



Die Subpixel des Dresdner OLED-Mikrodisplay-Demonstrators sind  $2,5 \times 2,5 \mu\text{m}^2$  klein.

## Rekordverdächtige Dichte

Ein Vollfarb-Mikrodisplay erreicht nie dagewesene Pixeldichten dank neuer Fertigung und Ansteuerung.

Mikrodisplays aus organischen Leuchtdioden (OLEDs) sollten für Virtual und Augmented Reality eine möglichst große Pixeldichte besitzen. Mobile Anwendungen wie Brillen dürfen nur wenig Energie verbrauchen, weil sonst die Ergonomie oder die Einsatzdauer leiden. Heutige OLED-Mikrodisplays werden überwiegend auf 200-mm-Wafern in 180-nm- bis 110-nm-Prozessen gefertigt. Fast immer handelt es sich um Frame-gesteuerte Architekturen, die alle Pixel kontinuierlich aktualisieren. Statische oder langsam veränderliche Bildinhalte machen das oft überflüssig. Daher existiert seit einigen Jahren der Ansatz einer speicherbasierten Ansteuerung: Jedem Pixel steht ein Speicher zur Verfügung, der einen bestimmten Grauwert ohne Auffrischung dauerhaft erhält. Solche Architekturen brauchen nur ein Hundertstel der Energie von Frame-gesteuerten Architekturen. Der Platz, den die Speicherzellen benötigen, geht aber zulasten der Pixeldichte.

Einem Team des Fraunhofer-Instituts für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP in Dresden ist es nun gelungen, beide Arten der Ansteuerung miteinander zu verquicken und die Pixeldichte zu steigern.<sup>1)</sup> Entscheidend dafür war, auf 300-mm-Wafer zu wechseln und auf einen 28-nm-Prozess umzustellen. Als Demonstrator fertigte das Team ein OLED-Mikrodisplay mit

0,18 Zoll Diagonale, also knapp 5 mm, und einer Auflösung von  $1440 \times 1080$  monochromen Pixeln ( $2,5 \times 2,5 \mu\text{m}^2$ ). Alternativ kamen  $720 \times 540$  Farbpixel zustande, ausgeführt als RGB- plus Weiß-Subpixel mit einer resultierenden Pixelgröße von  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ . Die daraus folgende RGBW-Auflösung von 5040 ppi ist Weltrekord. Die Frame-Rate ist zwischen 0 und 480 Hz variabel; die Untergrenze ist für eine rein Frame-basierte Ansteuerung technisch unmöglich. Mit der Ansteuerung ließen sich auch MikroLED- oder reflektierende Flüssigkristalldisplays (LCoS) betreiben.

## Inspirierendes Innenohr

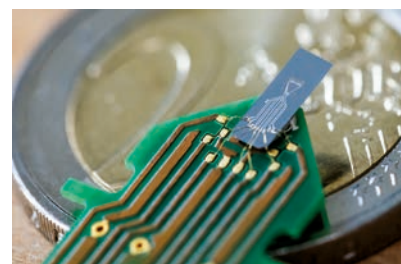
Ein mikroelektromechanisches System nutzt Prinzipien des menschlichen Hörens aus.

Mikrofone spielen in vielen Anwendungen eine wichtige Rolle. Bei Hörgeräten und Sprachassistenten lässt die Spracherkennung nach wie vor zu wünschen übrig, wenn Hintergrundgeräusche vorliegen. Um das zu verbessern, gilt es, Eigenschaften des menschlichen Hörens auf die Systeme zu übertragen. Das Innenohr von Säugetieren zerlegt Geräusche schon vor der elektrischen Wandlung in einzelne Frequenzen. Seine nichtlineare Verstärkung macht Töne hörbar, deren Schalldruckpegel sich um einen Faktor  $10^6$  unterscheiden; die Verstärkung einzelner Haarzellen passt es kontinuierlich an die Umgebung an.

Forschende mehrerer deutscher Institutionen haben nun ein adaptives

neuromorphes mikroelektromechanisches System entwickelt, das diese Fähigkeiten des Innenohrs nachempfunden.<sup>2)</sup> Beteiligt waren die TU Ilmenau, das University College Cork, die Christian-Albrechts-Universität Kiel, das Karlsruher Institut für Technologie und das Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT.

Das elektromechanische Pendant zu den Haarzellen stellen winzige Transducer aus Silizium unterschiedlicher Länge dar, die auf verschiedene Frequenzen ansprechen. Sie lassen sich individuell thermomechanisch steuern, um so zum Beispiel die Verstärkung an unterschiedliche Hintergrundgeräusche anzupassen. Sowohl die lineare als auch die nichtlineare Verstärkung sind um bis zu 44 dB veränderbar; die Haarzellen von Säugetieren erreichen zwischen 40 und 60 dB. Der Rückkopplungs- und Anpassungsalgorithmus arbeitet schnell



Das Herzstück des Mikrofons stellen Balken aus Silizium dar, die den Haarzellen nachempfunden sind.

und effizient: Typische Rechenzeiten liegen unter zehn Mikrosekunden.

