



Das organische Halbleitermaterial lässt sich stark dehnen und verdrehen.

## Drehbare Optoelektronik

Ein organisches Material macht Fotodetektoren rauscharm und extrem dehnbar.

Wearables, das Internet der Dinge und Soft Robotics erzeugen einen Bedarf an stark anpassungsfähiger Optoelektronik, um intelligente Oberflächen zu verwirklichen, die Sensorik, Rechenleistung und Kommunikation in sich vereinen. Anwendungsbeispiele sind Systeme zur Gesundheitsüberwachung, die sich direkt auf der Haut tragen lassen, oder Sensoren auf gekrümmten Oberflächen für die Gestenerkennung. Derzeit werden häufig steife optoelektronische Komponenten mittels dehnbarer Verbindungen auf weiche flexible Substrate aufgebracht. Ein weiterer Ansatz sind elastische organische Halbleiter auf geeigneten Substraten. Allerdings ist es bislang nicht gelungen, rauscharme, leistungsstarke organische Fotodioden auf Basis eines wirklich elastomeren Bulk-Heteroübergangs als fotoaktive Schichten zu entwickeln. Das hat nun ein Team des Georgia Institute of Technology in Atlanta, USA, geschafft.<sup>1)</sup>

Bisherige Bulk-Heteroübergänge waren höchstens minimal dehnbar, ihr Elastizitätsmodul mindestens eine Größenordnung größer als das der menschlichen Haut. Zudem waren sie bereits bei Dehnungen von mehr als 10 Prozent überbeansprucht. Das nun entwickelte optoelektronische Material weist ein Elastizitätsmodul von 2,4 MPa auf (das von menschlichem Gewebe ist kleiner als 30 MPa) und reißt erst bei einer Dehnung von 189 Prozent. Diese Messungen erfolgten an der freistehenden Schicht.

Das Material ist eine Mischung aus einem Polystyrol, einem Donor-Polymer und einem Bisaddukt-Akzeptor, also einem Produkt von zwei gleichzeitigen Additionsreaktionen desselben Moleküls. Dass sich aus diesem Donor und Akzeptor rauscharme Fotodioden herstellen lassen, war bekannt. Zunächst galt es, das optimale Mischungsverhältnis zwischen den drei Substanzen für die besten optischen und elektrischen Eigenschaften zu finden.

Als Substrat diente das weit verbreitete Polymer PDOT. Ihm kommt große Bedeutung zu, weil es zum Beispiel einen großen Unterschied für die Elastizität machte, wie stark es vorgehnt war. Das Material für die untere Elektrode war PDOT:PSS, das für die obere eutektisches Gallium-Indium.

Die nicht optimierte Machbarkeitsstudie des Fotodetektors erreicht bei 653 nm Wellenlänge eine äquivalente Rauschleistung in der Größenordnung von einigen zehn Pikowatt. Dehnungen bis mindestens 60 Prozent wirken sich nicht negativ aus.

## Haarfeines 3D-Endoskop

Eine multimodale optische Faser erlaubt es, dreidimensionale Bildfolgen schwer zugänglicher Orte zu gewinnen.

Mit Lichtlaufzeitverfahren lassen sich 3D-Bilder bei unterschiedlichen Anwendungen rekonstruieren. Beispiele sind die Untersuchung von Hohlräumen in Flugzeugtriebwerken oder Kernreaktoren beziehungsweise die Darstellung von Hohlorganen während eines operativen Eingriffs. Hier gab es in den vergangenen Jahren

verschiedene Entwicklungsansätze. Europäische Forschungseinrichtungen unter Leitung der Universität Glasgow haben eine 3D-Bildgebung durch eine multimodale optische Faser mit einem Kerndurchmesser von nur 50  $\mu\text{m}$  demonstriert.<sup>2)</sup> Das Verfahren nutzt die Erfassung von Objekten im Fernfeld der Faser. Beteiligt waren auch die Universität Exeter, das Fraunhofer Centre for Applied Photonics in Glasgow, das Leibniz-Institut für Photonische Technologien in Jena und die Tschechische Akademie der Wissenschaften in Brunn.

Die eingesetzte multimodale Faser bietet dem Licht tausende Ausbreitungswege, die als unabhängige Informationskanäle dienen. So lässt sich Licht extrem effizient mit hoher räumlicher Informationsdichte übertragen. Allerdings unterliegen die eingespeisten kohärenten Signale starker Streuung, sodass am Faserende für gewöhnlich ein komplexes Speckle-Muster entsteht. Das Forschungsteam hat daher eine Methode entwickelt, um das eintretende Licht so zu strukturieren, dass es am Faserende einen einzelnen Punkt bildet. Dazu hat es zunächst die Übertragungsmatrix der Faser experimentell ermittelt.

