

Plasmonik – von Lichtcomputern zu »Star Trek«

LICHT IN NANOSTRUKTUREN VERSPRICHT

NEUARTIGE COMPUTER, HOCHEMPFLINDLICHE SENSOREN, NEUE MITTEL
GEGEN KREBS UND SOGAR UNSICHTBARKEIT

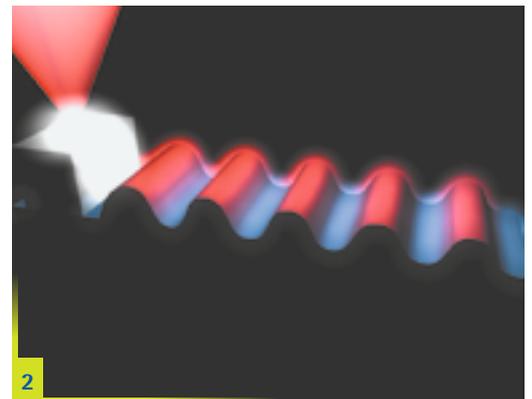
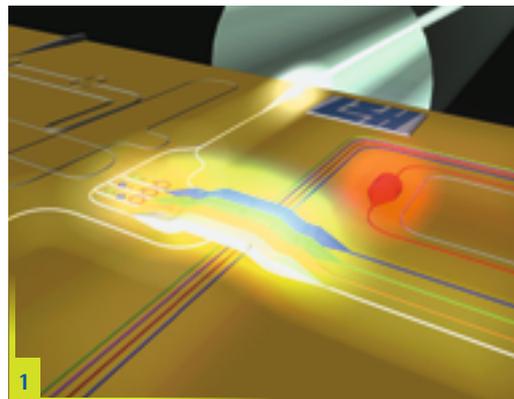
Die Mikroelektronik
eröffnet uns seit der Erfindung
des Transistors unglaubliche
Möglichkeiten in der Verarbeitung
gewaltiger Datenmassen.
Die Übertragung dieser Daten
geschieht mithilfe der Photonik
durch optische Impulse
in Glasfasern.
Zwei Wissenschaftler vom
Institut für Quantenoptik und
dem Laser Zentrum Hannover
zeigen, wie sich die Vorteile
von Elektronik und Photonik
in dem neuen Forschungsgebiet

»Plasmonik« vereinen lassen.

Zwei Entdeckungen des vergangenen Jahrhunderts haben unsere Welt revolutioniert – die Erfindung des Transistors (und damit die Entwicklung des Computers) und die Erfindung des Lasers. So wie der Computer, der riesige Mengen elektronischer Daten verarbeiten kann, ist auch der Laser unentbehrlich geworden. Er schneidet beliebige Werkstoffe mit ungekannter Genauigkeit, ist in jedem CD- und DVD-Player und ermöglicht den

Licht kann durch seine hohe Frequenz von einigen 100.000 Gigahertz eine große Bandbreite an Informationen übertragen, bis zu 100.000-mal mehr als durch Kupferkabel. Für seine Ausbreitung jedoch braucht es einen im Vergleich zur Mikroelektronik riesigen Platz: Licht mit 1550 Nanometern Wellenlänge, wie es in der Telekommunikation benutzt wird, benötigt optische Wellenleiter mit Kerndurchmessern von rund zehn Mikrome-

Im Vergleich der Geschwindigkeiten von Photonik und Elektronik ist das so, als würden Menschen zwischen Großstädten mit Hochgeschwindigkeitszügen reisen, müssten dann aber in der Stadt auf Pferdekutschen umsteigen. Die Verarbeitung von Informationen wird an der Schnittstelle zwischen Glasfaser und Computer ausgebremst. Der Grund liegt in der Beschaffenheit der Leiterbahnen: Je kleiner diese werden, desto lang-



Transport gewaltiger Datenmengen von Computern, Telefongesprächen und Rundfunk-sendungen in Glasfasern. Auf Grund der Vielzahl der Anwendungen des Lasers wird das 21. Jahrhundert auch als »Jahrhundert des Photons« und optische Technologien als »Photonik« bezeichnet.