Nachdem ein Demonstrator vorliegt, soll nun ein Prototyp folgen. Ein solches System sollte mit weniger Energie auskommen als heutige miniaturisierte Mikrofone und gleichzeitig das selektive Hören verbessern.

## Messen in Hohlräumen

Ein Impedanzspektroskop schrumpft auf die Dimensionen einer Pille.

Kleine Sensorsysteme sind eine Vision der medizintechnischen Forschung, um den Magen-Darm-Trakt zu untersuchen. In der Industrie müssen Maschinen oft (teil-)demontiert

werden, um eine Fehlerdiagnose in Hohlräumen zu erstellen. Ein Team des Fraunhofer-Instituts für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM hat nun gemeinsam mit der ebenfalls in Berlin angesiedelten MSC Group für die Untersuchung von Hohlräumen eine Multisensorkapsel entwickelt, die erstmals auch den Formfaktor für die Impedanzspektroskopie drastisch verringert.

Die Impedanzspektroskopie misst den Wechselstromwiderstand abhängig von der Frequenz des Wechselstroms. Das Spektrum erlaubt es, auf Veränderungen im Medium rückzuschließen, in dem sich die Messelektroden befinden. Der neue Sensor macht Widerstände zwischen 100 und 10 M $\Omega$  messbar; Schrittweite und Lage des Messbereichs lassen sich einstellen. Während mobile Geräte zur Impedanzspektroskopie etwa so groß sind wie ein Buch, bringt es die Messpille auf Gehäuseabmessungen von nur 11 mm Durchmesser und 17 mm Länge.

Der hochintegrierte Demonstrator nutzte neben dem Impedanzspektroskop sechs weitere Sensoren für Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit, Töne, Beschleunigung und Licht. Des Weiteren stecken im Gehäuse die Ausleseelektronik, ein Akku sowie eine Spule für die drahtlose Energieübertragung und das Auslesen der Daten. Diese arbeitet gemäß dem Qi-Standard und ist so klein, dass das Team die Leitungen und Schaltungen für das Laden und Senden optimieren



Der Pillen-Sensor misst Impedanzen in schwer zugänglichen Hohlräumen.

musste, um mit ihr überhaupt noch Energie zu übertragen. Den 40 mAh großen Akku zu laden, dauert nun zwei Stunden.

### Empfindlich im Infrarot

Eine Gitterstruktur steigert die Quanteneffizienz einer IR-Lawinenfotodiode.

Optoelektronik für das mittlere Infrarot (2 bis 5  $\mu\text{m}$ ) ist für Anwendungen in Sensorik, Spektroskopie, medizinischer Diagnostik oder Kommunikationstechnologien relevant. Da sich solche Bauteile inzwischen in Siliziumplattformen integrieren lassen, gibt es in diesem Spektralbereich keine grundsätzlichen Hürden für eine Siliziumphotonik, und das Interesse an geeigneten Fotodetektoren ist groß.

Aufgrund der schwachen Infrarot-Signale kommen heute meist Lawinenfotodioden zum Einsatz, zum Beispiel auf HgCdTe-Basis. Ihre hohen Dunkelströme erfordern aber eine Kühlung auf kryogene Temperaturen.

Als Konsequenz steigen Komplexität und Kosten; die Mobilität ist eingeschränkt. Ein Gruppe Forscher der University of Virginia in Charlottesville und der University of Texas in Austin hat nun das Labormuster einer Lawinenfotodiode mit deutlich besseren Kenndaten vorgelegt.<sup>3)</sup>

Die Fotodiode beruht auf einem AlInAsSb-Materialsystem, das inklusive Substrat aus zwölf Schichten besteht. Entscheidend war es, die Absorberschicht dünner zu machen, ohne die äußere Quanteneffizienz zu senken. Das gelang mit einer metallischen Gitterstruktur auf der Fotodiode, die senkrecht einfallendes Licht beugt und als seitlich wandernde Mode in den Absorber einkoppelt.

Durch die Gitterstruktur steigt die Quanteneffizienz der Fotodiode von sieben auf 22 Prozent an. Bei gleicher Temperatur ist die Dunkelstromdichte des Labormusters um zwei Größenordnungen geringer als die von AlInAsSb-Lawinenfotodioden; im Vergleich zu HgCdTe-Dioden sind es sogar drei Größenordnungen. Auch bei Bandbreite und Verstärkungsbroadbandprodukt schneidet die Neuentwicklung besser ab: Sie liefert mit 7 GHz bzw. 200 GHz viermal größere Werte.

Michael Vogel

- 1) P. Wartenberg et al., SID 2023 Digest (in Vorbereitung)
- 2) C. Lenk et al., Nat. Electron. **6**, 370 (2023)
- 3) D. Chen et al., Nat. Photonics (2023), DOI: 10.1038/s41566-023-01208-x

