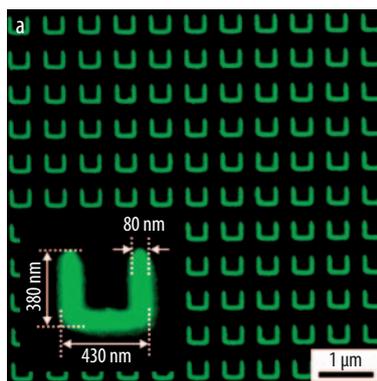


■ Aufbruch ins Volumenland

Mit bereits etablierten Techniken ließen sich erstmals dreidimensionale Metamaterialien für den optischen Spektralbereich herstellen.

Ein altes Quadrat erzählt uns im Roman „Flächenland“ (1884) von Edwin A. Abbott vom Leben in einer zweidimensionalen Welt und ihren Bewohnern; einer Art von Welt, auf die sich bis vor kurzem auch die Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Metamaterialien für sichtbares Licht beschränkten bzw. beschränken mussten. Doch nun betreten Physiker der Universität Stuttgart auch das dreidimensionale Metamaterialien-Land [1].

Metamaterialien bestehen aus nanostrukturierten Elementarzellen, deren Größe und Form wesentlich die Ausbreitung des Lichts im Metamaterial beeinflussen [2].^{*)} Die Elementarzellen bestehen im Allgemeinen aus metallischen Strukturen, die resonante Schwingungen der Leitungselektronen in dem angepeilten Spektralbereich aufweisen. Wenn die räumliche Ausdehnung der Elementarzelle verglichen mit der Lichtwellenlänge sehr klein ist, kann das Licht deren Details nicht mehr auflösen und nimmt effektive Materialeigenschaften wahr. Die Möglichkeit einer frequenzabhängigen relativen Permeabilität μ (künstlicher Para- oder Diamagnetismus) könnte entscheidende Entwicklungen in der Optik und anderen Wissenschaftsgebieten, die sich die Optik zunutze machen, einleiten. Wenn das Material darüber hinaus eine ausreichend starke Frequenzabhängigkeit (Dispersion) in der effektiven Permittivität ϵ im selben Frequenzraum und damit einen negativen Brechungsindex besäße, wären faszinierende Anwendungen möglich. Als Beispiele seien hier Abbildungssysteme, die keinen Auflösungsgrenzen unterliegen („perfekte Linse“) [3], oder anisotrope Metamaterialien, die Gegenstände für einen externen Betrachter unsichtbar erscheinen lassen („Tarnkappe“) [4], genannt. Um sich diesen Effekten zu nähern, ist zunächst eine Technologie erforderlich, mit der sich dreidimensionale

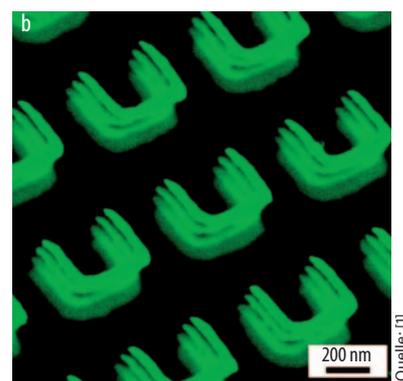


Die Aufsicht der vier perfekt justierten gestapelten Metaoberflächen, die aus periodisch angeordneten Gold-Split-Ring-Resonatoren bestehen, wirkt zu-

Medien bestehend aus geeigneten Elementarzellen herstellen lassen.

Während im niederfrequenten Spektralbereich (bis zu einigen GHz) die Elementarzellen einfach auf Leiterplatten gedruckt werden, die dann wiederum zu einem Volumenmedium stapelbar sind, war dies für Metamaterialien, die im optischen Spektralbereich arbeiten, bisher nicht möglich. Die hochauflösenden Lithographiemethoden, mit denen sich Strukturgrößen von einigen zehn Nanometern erreichen lassen, erlauben es a priori nämlich lediglich, planare Oberflächen zu strukturieren. Somit waren bisher fast ausschließlich sog. Metaoberflächen herstellbar, die aus einer einzelnen Lage funktioneller Elementarzellen bestehen.

Erste Schritte auf dem Weg zu einem Volumenmedium gingen vor einigen Monaten Gunnar Dolling und seine Kollegen aus Karlsruhe [5]. Zunächst definierten sie die Geometrie der Elementarzelle mithilfe eines Elektronenstrahls in einem „Lack“ (Photoresist). Dieses Polymer verändert hierbei seine chemische Struktur und somit seine Löslichkeit. Der Elektronenstrahl prägt dem Photoresist ein Löslichkeitsprofil auf, das beim Entwicklungsvorgang als Oberflächenprofil in den Photoresist übertragen wird. Anschließend brachten die Karlsruher Forscher alternierend Schichten eines Metalls und eines



nächst zweidimensional (a). Die Schrägansicht (b) des Metamaterials offenbart aber seine räumliche Ausdehnung.