tern. Auf Mikroprozessorchips hingegen können Elektronen auf Strukturen geleitet werden, die lediglich an die 50 Nanometer breit sind – allerdings nur mit Taktraten von einigen Gigahertz.

samer werden elektrische Signale transportiert. Die Situation ist heute so extrem, dass Schaltelemente auf Mikroprozessoren schneller sind als der Datenfluss über ihre nanometerbreiten Leitungen. Der elektronische Datentransport erleidet einen Engpass, aus dem es anscheinend keinen Aus-

weg gibt. Sollte dies das Ende des 1965 von Intel-Gründer Gordon E. Moore formulierten Gesetzes sein, nach dem sich die Leistung von Computern alle 20 Monate verdoppelt?

Es scheint also so, als würden Elektronik und Photonik unvereinbar sein. Aber was ist, wenn man deren Grundbausteine, nämlich die Elektronen und Photonen, miteinander verbindet? Hier setzt die Arbeit der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vom Institut für Quantenoptik (IQO) der Leibniz Universität Hannover und des Laser Zentrums Hannover (LZH) an, die genau diese Verbindung von Photonen und Elektronen, die »Plasmonik«, und die Entwicklung integrierter optischer Schaltkreise studieren (Abbildung 1).

Elektronen in Metallen verhalten sich wie eine kompressible Flüssigkeit, die sich im Metall frei bewegen kann. Die Ober-

fläche eines Metalls, meist Gold, kann analog zu einer Wasseroberfläche betrachtet werden. Wirft man einen Stein in einen Teich, kann man Wellen beobachten, die sich kreisförmig ausbreiten. Laserlicht in geeigneter Weise auf eine Metalloberfläche einstrahlt, macht mit der Elektronenflüs-

sigkeit das Gleiche: Auch hier gibt es Wellen im »Elektronenteich« – die so genannten Oberflächenplasmonen, im Folgenden kurz Plasmonen genannt (Abbildung 2). Die Plasmonen breiten sich auf den Metalloberflächen wie eine Art zweidimensionales Licht aus. Sie lassen sich in dünnen Wellenleitern aus transparenten Polymeren leiten, genau wie Licht in Glasfasern. Deren Durchmesser sind aber mit rund 100 Nanometern wesentlich kleiner. So lassen sich optische Systeme realisieren, die Ausdehnungen von wenigen zehn Mikrometern haben und den Datentransport auf Mikroprozessorchips ermöglichen.

Ein Hauptbestandteil der Forschung besteht darin, Plasmonen auf den Metalloberflächen und in Wellenleitern »sichtbar« zu machen. Dies gelingt mit Goldfilmen, auf denen sich die Plasmonen bewegen,

Strahlteiler, ganze Interferometer und Mikroresonatoren herzustellen (Abbildung 4). Wenn sich Plasmonen auf dem Goldfilm bewegen, geben sie ein wenig Licht in das Glasplättchen ab, das mit einer eigens dafür entwickelten Mikroskopiemethode detektiert werden kann.

Die Plasmonenleiter sind, passend zu optischen Glasfasern, für infrarotes Licht mit einer Wellenlänge von 1550 Nanometern optimiert. Theoretische und experimentelle Studien zeigen, dass Polymerwellenleiter von 500 Nanometern Durchmesser Plasmonen vollständig einschließen und über Entfernungen von fast 0,1 Millimeter leiten. Dies scheint auf den ersten Blick nicht weit zu sein, reicht aber dennoch für den Datentransport auf Mikroprozessoren. Der Leiterquerschnitt ist um das 20-Fache kleiner als bei gebräuchlichen Glasfasern und auch scharfe Abknickungen sind erlaubt.

Abbildung 1
Idee eines mikrooptischen Schaltkreises, in dem Daten per Plasmonen durch dünne Wellenleiter auf einer Metalloberfläche transportiert werden. Die Ankopplung könnte durch optische Glasfasern erfolgen.

Abbildung 2
Plasmonen, bestehend aus Elektronendichtewellen auf einer Metalloberfläche, können angeregt werden, wenn Laserstrahlen auf Unebenheiten, zum Beispiel auf eine Kante, fokussiert werden.

