

## ■ Künstliche Haut

**Elastische Sensor-Arrays bilden die Druckempfindlichkeit der menschlichen Haut schon recht gut nach.**

Die Entwicklung von Robotern, die auch äußerlich dem Menschen ähneln, oder möglichst natürlich funktionierenden Prothesen ist bislang noch im Stadium der Grundlagenforschung. Trotzdem suchen Wissenschaftler bereits jetzt Wege, um eine künstliche Haut zu entwickeln. Das ist kein leichtes Unterfangen, da der Mensch über seine Haut nicht nur mechanischen Widerstand oder statische Kräfte erfasst, sondern auch lokale Stimuli mit hoher Auflösung unterscheiden kann. Zum Beispiel spürt ein Mensch bei einer Berührung, die einen Druck von 10 Kilopascal auf ein Quadratzentimeter große Fläche ausübt, noch Unebenheiten mit nur 50 Mikrometer Größe. Die leichteste, noch erfassbare Berührung entspricht ungefähr einer Empfindlichkeit von weniger als 0,1 Gramm pro Quadratmillimeter (etwa 1 kPa).

Zwei Teams haben nun unabhängig voneinander Labormuster einer künstlichen Haut entwickelt, die in beiden Fällen aus einer Matrix aktiver Wandler besteht, die sie auf ein elastisches Material aufgebracht haben. Die Labormuster haben jeweils Kantenlängen von mehreren Zentimetern und die Technologien lassen sich prinzipiell auf größere Flächen skalieren. Die Forscher um Ali Javey von der University of California in Berkeley verwenden für ihre künstliche Haut ein Array aus Germanium-

Silizium-Nanodraht-Feldeffekttransistoren (FETs), die sie auf ein elastisches Polyimid-Substrat mit einer druckempfindlichen Gummischicht laminiert haben.<sup>1)</sup> Sie verhält sich wie ein abstimmbarer elektrischer Widerstand, der in Reihe mit den Nanodraht-FETs geschaltet ist. Dagegen mikrostrukturierten die Wissenschaftler um Zhenan Bao von der Stanford University für ihre künstliche Haut Polydimethylsiloxan-Schichten (PDMS), um druckempfindliche Kondensator-Arrays zu erzeugen, die sie dann in die Gate-Dielektrika eines Arrays aus organischen FETs integrierten.<sup>2)</sup>

Beide Ansätze erreichen Ansprechzeiten von weniger als hundert Millisekunden und einen dynamischen Bereich zwischen 0,5 und 20 kPa. Javey und seine Kollegen wiesen in Versuchen nach, dass die Funktion ihrer künstlichen Haut durch wiederholtes Zusammenrollen auf Radien von 2,5 mm keinen Schaden nimmt. Bao und seine Mitstreiter haben die PDMS-Schicht auf ein unelastisches Siliziumsubstrat laminiert, konnten aber mit weiteren Experimenten zeigen, dass eine elastische kapazitive Drucksensormatrix herstellbar ist.

Das Prinzip der künstlichen Haut lässt sich auch auf andere Anwendungen außerhalb der Prothetik oder Robotik übertragen. Vorstellbar sind zum Beispiel minimal-invasive chirurgische Instrumente mit verbesserten taktilen Fähigkeiten oder aufrollbare Displays mit gesteigerten berührungsempfindlichen Eigenschaften.

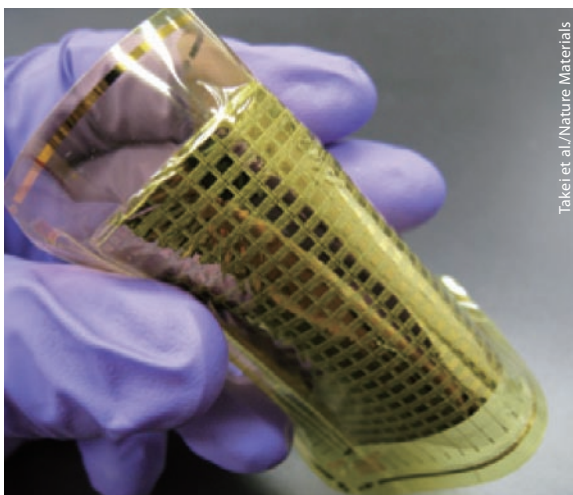
## ■ Alternative Elektronik

**Wissenschaftler entwickeln den bislang schnellsten Transistor auf Basis von Graphen.**

Graphen mit seiner honigwabeförmigen, zweidimensionalen Struktur gilt als vielversprechendes Material für zukünftige elektronische Schaltungen. Weil die Elektronen in Graphen sich wie relativistische Teilchen verhalten, lassen sich aus dieser Modifikation des Kohlenstoffs sehr schnelle Transistoren aufbauen. Allerdings stehen noch viele Probleme dem Traum von einer reinen Graphenelektronik im Wege. So ist es bislang nicht gelungen, Transistoren herzustellen, ohne dass dabei das Graphengitter stark gestört wurde – und die Ladungsträgermobilität dadurch drastisch sinkt.

