

Forschungsergebnisse

Optische Technologien

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

Optische Metamaterialien in Prozessüberwachungssystemen

Optische Metamaterialien versprechen Auflösungen jenseits der Beugungsgrenze. In einem von der Baden-Württemberg Stiftung finanzierten Projekt haben Wissenschaftler der Universität Stuttgart die Weiterleitung und Formung von Plasmonwellen untersucht.

Fertigungsverfahren im Nanomaßstab erfordern ein optisches Prozessüberwachungssystem, das in der Lage ist, schnell und berührungslos mit hoher Auflösung unter Produktionsbedingungen zu arbeiten. Strukturgrößen unterhalb der verwendeten Wellenlängen verbieten dabei den Einsatz von klassischen, direkt abbildenden Systemen. Vielmehr ist man auf indirekte modellgestützte Verfahren angewiesen, die aber Nachteile bei der Messgeschwindigkeit aufweisen und zudem Vorabkenntnisse über die zu untersuchenden Strukturen erfordern. Alternativ können hochauflösende Rasterverfahren eingesetzt werden, die aber langwierig sind und oftmals eine Leitfähigkeit der Probenoberfläche (z.B. Rasterelektronenmikroskop) voraussetzen.

Metamaterialien sind periodische, metallische Strukturen, welche optische Eigenschaften aufweisen, die nicht in

der Natur vorkommen. Mit ihrer Hilfe soll eine direkte Abbildung jenseits der Beugungsgrenze ermöglicht werden. Ein konventionelles Mikroskop könnte in diesem Fall mit einer speziell strukturierten Metamaterial-Linse erweitert werden, um die in Form von evaneszenten Moden vorliegende Strukturinformation in propagierende Moden zu übertragen und somit ein Mikroskopbild zu ermöglichen (Abb. 1).

Schematisch gibt es mehrere wichtige Schritte, die untersucht werden müssen. Zunächst muss das Nahfeld eines Subwellenlängenobjektes mit Plasmonen auf der Linsenstruktur koppeln können. Anschließend müssen diese Plasmonen ohne große Verluste weitergeleitet und im Sinne einer Bildvergrößerung manipuliert werden. Im letzten Schritt werden die Plasmonen beispielsweise über Gitterstrukturen wieder zu Photonen gekoppelt und können dann im Fernfeld mit dem Mikroskop beobachtet werden. Zu Beginn des Projekts war lediglich der erste Schritt bekannt, die Kopplung zwischen dem Nahfeld des Subwellenlängenobjektes und den Plasmonen.

Der Vorschlag von John B. Pendry, Nahfeldlinsen mittels Negativ-Index-Materialien zu realisieren, führt noch

nicht zur Lösung des beschriebenen Problems, da bei diesem Typ von Abbildungssystemen keine Vergrößerung auftritt und das Bild des Objektes weiterhin im Nahfeld vorliegt, die Abbe-Limitierung also nach wie vor besteht. Außerdem enthält der Pendry-Vorschlag keine weitere Information darüber, wie durch das Design der Plasmonmoden das Negativ-Index-Material mit den gewünschten Eigenschaften erreicht werden soll. Bei einer genaueren Betrachtung der Pendry-Linse wird aber klar, dass die Kopplung zwischen den Oberflächenplasmonen auf den entsprechenden Linsenoberflächen die eigentliche Ursache für die Subwellenlängenabbildung darstellt.

Aus diesem Grund wurde die Rolle der Plasmonanregung in verschiedenen Metamaterialstrukturen im Detail untersucht. Im Gegensatz zu Photonen erlauben Plasmonen eine erheblich höhere Konzentration der elektromagnetischen Energie in einem Rauminvolumen. Andererseits ist eine einfache Kopplung des Vakuumphotons, das von der Lichtquelle kommt, mit Plasmonen auf glatten Oberflächen aus prinzipiellen Gründen (Impulserhaltung) nicht direkt möglich.