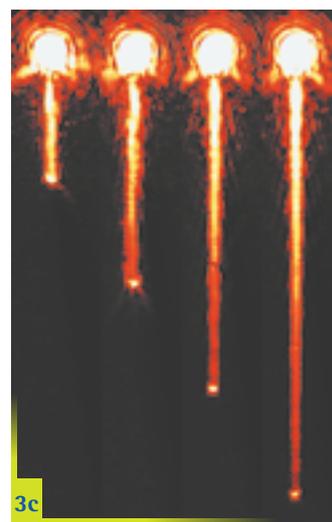
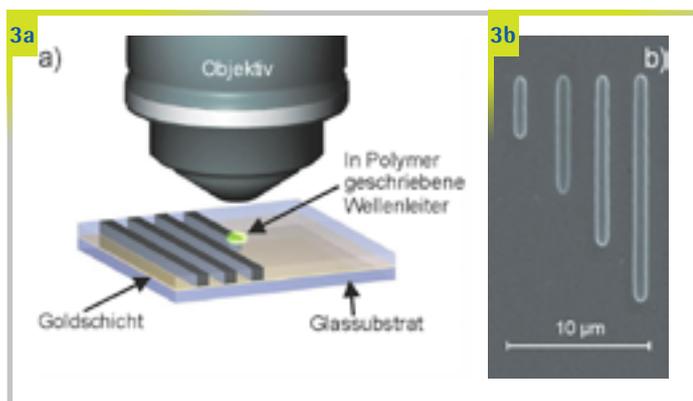
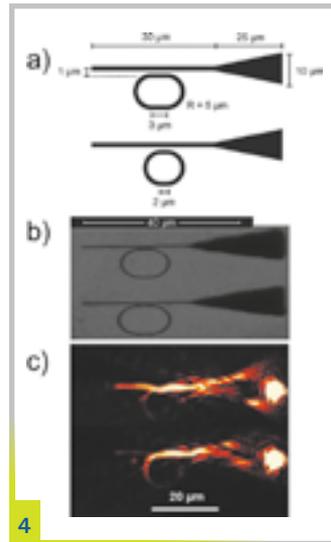


Abbildung 3
Plasmonischen Wellenleiter variierender Länge werden mit Laserstrahlen in eine Polymerschicht geschrieben (a), die sich auf einem dünnen Goldfilm befindet (b). Plasmonen in den Wellenleitern können mit Laserlicht angeregt werden, das auf ein Ende der Polymerlinien fokussiert wird. Bei ihrer Ausbreitung geben sie etwas Licht ab, das mit einer Kamera detektiert werden kann (c).

die lediglich 60 Nanometer dünn sind und sich auf kleinen Glasplättchen befinden. Plasmonenleiter werden mit einem Laser direkt auf die Goldoberfläche »geschrieben«, wie in Abbildung 3 dargestellt. Durch das Laserverfahren ist es möglich, nicht nur gerade Wellenleiter, sondern auch

Die kurze Ausbreitungslänge liegt daran, dass Plasmonen im Metall absorbiert werden. Daher arbeiten die Forscherinnen und Forscher daran, ihre Reichweite zu vergrößern,

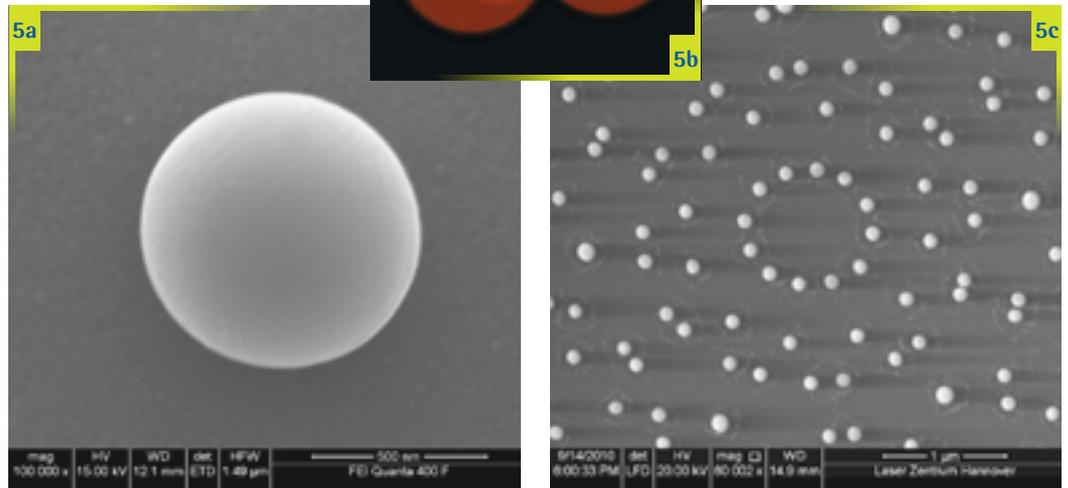
Abbildung 4
Das Laserschreiben erlaubt die Herstellung von komplexen Strukturen, wie Ringresonatoren, die als Filterelemente dienen (a, b). Die optische Aufnahme der Plasmonen zeigt unterschiedliche Transmissionseigenschaften der Strukturen.