Eine mögliche Lösung haben nun Wissenschaftler um Xiangfeng Duan von der University of California in Los Angeles gefunden.<sup>3)</sup> Bei der Fertigung von gängigen Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFETs) ist durch eine sich selbst ausrichtende Gate-Struktur sichergestellt, dass die Ränder von Source-, Drain- und Gate-Elektrode sich nicht überlappen oder andererseits Lücken zurückbleiben, was fatal für die Funktion des MOSFETs wäre. Dieses Verfahren funktioniert bei Graphen jedoch nicht, weil dadurch das Graphengitter beschädigt wird. Duan und seine Kollegen verwenden daher zunächst einen Nanodraht als Gate-Elektrode, den sie mit einem Trockentransferprozess auf das Graphen aufbringen, das sich auf einem Siliziumsubstrat befindet. Durch diesen Transferprozess entstehen keine nennenswerten Defekte. Dann legen die Forscher eine 10 nm dünne Platinschicht auf die Gesamtstruktur, die der Nanodraht in zwei isolierte Bereiche teilt – die Source- und Drain-Elektroden, die dadurch automatisch perfekt ausgerichtet sind. Der Nanodraht wirkt bei dem Prozess wie eine Maske und legt die Gate-Länge des Transistors auf etwa 140 nm fest.

Mit 1,27 Millisievert pro Mikrometer weist das fertige Bauelement



Takei et al./Nature Materials

Diese sieben mal sieben Zentimeter große künstliche Haut besteht aus einem Array aus 19 mal 18 Pixeln und lässt sich krümmen.

1) Kuniharu Takei et al., Nature Materials, DOI: 10.1038/nmat2835 (2010)

2) Stefan Mannsfeld et al., Nature Materials, DOI: 10.1038/nmat2834 (2010)

3) Lei Liao et al., Nature, 467, 305 (2010)

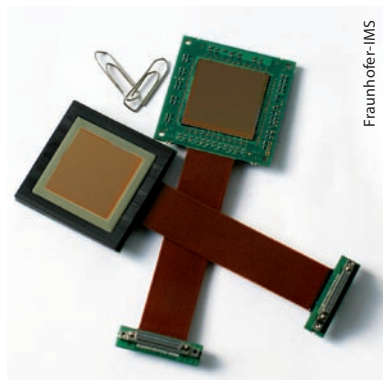
das höchste Verhältnis zwischen Ausgangsstrom und Eingangsspannung auf (die so genannte Transkonduktanz), das man bislang bei Graphentransistoren erreicht hat. Mit weiteren Messungen konnten die Forscher nachweisen, dass die intrinsische Grenzfrequenz (die Frequenz, bei deren Überschreiten die Signalamplitude am Ausgang des Transistors unter einen vorgegebenen Wert sinkt) im Bereich von 100 bis 300 GHz liegt – rund doppelt so hoch wie bei den besten Silizium-MOSFETs, die vergleichbare Dimensionen haben. Die Ladungsträgermobilität dieses Graphentransistors fällt sogar um etwa zwei Größenordnungen höher aus als die von vergleichbaren Siliziumtransistoren.

Die Wissenschaftler wollen nun Bauelemente mit kürzeren Gate-Elektroden herstellen, um die Grenzfrequenz weiter zu steigern, und arbeiten daran, den Fertigungsprozess auf größere Substratflächen zu übertragen.

## ■ Sensor fürs Extreme

### Ein CMOS-Bildsensor arbeitet mit hoher Dynamik in einem weiten Temperaturbereich.

Für manche Fälle müssen Bildsensoren auch bei extremen Temperaturen noch eine gute Dynamik aufweisen. Beispiele sind Anwendungen in der Wehrtechnik oder bei Produktionsanlagen der chemischen oder Stahlindustrie. Bislang erhältliche CCD-Bildsensoren (Charge-Coupled Device) versagen bei Umgebungstemperaturen höher als ungefähr 60 °C. Forscher des Fraunhofer-Instituts für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS) in Duisburg haben nun im Auftrag eines Industriekunden einen CMOS-Bildsensor (Complementary Metal Oxide Semiconductor) entwickelt, der bei Umgebungstemperaturen zwischen –40 und +115 °C noch zuverlässig arbeitet – und das bei einem hohen Dynamikbereich beziehungsweise Belichtungsspielraum von 90 Dezibel.



Der CMOS-Bildsensor des Fraunhofer-IMS arbeitet bei Umgebungstemperaturen von –40 bis +115 °C.

Der quadratische Sensor hat eine Größe von 2,5 cm Kantenlänge und verfügt über 256 mal 256 Pixel. Für Anwendungen bei schwacher Beleuchtung oder für Aufnahmen im Infrarot oder Ultraviolett lässt er sich direkt an einen elektronischen Bildverstärker anschließen. Die IMS-Forscher haben das Bauelement in einem 0,5- $\mu\text{m}$ -CMOS-Prozess gefertigt.

Damit der Sensor diese Dynamik über einen weiten Temperaturbereich liefern kann, dürfen seine Pixel nur einen geringen Dunkelstrom aufweisen, denn dieser hängt exponentiell von der Temperatur ab. Ein Pixel eines CMOS-Bildsensors besteht aus einer Fotodiode und mehreren Transistoren, welche die Ladung des Pixels in eine messbare Spannung umwandeln. Legt man den p-n-Übergang der Dioden so aus, dass er nicht bis zur Oberfläche reicht, verringert dies das Eigenrauschen der Pixel. Die Wissenschaftler nutzen hierzu eine zusätzliche Dotierungsschicht. Dieser als „Buried Photodiodes“ bekannte Trick wird in ähnlicher Form beispielsweise auch bei Digitalkameras mit sehr kleinen Pixeln angewandt.

Michael Vogel