

## ■ Negativ und voluminös

Neue Herstellungsverfahren ermöglichen dreidimensionale Metamaterialien, die einen negativen Brechungsindex aufweisen.

Eine perfekte Linse, mit der sich das Abbesche Beugungslimit umgehen lässt, oder optische Tarnkappen, die einen Gegenstand unsichtbar machen sollen – diese potenziellen Anwendungen haben in den letzten Jahren die Forschungsarbeiten an Metamaterialien beflügelt. Diese Materialien bestehen aus periodisch angeordneten Nanostrukturen, typischerweise aus Metall. Einfallende elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge, die wesentlich größer ist als die typische Ausdehnung der Nanostrukturen, nimmt die Details der Strukturen nicht wahr, sondern „spürt“ nur effektive Materialeigenschaften. Entscheidend für die elektromagnetischen Eigenschaften sind die elektrische Permittivität  $\epsilon$  des Metalls sowie die magnetische Permeabilität  $\mu$ , die bei geeigneter Form der Nanostrukturen Resonanzen aufweisen können, ähnlich wie ein kleiner Schwingkreis aus Kondensator und Spule. Aufgrund dieser Resonanzen gibt es Frequenzbereiche, bei denen  $\epsilon$  bzw.  $\mu$  negativ sind. Überlappen diese Bereiche, so wird auch der Brechungsindex negativ. In den vergangenen Jahren gab es große Fortschritte hinsichtlich der Form der Nanostrukturen (z. B. sog. Split-Ring-Resonatoren, Drahtgitter oder Mäander) sowie der Verschiebung der Resonanzfrequenz ins sichtbare Licht [1–3].

Da das passgenaue Stapeln von vielen Lagen der Nanostrukturen

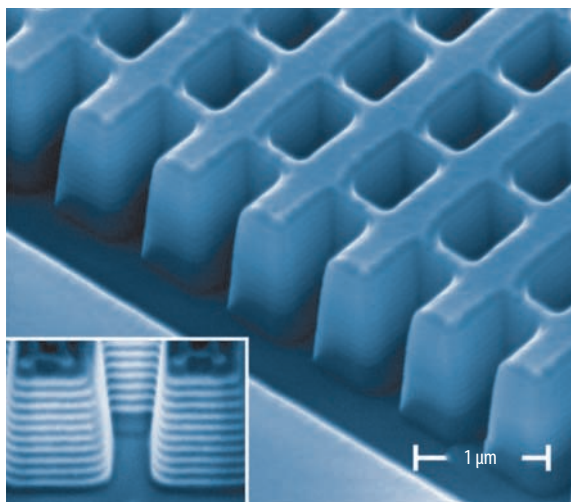


Abb. 1 Eines der neuen Metamaterialien besteht aus zehn Ag/MgF<sub>2</sub>-Doppelschichten mit einem eingeschriebenen Drahtgitter.

an den Grenzen derzeitiger Nanotechnologie liegt, waren ein Großteil der bisherigen Metamaterialien eigentlich eher Meta-Oberflächen. Nun sind drei bahnbrechende Veröffentlichungen erschienen, die zum ersten Mal die Möglichkeit eröffnen, tatsächlich großvolumige, dreidimensionale Metamaterialien herzustellen und die bisherigen Probleme elegant zu umgehen. Gleichzeitig ist es an zwei der Materialien gelungen nachzuweisen, dass sie einen Laserstrahl negativ brechen, d. h. gemäß dem Snelliusschen Brechungsgesetz in die „falsche“ Richtung ablenken.