die Plasmonen auf metallischen Nanopartikeln zeigen interessante optische Eigenschaften, insbesondere wenn solche »Nanokugeln« in regelmäßigen Gittern angeordnet werden, wie es in Abbildung 5 gezeigt ist. Die Herstellung dieser perfekt runden Goldkügelchen und daraus bestehenden Gittern gelang kürzlich mithilfe ultrakurzer Laserpulse. Die Nanopartikel können weiterhin mit Rezeptormole-

Plasmonen machen jedoch nicht nur das Unsichtbare sichtbar: Sie lassen sogar die Unsichtbarkeit selbst real werden. Damit ein Objekt unsichtbar wird, also kein Licht streut, reflektiert oder einen Schatten wirft, müssen Lichtwellen um dieses Objekt herumgeleitet werden. Das scheint auf den ersten Blick unmöglich, dennoch kann man die Lichtausbreitung in künstlichen Materialien, so genannten Metamaterialien, dahingehend beeinflussen. Die Idee stammt schon aus dem Jahr 1897. H. G. Wells formuliert es in dem Roman »The

Abbildung 5
Lasergenerierte sphärische Metallnanopartikel (a) haben durch Anregung von Plasmonen besondere optische Eigenschaften. Das elektromagnetische Feld ist schematisch in (b) dargestellt. Gitteranordnungen (c) ermöglichen hochempfindliche Sensoren für Brustkrebsmarker.



damit diese Technologie auf Mikrochips zum Einsatz kommen kann. Eine zukünftige Vision ist die Entwicklung von plasmonischen Schaltelementen, mit denen auch lichtschnelle optische Computer denkbar wären. Nicht nur für die Datenübertragung ergeben sich mit Plasmonen neue Konzepte: Auch

kühen überzogen werden, die selektiv auf bestimmte Proteine reagieren. Wenn sich zum Beispiel Brustkrebsmarker an die funktionalisierten Partikel binden, ändern sich deren optische Eigenschaften. So lassen sich äußerst empfindliche Sensoren realisieren, die neue Wege in der Krebs-

Invisible Man«: Ein Wissenschaftler entdeckt eine chemische Formel, mit der er den Brechungsindex seines Körpers an Luft anpassen kann, wodurch er unsichtbar wird. In der Realität ist es ein physikalisches Prinzip, auf dem die Unsichtbarkeit beruht. Die Bausteine der Metamaterialien können ringförmige metalli-