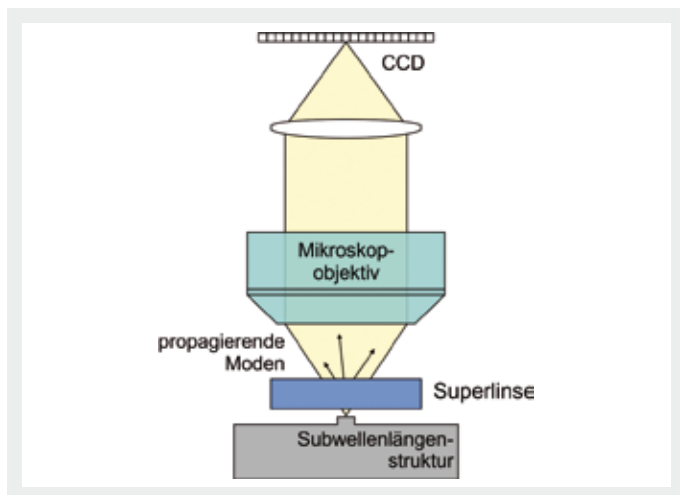


Abb. 1: Prinzipzeichnung der geplanten hochauflösenden Optik zur Abbildung von Subwellenlängenstrukturen

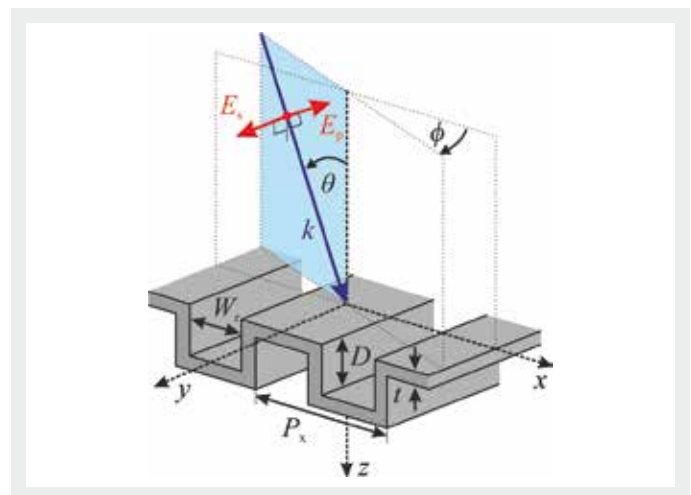


Abb. 2: Geometrische Parameter einer einfachen Mäanderstruktur: Metalldicke t , Hub D , Gitterperiode P_x und Grabenbreite W_x

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kopplung zwischen Subwellenlängenobjekt und Plasmonen der Abbildungsstruktur sehr effizient mit einer periodisch korrigierten, metall-dielektrischen Mäanderstruktur erreicht werden kann (US 7, 710, 336, B2; May 04 2010, Abb. 2). Bei einer Stapelung dieser Mäanderstrukturen können Plasmonen außerdem relativ verlustarm weitergeleitet werden (resonant gekoppelte Plasmonwellenleiter). Es wurde weiterhin gezeigt, dass ein

Ion Beam) realisiert. Die korrekte Funktion dieser Mäanderstrukturen wurde mittels optischer Messungen (FTIR, Ellipsometrie) und Vergleiche mit Simulationsrechnungen bestätigt. Hierzu wurden Rechenprogramme teilweise neu erstellt bzw. modifiziert. Die Rechenprogramme basieren auf der Lösung der Maxwellgleichungen mit Fourier-modalem Ansatz. Weiterhin wurden auch kommerzielle Programme wie COMSOL und CST verwendet. Wegen der hohen Komplexität

Als Nebenprodukt dieser Arbeiten ergab sich ein systematischer Zugang zur weiteren optischen Integration. Die dadurch mögliche Integrationsdichte von Funktionselementen übersteigt dabei die von konventionellen optischen Elementen um mehr als den Faktor 100. Sie kommt damit in die Nähe der elektronischen Integrationsdichte, ohne deren Nachteile, wie die relative geringe Schaltgeschwindigkeit (elektronisch im ps-Bereich, plasmonisch im fs-Bereich und kürzer).

