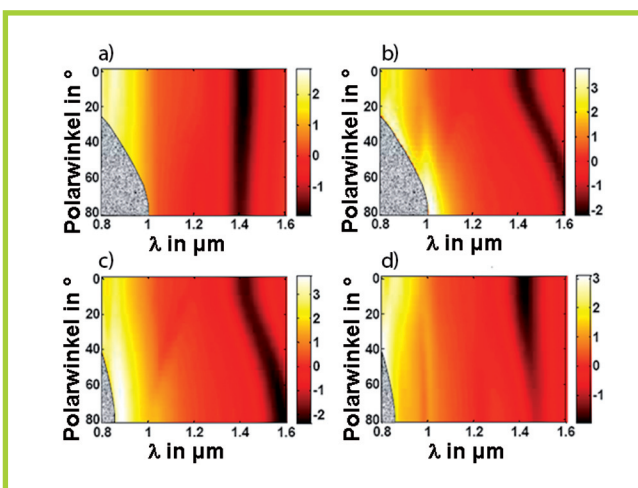
/5/ Pendry, J.: Negative Refraction Makes a Perfect Lens, Phys. Rev. Lett. 85, 3966 (2000).

/6/ Helgert, C.; et al.: Polarization independent negative-index metamaterial in the near-infrared, Opt. Lett. 34, 704 (2009).

/7/ Menzel, C.; et al.: Retrieving effective parameters for metamaterials at oblique incidence, Phys. Rev. B 77, 195328 (2008).

/8/ Menzel, C.; et al.: Angular resolved effective optical properties of a Swiss cross metamaterial, Appl. Phys. Lett. 95, 131104 (2009).

/9/ Rockstuhl, C.; et al.: Light propagation in a fishnet metamaterial, Phys. Rev. B 78, 155102 (2008).



3 Aus den numerischen Daten errechneter Realteil des effektiven Brechungsindexes für vier Fälle wie in Abb. 2. Die schattierten Regionen indizieren Bereiche, in denen höhere Beugungsordnungen propagieren. / Real part of the effective refractive index retrieved from numerical data for the 4 cases as in Fig. 2. The shaded areas indicate regions in which non-zero diffraction orders propagate.

AUTHORS

Christian Helgert¹

Christoph Menzel²

Carsten Rockstuhl²

Ernst-Bernhard Kley¹

Falk Lederer²

Thomas Pertsch¹

Andreas Tünnermann^{1,3}

¹Institut für Angewandte Physik,

Friedrich-Schiller-Universität Jena

²Institut für Festkörpertheorie und

-optik, Friedrich-Schiller-Universität

Jena

³Fraunhofer IOF

CONTACT

Prof. Dr. Thomas Pertsch

Phone: +49 3641 947 840

thomas.pertsch@uni-jena.de