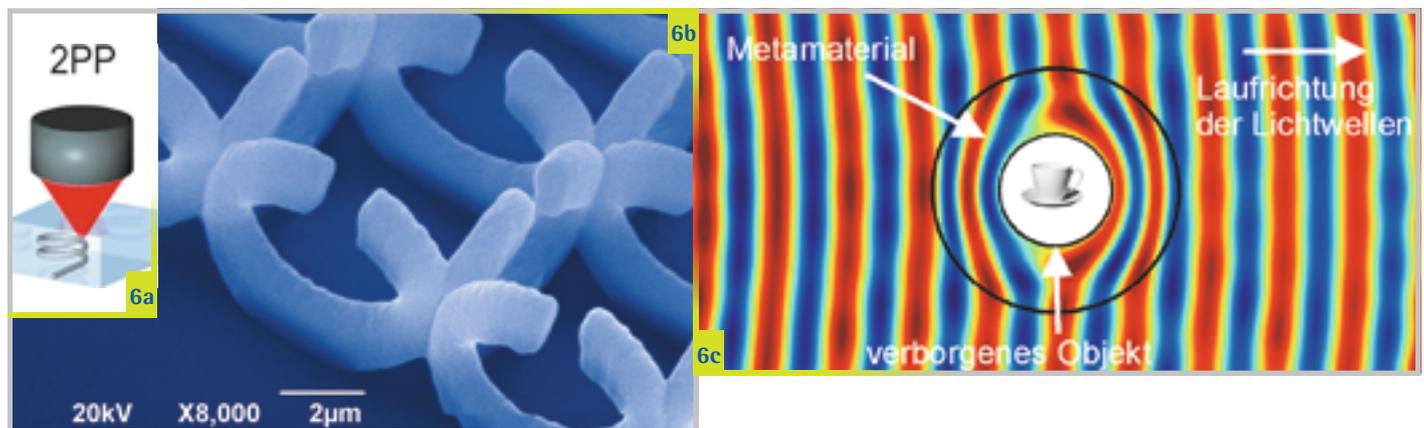
sche Nanostrukturen sein, in denen plasmonische Schwingungen angeregt werden. Geeignete dreidimensionale Nanostrukturen lassen sich durch Zwei-Photonen-Polymerisation von Kunststoffen, einem 3D-Laserverfahren (Abbildung 6), realisieren. Die hergestellten Polymerringe können anschließend selektiv mit Metall überzogen werden. Ordnet man viele Ringe mit bestimmten Durchmessern auf ineinander liegenden Kugelschalen an, werden Lichtwellen aus dem Inneren verdrängt. Ein Objekt im Zentrum würde für einen bestimmten Wellenlängenbereich verschwinden – ein optischer Tarnumhang, wie in »Harry Potter« oder »Star Trek«.

Dr. Carsten Reinhardt

Jahrgang 1972, leitet seit 2006 die Gruppe »Nanophotonik« in der Nanotechnologieabteilung des Laser Zentrums Hannover sowie seit 2007 auch die Forschungsgruppe »Nanophotonik« im Exzellenzcluster QUEST. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Optik, Laserphysik, Quanten- und Nichtlineare Optik, Mikro- und Nanooptik, sowie in der Computersimulation der Lichtwechselwirkung mit nanostrukturierter Materie. Kontakt: c.reinhardt@lzh.de

Prof. Dr. Boris N. Chichkov

Jahrgang 1955, ist seit 2009 Inhaber des Lehrstuhls »Nanoengineering« am Institut für Quantenoptik an der Leibniz Universität Hannover und Abteilungsleiter am Laser Zentrum Hannover e.V. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in den Bereichen Laserphysik und Laseranwendungen, Quanten- und Nichtlineare Optik, Nano- und Biophotonik, Biomedizinische Implantate, Tissue Engineering und regenerative Medizin. Kontakt: b.chichkov@lzh.de



genbereich verschwinden – ein optischer Tarnumhang, wie in »Harry Potter« oder »Star Trek«.

Die Wissenschaftler zeigen mit ihrer Forschung den Reichtum an optischen Eigenschaften, den das spannende Gebiet der Plasmonik bereithält und es werden vermutlich noch viele erstaunliche Entdeckungen aus ihr hervorgehen.

Die vorgestellten Arbeiten werden teilweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Exzellenzcluster QUEST und im Schwerpunktprogramm »Ultrafast Nanooptics« gefördert.

Alle Abbildungen stammen aus dem Laser Zentrum Hannover (LZH).

Abbildung 6
Dreidimensionales Laserschreiben durch Zwei-Photonen-Polymerisation (a) erlaubt die Herstellung von Mikroringen aus Polymer (b). Das Material kann selektiv mit einer Metallschicht überzogen werden. Die daraus entstehenden optischen Eigenschaften erlauben es, Lichtwellen um ein Objekt herumzuleiten, wie in einer Computersimulation dargestellt ist. Das Objekt im Zentrum erscheint für einen Beobachter als unsichtbar.