Die Gruppe von Martin Wegener in Karlsruhe schreibt mithilfe von Femtosekunden-Laserpulsen eine dreidimensionale Struktur in ein SU8-Polymeremplat [4]. Nach dem Entwicklungsprozess

deponieren die Wissenschaftler zunächst eine dünne SiO<sub>2</sub>-Schicht auf das entstehende Gerüst und darauf eine zusammenhängende Silberschicht. Dieses Verfahren erlaubt es im Prinzip, beliebig große, dreidimensionale Käfigstrukturen herzustellen, die jede Form nach Wunsch enthalten. Allerdings sind die Strukturen noch relativ groß, sodass die Wellenlänge auf das nahe Infrarote begrenzt ist. Außerdem hängt die komplette Struktur elektrisch leitend zusammen, während voneinander isolierte Strukturen vorteilhaft sind. Für beide Probleme zeichnen sich in naher Zukunft Lösungsmöglichkeiten ab. Derzeit sind Strukturen von 100 × 100 × 100 μm<sup>3</sup> möglich, und diese Technologie ist im Rahmen einer Ausgründung des KIT in Karlsruhe zusammen mit der Carl Zeiss AG bereits kommerziell erhältlich.<sup>1)</sup>

Die beiden anderen Arbeiten kommen aus der Gruppe von Xiang Zhang in Berkeley und beruhen auf Ionenstrahlschreiben [5] bzw. elektrochemischem Anodisieren [6]. Bei ersterer, an der auch der deutsche Postdoc Thomas Zentgraf beteiligt ist, deponieren die Wissenschaftler auf einem Substrat zehn Doppelschichten aus jeweils 30 nm Silber und 50 nm MgF<sub>2</sub>. In diesen Schichtstapel wird mit fokussierten Ionenstrahlen ein gestapeltes Drahtgitter der Größe

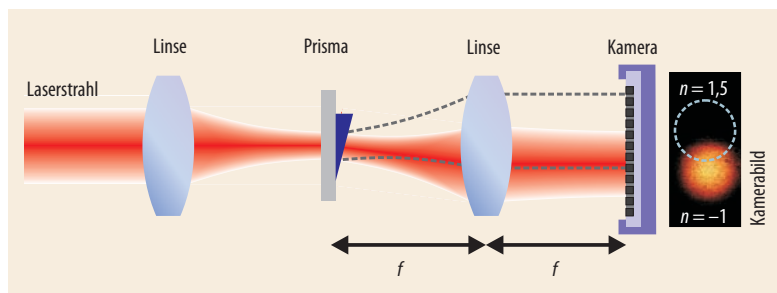


Abb. 2 Ein Prisma aus dem Metamaterial lenkt einen durchstimmbaren Laserstrahl ab, und zwar aufgrund der Dispersion des Brechungsindex je nach Wellenlänge in verschiedene Richtungen. Zwischen

1500 und 1800 nm tritt ein negativer Brechungsindex auf. Der gestrichelte Kreis deutet an, wo der Lichtfleck bei einem positiven Brechungsindex von  $n = 1,5$  auf die Kamera auftreffen würde.

1) www.nanoscribe.de

$10 \times 10 \times 1 \mu\text{m}^3$  eingeschrieben (Abb. 1). Ein daraus geschliffenes Prisma lenkt einen Lichtstrahl mit einer Wellenlänge zwischen 1,5 und 1,8  $\mu\text{m}$  in die „falsche“ Richtung ab (Abb. 2). Die Transmissionseffizienz der Struktur übersteigt zum Teil 60 %, der Realteil des Brechungsindex, der bis zu  $-1,5$  reicht, ist sogar dreimal größer als der verlustbringende Imaginärteil [5]. Die Nachteile dieses Verfahrens sind die extrem kleine Fläche, die sich mit dem fokussierten Ionenstrahl schreiben lässt, und die durch das Ionenstrahlätzen entstehenden trapezförmigen Stege der Struktur, die mit zunehmender Tiefe breiter werden und Resonanzverschiebungen zur Folge haben. Auch ist es mit diesem Verfahren nicht möglich, verschieden geformte Lagen übereinander oder wesentlich mehr als etwa 30 Doppelschichten zu schreiben, weil der Ionenstrahl dann nicht mehr durch das Material bohren kann. Allerdings haben bereits zehn Lagen von Nanostrukturen ausgereicht,

um Tarnkappen im GHz-Bereich zu realisieren [7].