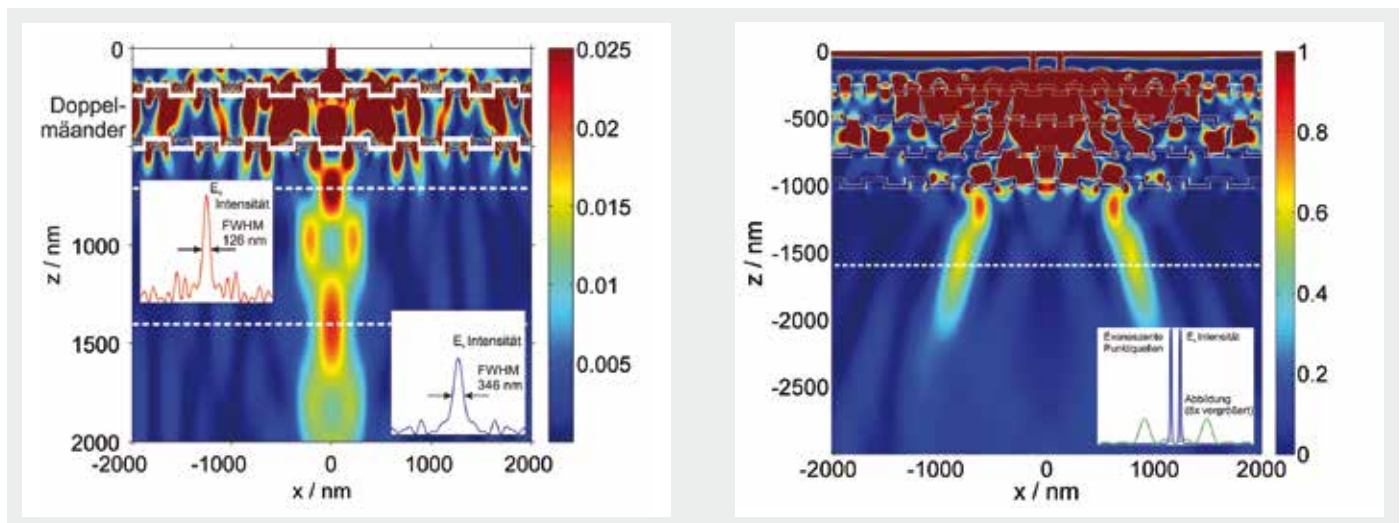


Abb. 3: (a) Verteilung der elektrischen Feldintensität hinter einem 100 nm breiten Spalt in einer Chrom-Maske und anschließender Doppelmäanderstruktur ($P_x = 500$ nm, $t = 20$ nm, $D = 50$ nm and $D_{spa} = 200$ nm). Der Einsatz auf der linken Seite zeigt die Feldverteilung entlang der gestrichelten Linie bei $z = 700$ nm und der Einsatz in der unteren rechten Seite bei ca. $z = 1,5$ μ m (b) Aus 4 Mäanderschichten bestehender Stapel, der zwei Subwellenlängenquellen im Abstand von 250 nm auf einen Abstand von 2 μ m (Faktor 8) vergrößert. Die Anregung sowie die Vergrößerung 600 nm hinter der Mäanderstruktur wird ebenfalls gezeigt. Die Intensität der Vergrößerung ist hierbei um den Faktor 1000 kleiner als die Anregung

Zweifachstapel die Funktionsweise einer Nahfeldlinse nach Pendry imitiert (Abb. 3a).

Die Realisierung der Vergrößerungsfunktion kann mittels resonant gekoppelter periodischer Strukturen mit ortsabhängiger Periode erreicht werden. Die Vergrößerungsfunktion und die Kopplung des Plasmons mit dem Bildfeld kann mittels eines Stapels von vier Mäanderstrukturen verschiedener Periode erreicht werden. Die prinzipielle Funktionalität wurde mittels Simulation bestätigt (Abb. 3b).

Experimentell wurden Mäanderstrukturen mit unterschiedlichen Technologien (Elektronenstrahlolithografie, Interferenzlithografie, Selbstorganisation von Polymerkolloiden, Focused

der Struktur wird die Abbildungsfunktion in einem anschließenden DFG-Projekt weiter untersucht.

Im Rahmen des Projekts wurde herausgefunden, dass das physikalische Superlinsenprinzip auf der Weiterleitung und Formung von Plasmonwellen und der Kopplung von Plasmonwellen und Photonen an den jeweiligen Ein- und Auskoppelstellen des Abbildungssystems basiert. Der Stand der Technik konnte durch die Veröffentlichung des Effekts der resonanten Plasmonwellenkopplung als Basis für plasmonische Abbildungssysteme mitgeprägt werden (Opt. Express 19, 3627-3636 (2011)). Weiterhin wurde klar, dass jede Form von plasmonischer Abbildung eine Plasmonwellenleiterstruktur erfordert.

Kontakt:

Philip Schau
 ITO - Institut für Technische Optik
 Universität Stuttgart
 Pfaffenwaldring 9
 70569 Stuttgart

Tel. 0711 68569870
 schau@ito.uni-stuttgart.de
 www.ito.uni-stuttgart.de

Prof. Dr. H. Schweizer
 Universität Stuttgart
 4PI - 4, Physikalisches Institut
 Pfaffenwaldring 57
 70550 Stuttgart

Tel. 0711 68565104
 h.schweizer@physik.uni-stuttgart.de
 www.pi4.uni-stuttgart.de