

Kettenantrieb auf Chips

Auch der kleinste Motor kann manchmal noch zu groß sein – z. B. auf Mikrochips. In der Mikroelektromechanik benötigt heutzutage jedes bewegliche Teil und jede Antriebswelle einen eigenen Motor. Um Motoren und damit Platz einzusparen, haben Forscher der Sandia National Laboratories in Albuquerque, USA, jetzt eine alte Idee neu belebt: Ähnlich wie in den Fabriken des 19. Jahrhunderts, in denen eine einzige Dampfmaschine einen ganzen Maschinenpark mit mechanischer Energie versorgen konnte, wollen die Wissenschaftler jetzt – allerdings in einem ganz an-



Das Kettenglied der kleinsten Kette der Welt ist rund $50\ \mu\text{m}$ lang und damit schmäler als ein Menschenhaar. Solche winzigen Kettenantriebe aus Silizium könnten in mikroelektromechanischen Bauteilen mehrere Antriebswellen gleichzeitig in Gang setzen und damit viele Motoren überflüssig machen. (Quelle: Sandia)

deren Maßstab – die Kraft eines einzigen Motors mit einer winzigen Silizium-Kette auf mehrere Antriebswellen übertragen.¹⁾

Was auf den ersten Blick aussieht wie eine Fahrradkette, besteht in Wirklichkeit aus nur rund $50\ \mu\text{m}$ langen Gliedern. Hergestellt wird eine solche Kette in einem Vielschicht-Ätzprozess, bei dem polykristalline Silizium-Oberflächen sich in fünf Ebenen strukturieren lassen (eine Trägerebene mit elektrischen Kontakten und vier Ebenen für bewegliche Teile).

Doch warum setzen die Entwickler auf komplizierte Ketten statt auf einfache Bänder? Silizium-Bänder wären zwar ausreichend stark und flexibel, würden jedoch bei nicht in gerader Reihe platzierten Zahnrädern zu große Kräfte und Materialbelastungen hervorrufen. Bei der patentierten Silizium-Kette dagegen kann der Winkel zwischen zwei Gliedern bis zu 52° betragen. Ohne spezielle Zahnräder oder Verstärkungen kann diese Kette auf einer

Länge von $500\ \mu\text{m}$ frei laufen. Größere Kettenlängen erfordern winzige Kettenspanner, die noch zu entwickeln wären. Gut möglich, dass eine ähnlich Mikrokette einmal den Verschluss einer winzigen Kamera betätigen oder als mechanischer Taktgeber fungieren könnte.

Kühlschrank mit Magnet-Kühlung

Kühlschränke, wie man sie heutzutage im Haushalt hat, arbeiten üblicherweise mit einem Gaskompressor, bei dem ein flüssiges Kühlmittel erst verdampft, dann kondensiert und nach der Kompression seine Wärmeenergie an die Raumluft abgibt. Probleme bereiten nicht nur der begrenzte Wirkungsgrad von rund 40 %, sondern auch manches Kühlmittel: Ammoniak und Methylchlorid sind giftig und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) schädigen die Ozonschicht der Erde. Effizienter und umweltfreundlicher arbeiten könnten stattdessen Kühlschränke, die den magnetokalorischen Effekt ausnutzen. Holländische Forscher haben jetzt ein auf Übergangsmetallen basierendes Material hergestellt, das sich mithilfe von Magnetfeldern bei Zimmertemperatur als Kühlmittel einsetzen lässt.²⁾

Werden Elektronenspins bei Zimmertemperatur durch ein Magnetfeld ausgerichtet, sinkt die Entropie. Da aber die Gesamtentropie eines geschlossenen Systems nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik mit der Zeit zunehmen muss, erwärmt sich gleichzeitig das Material. Dieser Effekt lässt sich für eine magnetische Kühlung ausnutzen, indem man die Wärme mithilfe von Wasser oder Luft abführt. Schaltet man nun das Magnetfeld ab, richten sich die Elektronenspins wieder zufällig aus und die Temperatur des Materials sinkt unter die Umgebungstemperatur. Das Material ist jetzt in der Lage, Wärme zu absorbieren. Anschließend beginnt der Kreislauf von neuem mit dem Einschalten des Magnetfeldes. Da die Größe des Effekts proportional zum magnetischen Moment und zur Stärke des Magnetfelds ist, werden an Materialien, die sich zum Einsatz in einer Magnet-Kühlung eignen, ganz spezifische Anforderungen gestellt.