Dielektrikums auf den Photoresist auf [5]. In einem weiteren Schritt wurde der verbliebene Photoresist mitsamt den darauf lagernden Materialschichten mithilfe eines geeigneten Lösungsmittels herausgelöst (sog. Lift-Off-Prozess). Hierbei verbleiben üblicherweise nur die direkt auf dem Substrat aufliegenden Materialschichten. Bei diesem Lift-Off-Prozess ließen sich so drei funktionelle Lagen herstellen. Diese Technik ist allerdings nicht beliebig skalierbar und eignet sich daher nicht, um eine immer höhere Anzahl von Lagen zu realisieren.

Eine solche Beschränkung konnten Physiker der Universität Stuttgart um Harald Giessen jüngst mit einer neuen Technik aufheben [1]. Sie stellten erfolgreich dreidimensionale Metamaterialien her, indem sie vier Prozessschritte wiederholten: ein Elektronenstrahl-Schreibvorgang mit nachfolgendem Ätzen sowie das Auftragen und Planarisieren einer dicken Photoresist-Schicht. Mithilfe dieser Prozessschritte ließen sich bis zu vier Lagen eines Metamaterials herstellen, das aus einer periodischen Anordnung sog. Split-Ring-Resonatoren besteht (Abb. 1). Das sind geschlitzte Ringe, die als „magnetische Atome“ in geeigneten Konfigurationen dienen können, also magnetische Dipole, die auch bei optischen Frequenzen noch spürbar auf ein äußeres Feld reagieren. Die-

*) vgl. auch: Physik Journal, August/September 2006, S. 51, ibid., Dezember 2006, S. 29 und ibid., Mai 2007, S. 20

se Split-Ring-Resonatoren besitzen plasmonische Resonanzen der Leitungselektronen, die sich durch ein externes Beleuchtungsfeld anregen lassen, und sind ein ausreichend gut untersuchtes System. Die resonante Streuantwort der Split-Ring-Resonatoren beeinflusst die effektive Permittivität bzw. Permeabilität abhängig von der Ausbreitungs- und Polarisationsrichtung des Beleuchtungsfeldes. Da eine einzelne Lage von Split-Ring-Resonatoren bei senkrechter Beleuchtung nur die effektive Permittivität modifiziert, wurden in der aktuellen Arbeit solche Einzellagen mit höchster Präzision übereinandergeschichtet angeordnet. Dies führte zu einer starken Kopplung zwischen den einzelnen Lagen. Die resultierende Aufspaltung der plasmonischen Resonanz der Einzellagen in eine symmetrische und eine antisymmetrische Mode führte zu einer starken Dispersion der effektiven Permeabilität. Die Resonanzwellenlängen der Struktur lagen dabei im

Infraroten zwischen 1,5 und 2,5 μm . Damit wurde erstmals eine Technologie präsentiert, die es erlaubt, ein dreidimensionales Metamaterial im optischen Spektralbereich zu formen. Besonders bemerkenswert ist, dass dies mit den bereits etablierten Techniken der Metaoberflächen-Herstellung möglich ist.

Auch wenn die Stuttgarter Physiker momentan nur eine negative Permeabilität, aber noch keinen negativen Brechungsindex zeigen konnten, eröffnet diese Technologie doch die Möglichkeit, ein solches Medium zu realisieren. Um Volumenmedien für sichtbares Licht herzustellen, ist eine reduzierte Strukturgröße erforderlich, damit die Dispersion auch bei kürzeren Wellenlängen auftritt. Da die Materialdispersion bei dieser Skalierung allerdings abnimmt, sind neue Ansätze für das Design von Metamaterialien notwendig.

Auf dem weiten Weg zur praktischen Nutzung von Metamaterialien ist noch eine weitere Schwie-

rigkeit zu überwinden: In nahezu allen zurzeit realisierten Metamaterialien charakterisiert nicht primär der Realteil des Brechungsindex die Lichtausbreitung, sondern sein starker Imaginärteil, der zu einer starken Lichtabsorption führt. Wenn es gelänge, diese Verluste durch ein geeignetes Verstärkungsmanagement in dreidimensionalen Medien zu kompensieren, könnten solche künstlichen Medien die Grundbausteine optischer Elemente werden, die die eingangs beschriebenen fantastischen Eigenschaften besitzen würden.

Carsten Rockstuhl

Dr. Carsten Rockstuhl, Institut für Festkörpertheorie und -optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

- [1] N. Liu, H. Guo, L. Fu, S. Kaiser, H. Schweizer und H. Giessen, *Nature Materials* **7**, 31 (2008)
- [2] D. R. Smith, J. B. Pendry und M. C. K. Wiltshire, *Science* **305**, 788 (2004)
- [3] J. B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3966 (2000)
- [4] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr und D. R. Smith, *Science* **314**, 977 (2006)
- [5] G. Dolling, M. Wegener und S. Linden, *Opt. Lett.* **32**, 551 (2007)