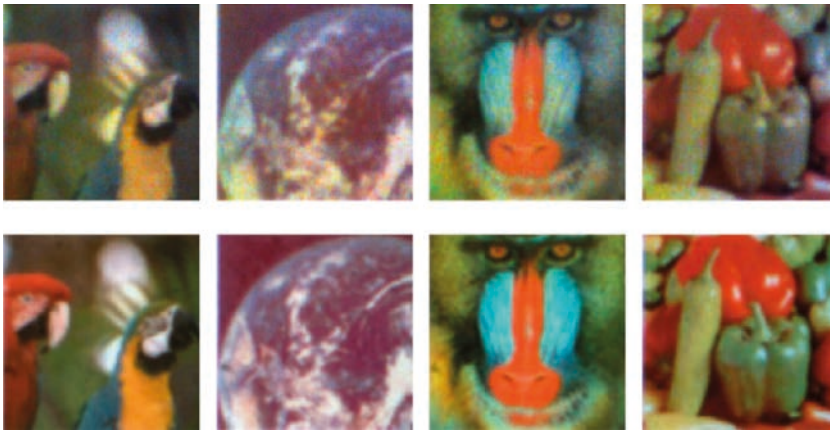
Mit dem Faserendoskop lässt sich eine aufzunehmende Szene abrastern und dabei die Lichtintensität erfassen. Per Laufzeitverfahren misst das Team die Umlaufzeit eines Laserpulses, der hierbei reflektiert wird. Einziger Nachteil dieses Ansatzes: Nach der Kalibrierung muss die Faser in einer festen Position verbleiben. Daher gilt es nun, die Kalibrierungszeit so weit zu verkürzen, dass sich das Faserendoskop ohne Nachteile bewegen, biegen und verdrehen lässt.

Die vorliegende Machbarkeitsstudie scannt etwa 23 000 Punkte pro Sekunde. Dabei können die sich bewegenden Objekte einige Meter vom Ende der 40 cm langen Faser entfernt sein. Die resultierenden 3D-Bilder erreichen eine Auflösung im Millimeterbereich, mit Bildwiederholraten von etwa 5 Hz.

1) Y. Park et al., *Sci. Adv.* **7**, eabj6565 (2021)

2) D. Stellinga et al., *Science* **374**, 1395 (2021)

3) M. Miyata et al., *Optica* **8**, 1596 (2021)



Die Bilder der oberen Reihe entstanden mit dem Metalinsen-Farbteiler, die der unteren Reihe mit gewöhnlichen Farbfiltern.

## Filterloser Farbsensor

Mit einer Metalinse lassen sich empfindlichere Bildsensoren herstellen.

Bildsensoren spielen eine wichtige Rolle bei Smartphones, autonomen Fahrzeugen oder der Überwachung. Durch immer kleinere Pixel bis in den Submikron-Bereich schrumpfte im vergangenen Jahrzehnt die Lichtleistung der Bildsensoren stetig. Ein Sprung in der Empfindlichkeit täte daher wieder Not. Hierfür gibt es verschiedene Ideen. Ein Team des japanischen Telekommunikationsunternehmens NTT hat nun einen Ansatz vorgestellt, der auf einer Metalinse beruht.<sup>3)</sup>

Bildsensoren verfügen über Farbfilter vor jedem Pixel, um RGB-Bilder zu erzeugen. Dadurch erreicht jedoch ein erheblicher Teil des Lichts die Pixel nicht. Um dies zu vermeiden, haben verschiedene Forschungsteams vorgeschlagen, statt mit Filtern mit Farbteilern zu arbeiten, welche die drei Farbanteile des Lichts auf die gewünschten Pixel verteilen. Die Ergebnisse waren jedoch durchwachsen, weil die Trennung der Farbanteile nicht gut gelang. Auch schräg einfallendes Licht und eine Polarisationsabhängigkeit des Farbteilers beeinträchtigten die Bildqualität. Dem NTT-Team ist nun ein deutlicher Fortschritt gelungen.

Die japanische Metalinse besteht aus drei geometrischen Grundelementen, die sich beliebig kombinieren lassen. Hierbei handelt es sich um dielektrische Nanostrukturen,

die 1250 nm hoch sind. Als Material diente Siliziumnitrid, weil es für sichtbares Licht transparent ist und einen hohen Brechungsindex besitzt. Zudem ist der Herstellungsprozess kompatibel mit demjenigen von heutigen CMOS-Bildsensoren.

Das Team simulierte für seine Metalinse Phasenprofile für die drei Grundfarben bei verschiedenen Brennpunktlagen. Durch die Wahl der jeweils geeigneten Nanostrukturen versuchten die Beteiligten Punkt für Punkt, den gewünschten Profilaaren möglichst nahe zu kommen. Dies wiederholten sie für alle möglichen Ausgangswerte, um die Lösung mit den geringsten Phasenfehlern zu finden.

Die anhand dieser Vorgaben hergestellte Metalinse wurde umfassend charakterisiert. Ein entsprechender Bildsensor erreichte ein Signalniveau, das um einen Faktor 2,8 höher lag als bei einem filterbasierten Sensor. Der verwendete Schwarzweiß-Bildsensor hatte Pixelgrößen von  $0,84 \mu\text{m}$ . Zudem simulierten die Forschenden die Metalinse mit einer optimierten Periodizität der Nanosäulen. Die Farbaufteilung der Linse erreicht Werte von maximal 51 Prozent. Der Einfallswinkel des Lichts kann um bis zu  $16,5^\circ$  von der Senkrechten abweichen – was den Anforderungen in heutigen Smartphones genügt. Nun will das Team die Metalinse als Demonstrator unmittelbar in einen Bildsensor integrieren.

Michael Vogel



## RELIABLE UNDER ALL CONDITIONS.

Heading into the unknown to open new horizons demands reliable tools. Help turn your research goals into reality. Vacuum valve solutions and bellows from VAT provide unfailing reliability and enhanced process safety – under all conditions.