Schon früher wurde eine Gadolinium-Verbindung ($\text{Gd}_5\text{Ge}_2\text{Si}_2$) zur magnetokalorischen Kühlung ver-

wendet. Dieses Material verändert seine magnetische Entropie jedoch in Magnetfeldstärken von rund 2 T nur bei tiefen Temperaturen. Um bei Zimmertemperatur zu funktionieren, benötigt die Verbindung große und damit teure supraleitende Magneten mit einer Feldstärke von 5 T.

Im Gegensatz dazu eignet sich die neue Mangan-Verbindung ($\text{MnFeP}_{0,45}\text{As}_{0,55}$) schon bei Raumtemperatur. Das magnetische Moment von Mangan ist zwar nur rund halb so groß wie das von Gadolinium, doch die hohe Curie-Temperatur von rund 300 K führt dazu, dass schon kleinere Permanentmagneten (mit Feldstärken von rund 2 T) die Elektronenspins ausrichten können.

Kühlschränke mit Magnet-Kühlung könnten einen Wirkungsgrad von bis zu 60 % erreichen. Ob sich das Material jedoch tatsächlich einmal in einem kommerziellen Produkt wiederfinden wird, ist im Moment noch fraglich. Die Möglichkeiten, Kühlaggregate von wenigen mW bis zu einigen 100 W herstellen zu können, sind allerdings sehr verlockend.

Diode wandelt Wärme in Strom

Statt überhitzte Motoren und heiße Mikrochips einfach zu kühlen, könnte die überschüssige Wärme künftig als Energiequelle genutzt werden: Wissenschaftler des Massachusetts Institute of Technology und der amerikanischen Firma Eneco haben eine Halbleiter-Diode entwickelt, die den thermionischen Effekt ausnutzt, um Wärme in Strom umzuwandeln.³⁾

Schon 1883 beobachtete Thomas Edison zum ersten Mal den thermionischen Effekt. Er fand heraus, dass Elektronen aufgrund ihrer thermischen Bewegung von einer Elektrode durch ein Vakuum zur anderen springen können, sodass elektrischer Strom fließt. Bis vor kurzem waren dazu jedoch Temperaturen von $1000\ ^\circ\text{C}$ nötig, und selbst dann hatte der Prozess nur einen Wirkungsgrad von maximal 10 %.

Versuche, solche Dioden aus Halbleitern aufzubauen, scheiterten bislang an dem Problem, eine sehr schmale Vakuum-Lücke zwischen zwei n- bzw. p-dotierten Halbleiterschichten herzustellen. Die Idee, die letztlich zu einer thermischen

1) www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2002/chain.htm

2) O. Tegus et al., Nature 415, 150 (2002)

3) www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns9991862

Halbleiterdiode führte, bestand darin, die Vakuum-Lücke durch eine Schicht eines elektronenreichen Halbleiters zu ersetzen. Indiumantimonid oder Quecksilbercadmiumtellurid als Zwischenschicht erhöhen deutlich den Stromfluss. Wie genau ist allerdings noch nicht geklärt. Das Forscherteam vermutet, dass die Elektronen eine Art Ladungsträger-Lawine im Halbleitermaterial auslösen.

Im Labor funktioniert die neue thermionische Methode zur Stromumwandlung bereits bei Temperaturen von 200 °C und erreichte einen Wirkungsgrad von 17 %. Die Forscher hoffen durch bessere Dotierungen, die Betriebstemperatur weiter senken und den Wirkungsgrad auf bis zu 25 % erhöhen zu können. Mithilfe einer solchen Diode könnte dann beispielsweise die Bordelektronik eines Autos von der Motorhitze gespeist werden. Auch die Betriebsdauer von Notebooks ließe sich durch die Abwärme der Mikroprozessoren deutlich verlängern.

Neuer Infrarot-Laser bei Zimmertemperatur

Viele Anwendungen in der hochauflösenden Spektroskopie, der chemischen Sensorik und in der optischen Kommunikation benötigen Lichtquellen im mittleren Infrarot. Der Wellenlängenbereich von 3–12 μm gilt jedoch als unterentwickelt – es fehlen geeignete kohärente Quellen. Für das sichtbare Spektrum bzw. das nahe Infrarot werden dagegen schon preisgünstige Halbleiter-Diodenlaser produziert, die Licht mit einer kontinuierlichen Leistung von einigen 10 mW emittieren. Eine schweizerische Arbeitsgruppe aus Neuchâtel, Lausanne und Zürich hat vor kurzem einen so genannten Quanten-Kaskaden-Laser (*quantum cascade laser*, QC-Laser) vorgestellt, der bei Raumtemperatur Licht mit einer Wellenlänge von 9,1 μm emittiert.⁴⁾