Der zweite Ansatz von Xiang Zhangs Gruppe könnte hingegen zu wirklich großvolumigen Metamaterialien für das sichtbare optische Spektrum mit relativ einfacher Herstellung führen [6]. Dieser Ansatz nutzt aus, dass aus einer Aluminiumschicht, die bei einem elektrochemischen Prozess als Anode verwendet wird, poröses Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) mit einem hexagonalen Muster paralleler Poren im Abstand von 110 nm entsteht. Diese Poren werden in einem zweiten elektrochemischen Prozess mit Silber gefüllt. In den 5 bis 11  $\mu\text{m}$  großen Proben gelang es, negative Brechung im Sichtbaren bei 660 nm und 780 nm und bei Einfallswinkeln bis  $30^\circ$  nachzuweisen, aufgrund der Anordnung der Silberdrähte jedoch nur bei Lichteinfall normal zu der Drahtausrichtung. Der Gruppenbrechungsindex lag im Bereich von  $-4$ , und die Verluste sind um fünf Größenordnungen kleiner als bei

den Fischnetz-Metaoberflächen [2]. Dieser Ansatz besticht durch seine Breitbandigkeit und durch seine geringen Verluste, ist jedoch inhärent zweidimensional in Bezug auf die Brechung. Die neuen Herstellungsverfahren lassen hoffen, dass Metamaterialien als Wellenleiter oder für die Subwellenlängen-Abbildung und optische Kommunikation den Schritt aus dem Labor in unseren Alltag finden werden. Als nächster Schritt ist wohl die Kombination der Nanostrukturen mit optischer Verstärkung zu erwarten (z. B. durch lichtemittierende Halbleiter), sodass sich Verluste kompensieren lassen.

Harald Gießen

- [1] C. Rockstuhl, *Physik Journal*, Februar 2008, S. 18
- [2] S. Linden und M. Wegener, *Physik Journal*, Dezember 2006, S. 29
- [3] G. Dolling et al., *Opt Lett.* **32**, 53 (2007)
- [4] M. Rill et al., *Nature Mat.* **7**, 543 (2008)
- [5] J. Valentine et al., *Nature* **455**, 376 (2008)
- [6] Jie Yao et al., *Science* **321**, 930 (2008)
- [7] D. Schurig et al., *Science* **314**, 977 (2006)

Prof. Dr. Harald Gießen, 4. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart

## SCHULD WAR NUR DIE BOSE-NOVA

Vor rund zehn Jahren entdeckten Forscher, dass Bose-Einstein-Kondensate (BECs) kollabieren und anschließend wie ein sterbender Stern explodieren können. Dazu ist es erforderlich, die kurzreichweitigen van-der-Waals-Kräfte so einzustellen, dass die Atome sich anziehen statt abstoßen. Wenn das BEC sich nämlich zusammenzieht, kommt es zu Stößen aus drei Atomen, bei denen eines aus der Atomwolke entweichen kann. Dieses Phänomen erhielt wegen seiner Ähnlichkeit zu einer Supernova den Namen Bose-Nova. Solange die an-

ziehenden Kräfte isotrop sind, fliegen die Atome gleichmäßig in alle Richtungen davon. Eine Stuttgarter Forschergruppe um Tilman Pfau hat nun in einem BEC aus  $^{52}\text{Cr}$ -Atomen eine kleeblattförmige Bose-Nova beobachtet. Die darin vorhandenen magnetischen Dipolkräfte hängen von der Orientierung der Atome ab, sind üblicherweise aber viel schwächer als die van-der-Waals-Kräfte. Aber den Forschern gelang es, das Magnetfeld so einzustellen, dass die van-der-Waals-Kräfte nahezu verschwanden. Dies führt dazu, dass

das BEC sich zusammenzieht. Die experimentellen Ergebnisse (Abb. obere Reihe) werden begleitet von theoretischen Rechnungen, welche die Explosion hervorragend modellieren (untere Reihe). Die Computersimulation sagt voraus, dass sich zwei Vortexringe bilden, die sich in entgegengesetzter Richtung drehen. Im Experiment ließen sich diese Wirbel bislang allerdings noch nicht blicken. T. Lahaye et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 080401 (2008)