QC-Laser gibt es schon seit einigen Jahren. Im Gegensatz zu den sonst üblichen Diodenlasern, deren optische Übergänge auf dem Überwinden der Bandlücke mittels Elektronen-Loch-Rekombination basieren, wird bei QC-Lasern das Licht von Elektronen erzeugt, die wie in einem Wasserfall ein kaskadenförmiges, nanostrukturiertes Leitungsbandprofil durchlaufen. Das Besondere an dem jetzt in der Schweiz entwickelten QC-Laser ist, dass er

bei Raumtemperatur arbeitet: Bei einer Temperatur von 292 K emittiert er kontinuierlich 17 mW und bei 312 K immerhin noch 3 mW.

Der limitierende Faktor für einen kontinuierlichen Betrieb war bisher die starke Erwärmung des Bauteils. Um sie in den Griff zu bekommen, muss zum einen die Schwellenstromdichte möglichst klein sein und zum anderen die Bauteilgeometrie so gewählt werden, dass nur geringe mechanische Spannungen auftreten. Die Forscher betteten daher die laseraktive Heterostruktur in eine Indiumphosphid-Schicht ein, sodass die Wärme in alle Raumrichtungen gut abgeleitet wird. Die Heterostruktur besteht aus 35 epitaktisch gewachsenen InGaAs/InAlAs-Schichten.

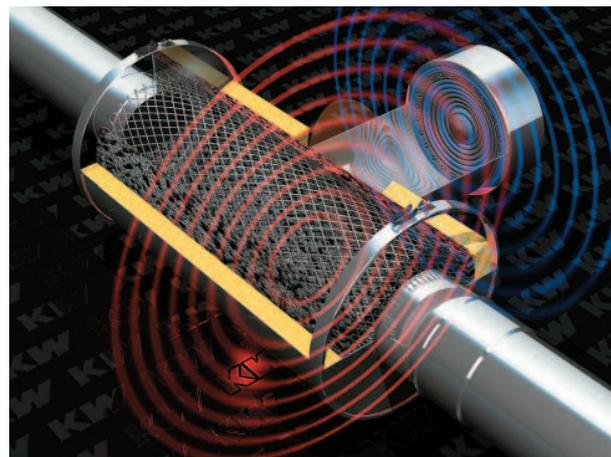
Der neue Laser-Typ besitzt bisher zwar nur einen Wirkungsgrad (Stromeingangs- zu Lichtausgangsleistung) von 0,55 %. Doch die Forscher sehen großes Potenzial: Sie wollen die Schwellenstromdichte von jetzt 3,1 auf 2,1 kA/cm^2 senken und die thermische Leitfähigkeit durch noch schmalere Strukturen um rund 20 % erhöhen. Gelänge dies, wären in Zukunft Betriebstemperaturen von über 370 K möglich.

Schalldämpfer für Heizungen

In vielen Anwendungen, z. B. in der Lüftungstechnik, lassen sich Störgeräusche, die aus nur wenigen Frequenzen bestehen, durch die destruktive Interferenz gegenphasiger Druckwellen aktiv dämpfen und im Idealfall sogar auslöschen.⁵⁾ Große Probleme bereitete aber bislang die Schalldämpfung beim Abgasstrom von Heizungen: Bei hohen Temperaturen oder feuchten, aggressiven Medien müssen aktive Schalldämpfer entweder aus besonders widerstandsfähigen und teuren Komponenten bestehen oder vor äußeren Einflüssen geschützt werden. Um den Lärm der turbulenten Luftströmungen, die von Gebläse oder Brennerflamme erzeugt werden, in den Griff zu bekommen, haben Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) gemeinsam mit der Firma Kutzner und Weber kürzlich ein aktives Dämpfungssystem vorgestellt.⁶⁾

Der aktiv absorbierende Schalldämpfer beruht auf einem $\lambda/4$ -Resonator in einem seitlichen Kanal, der über eine schmale Öffnung mit dem schallführenden Abgasrohr verbunden ist. Um den Abzweig

mechanisch zu schützen und einen Gasaustausch mit dem Abgasrohr zu vermeiden, ist die Öffnung durch ein Lochblech mit aufgelegtem Vlies geschützt. Zusätzlich sorgt eine spezielle, thermisch resistente Folie für eine hermetische Abdichtung. Im nicht aktiven Zustand bildet eine Lautsprechermembran am Ende des seitlichen Kanals und das Rückvolumen des Gehäuses näherungsweise einen akustischen Serienresonator.



Dieser kompakte Schalldämpfer für Heizungsanlagen erzeugt elektronisch eine akustische Sperre für Störschall in Abgasströmen. Aufgrund seiner Konstruktion seitlich neben dem Abgasrohr ist er unempfindlich gegen Hitze und praktisch wartungsfrei. (Quelle: Fraunhofer IBP)

In der Umgebung der Resonanzfrequenz dämpft bereits die erhöhte Nachgiebigkeit der Wandauskleidung den Störschall. Bei der aktiven Dämpfung wird zusätzlich die druckproportionale Spannung eines in dem Resonator befindlichen Mikrofons linear und mit hoher Verstärkung an den Lautsprecher rückgekoppelt, sodass die Membran zu noch stärkerem Nachgeben gezwungen wird. Dabei erhöht sich einerseits der Druck im Rückvolumen, andererseits verringert sich der Druck an der Trennfläche zum Kanal und die Dämpfung wird deutlich stärker. Ein solcher aktiver Schallschlucker mit 50 cm Länge ist wesentlich kleiner als die bisherigen porösen oder faserigen passiven Dämpfer. Besonders für industrielle Anwendungen und große Heizungsanlagen ist diese elektronisch erzeugte, praktisch wartungsfreie akustische Sperre interessant, um Störschall in bis zu 200 °C heißen Abgasen zu verringern.

HOLGER KOCK

4) M. Beck, Science 295, 301 (2002)

5) Phys. Bl., Oktober 2001, S. 62

6) www.ibp.fhg.de

Elektroden für bessere Akkus

Lithium-Polymer-Akkus werden schon seit mehreren Jahren für den Einsatz in Mobiltelefonen und Notebooks entwickelt.^{*4)} Statt wie bisherige Lithium-Ionen-Akkus mit flüssigem Elektrolyt zwischen den Elektroden arbeiten sie mit einer lithiumionenleitenden Polymerschicht. Schwere Gehäuse oder aufwändiger Auslaufschutz sind daher nicht notwendig. Um diesen preiswerten und kompakten Akkutyp jetzt noch leistungsfähiger machen, haben Wissenschaftler vom Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) einen so genannten bipolaren Aufbau entwickelt.⁺⁴⁾

Die Elektroden des neuen Aufbaus bestehen aus einer dünnen Metallfolie, deren eine Seite mit der positiven und deren andere Seite mit der negativen Elektrode beschichtet ist. Die aktive Masse der positiven Elektrode ist Lithiumkobaltdioxid. Für die negative Elektrode kommt Naturgraphit zum Einsatz. Zwischen je zwei solcher Elektroden liegt die polymere Elektrolytschicht – eingebettet in einer Sandwich-Struktur. Lädt man nun den Akku auf, werden Lithiumionen aus dem Lithiumkobaltdioxid ausgelagert, wandern durch den Polymer-Elektrolyten zur gegenüberliegenden Graphit-Elektrode und werden dort ins Graphitgitter eingelagert. Beim Entladen läuft die elektrochemische Reaktion genau anders herum ab.

Die mittlere Entladespannung für eine Einzelzelle beträgt rund 3,6 V. Für höhere Spannungen lassen sich Einzelzellen einfach in Reihe schalten – durch Aufeinanderstapeln. Der Strom wird dann direkt an den Endplatten des Stapels abgegriffen. Weil die gesamte elektrochemisch aktive Elektrodenfläche als Leitungsquerschnitt dient, ist der Innenwiderstand einer solchen bipolaren Batterie niedriger als beim herkömmlichen Aufbau. Die Batterie kann daher dank der neuen Elektroden bei gleicher Kapazität rund die doppelte Leistung liefern wie in herkömmlicher Bauart. Mit einer spezifischen Leistung von bis zu 1000 W/kg könnte sie den Strom für kabellose Bohrmaschinen, Heckenscheren oder Staubsauger liefern. Zu kaufen gibt es diesen Akku allerdings noch nicht. Zurzeit entwickeln die Fraunhofer-Forscher den ersten Prototyp. An ihm soll getestet werden, wie oft sich der

Akku ohne nennenswerten Kapazitätsverlust laden bzw. entladen lässt.